



НАУЧНО-ТЕХНИЧЕСКОЕ ОБЩЕСТВО
ПРИБОРОСТРОИТЕЛЬНОЙ ПРОМЫШЛЕННОСТИ
ИМ. АКАДЕМИКА С. И. ВАВИЛОВА

Е. Г. ВЕЛИКАНОВ,
С. Ф. ГРИШИН, Л. С. ГУРЕВИЧ

КРИОГЕННЫЕ НАСОСЫ

ЗАОЧНЫЙ
ИНСТИТУТ
ПОВЫШЕНИЯ
КВАЛИФИКАЦИИ
ИТР

МАШИНОСТРОЕНИЕ

1977

Редакционно-методический совет:

Гютов Н. И., Ерюкин А. В., Плисковский В. Я.,
Розанов Л. Н., Садиков Л. Г. (ответственный за
выпуск), Саксаганский Г. Л. (председатель), Цейт-
лин Л. Б.

Научный редактор В. С. Коган

Великанов Е. Г., Гришин С. Ф., Гуревич Л. С. Кри-
огенные насосы. М., "Машиностроение", 1977, 39 с.

В брошюре изложены принципы действия криогенных
откачных устройств — насосов конденсационного и ад-
сорбционного типов. Приведены теоретическая модель
конденсации разреженных газов, результаты эксперимен-
тального исследования конденсационных насосов, мето-
ды их расчета, технико-экономические и эксплуата-
ционные характеристики.

Рассмотрены типы адсорбентов, их основные струк-
турные и сорбционные характеристики, примеры конст-
руктивного исполнения и практического использования
адсорбционных насосов.

Табл. 8, ил. 15, список лит. 16 назв.

ВВЕДЕНИЕ

Криогенные насосы, конденсационные и адсорбционные, относятся к перспективным средствам получения вакуума. Криогенный насос — единственный тип насоса, позволяющий получать очень высокий вакуум и обеспечивать сверхчистые вакуумные условия при откачке с атмосферного давления. По способу откачки газов как конденсационные, так и адсорбционные насосы относятся к откачным устройствам поверхностного действия.

В конденсационных насосах газы поглощаются за счет конденсации на поверхностях, охлажденных до 20 К и ниже, а в адсорбционных — за счет физической сорбции газов материалами с развитой внутренней поверхностью (адсорбентами). Адсорбционные насосы обычно работают при температуре 78 К и ими практически невозможно откачивать неон, водород и гелий. При охлаждении сорбента до гелиевых температур адсорбционные насосы позволяют откачивать все газы, тогда как для откачки гелия методом конденсации необходимы сверхнизкие температуры (десятые Кельвина). Тот факт, что методом адсорбции газ откачивается при более высокой температуре, чем при конденсационном методе, является существенным преимуществом адсорбционных насосов перед конденсационными. Однако из всех типов насосов поверхностного действия только конденсационные насосы позволяют откачивать очень большие количества газа, приводящие к образованию на откачиваемой поверхности слоя газа толщиной δ , на много порядков превышающей толщину монослоя δ_0 . Только для конденсационных насосов коэффициент прилипания (конденсации) весьма близок к 1, т.е. необходимая быстрота откачки может быть достигнута при минимальных размерах насоса.

Следует отметить, что в зависимости от режима работы одно и то же устройство, являющееся криогенным насосом, может быть либо адсорбционно-конденсационным (например, адсорбционный насос, работающий при 77 К, является в то же время конденсационным для паров воды углеводородов, двуокиси углерода и т. д.), либо конденсационно-сорбционным (любой конденсационный насос при откачке количества газа, приводящих к образованию слоя газа толщиной $\lesssim \delta_0$, является адсорбционным). При откачке смеси газов конденсационным насосом появляются новые механизмы откачки — криосорбция ранее сконденсированными слоями и криозахват — замуровывание неконденсируемых примесей в слой конденсата. По-видимому, некоторая сложность в распознавании механизмов откачки привела к путанице в терминологии, иногда встречающейся в литературе по вакууму. Критерий определения типа криогенного насоса прост — каков механизм откачки основного количества газа, таков и тип насоса. Конденсационные и адсорбционные насосы в настоящей брошюре будут рассмотрены отдельно. Гл. 1 написана Е.Г. Великановым и С.Ф. Гришиным, гл. 2 — Л.С. Гуревичем. Разновидность адсорбционных насосов — криосорбционные насосы, основанные на принципе сорбции в заранее сконденсированном слое газа, и успешно совершенствуемые уже более 10 лет, в данной брошюре не рассмотрены. Их характеристики приведены в монографии [15].

Задолго до появления на свет конденсационных насосов в вакуумной технике для повышения вакуума использовались ловушки, охлаждаемые жидким азотом, на поверхностях которых вымораживались пары масел, воды, двуокись углерода и т. д. Но использование вымораживания газов на поверхностях, охлаждаемых до температуры ниже тройной точки, в качестве основного средства для получения и поддержания низких давлений, было предложено лишь в 1949 г. Б.Г. Лазаревым, Е.С. Боровиком и их сотрудниками. В 1958 г. о своих первых работах в этой области доложили на национальном вакуумном симпозиуме ученые США.

К более давним средствам откачки относятся адсорбционные насосы. Еще в 1777 г. Шееле наблюдал, что древесный уголь поглощает газы и пары. Дюбуа-Реймонд предложил называть это явление адсорбцией. Адсорбционные процессы при низких давлениях приобрели особенно большое значение через столетие, когда развивающаяся техника стала требовать получения больших разрежений. С появлением диффузионных насосов роль адсорбционных насосов в получении и поддержании

вакуума резко упала, но в настоящее время снова возросла, как и вообще всех типов насосов поверхностного действия.

Развитие криогенных методов откачки находится в прямой зависимости от уровня криогенной техники. Появление надежных в эксплуатации с хорошей теплоизоляцией емкостей для жидких газов стимулировало создание заливных крионасосов для самых различных, в основном, экспериментальных установок. Существующие в настоящее время холодильные газовые машины с холодопроизводительностью до 20 кВт на уровне 12-19 К привели к появлению серии газодинамических и имитационных установок с рабочим объемом до 130 тысяч м³, где в качестве основной системы откачки использованы проточные конденсационные насосы.

I. КОНДЕНСАЦИОННЫЕ НАСОСЫ

Теоретическое обоснование конденсационного метода получения вакуума

Конденсационная откачка основана на фазовом превращении вещества из газообразного в жидкое или твердое. Поскольку при откачке, как правило, интересуются низкими давлениями, то под конденсационными насосами понимаются устройства, в которых откачка газа идет за счет вымерзания (отвердевания) его на охлажденных поверхностях. Температура последних должна быть ниже тройной точки откачиваемого газа. Достижимый вакуум по тому или иному газу определяется давлением насыщенных паров при температуре конденсирующей поверхности. В табл. 1 приведены температуры кипения $T_{кип}$ широко применяемых криожидкостей, температуры тройных точек $T_{тр}$ для ряда веществ, температуры $T_{п}$, при которых давления насыщенных паров определяются заданной величиной и значения удельной быстроты откачки z_0 данного газа конденсирующей поверхностью (температура откачиваемого газа 293 К).

Из табл. 1 видно, для получения конденсационным методом сверхвысокого вакуума ($p < 10^{-7}$ мм рт.ст.) по всем газам, кроме паров воды и двуокиси углерода, необходимы $T_{кип}$ жидкого азота. При температуре жидкого водорода конденсируются до сверхнизких давлений все основные атмосферные газы, исключая неон, водород и гелий, а при температурах, получае-

Параметры, характеризующие конденсационную откачку

Вещество	Тем- пера- тура Т _{ил} , К	Тем- пера- тура трой- ной точки Т _{тр} , К	Температура насыщенных паров Т _п , К при давлении										S ₀ л(с·см ²)
			P _п мм. рт. ст.										
			10 ⁻¹³	10 ⁻¹¹	10 ⁻⁹	10 ⁻⁷	10 ⁻⁵	10 ⁻³	10 ⁻¹	10	10 ¹	10 ³	
Вода	273,1	113,0	124,0	137,0	153,0	173,0	198,5	233	284	14,7			
Двуокись углерода	216,5	59,5	65,2	72,1	80,6	91,5	106,0	125	153,5	9,4			
Метан	190,6	24,0	26,7	30,0	34,2	39,9	47,7	59,2	77,7	15,6			
Кислород	54,4	21,8	24,0	26,6	29,9	34,1	39,8	48,1	62,7	11,0			
Аргон	83,8	20,3	22,5	25,2	28,6	33,1	39,2	48,2	62,5	9,9			
Азот	77,4	18,1	20,0	22,3	25,2	29,0	34,1	41,7	54,0	11,8			
Неон	24,5	5,50	6,11	6,88	7,87	9,19	11,0	13,8	18,4	13,9			
Водород	20,4	14,0	3,01	3,45	4,03	4,84	6,05	8,03	11,7	44,1			
Гелий	4,2	0,23	0,27	0,32	0,39	0,49	0,65	0,98	1,27	31,2			

мых с помощью жидкого гелия, не конденсируется лишь гелий. Получить сверхвысокий вакуум при конденсационной откачке гелия, можно лишь охлаждая конденсирующую поверхность до сверхнизких температур (ниже 0,4 К).

Интенсивность процесса вымораживания определяется количеством молекул N , падающих на конденсирующую поверхность в единицу времени, и коэффициентом прилипания (конденсации) η . Коэффициент прилипания выражается как отношение числа молекул, оставшихся на поверхности неопределенно долгое время, к общему числу молекул, попавших на эту поверхность.

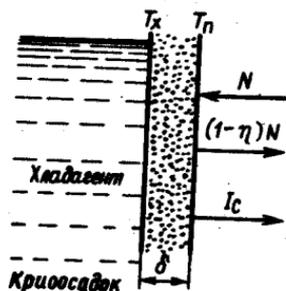


Рис. 1. Схема процесса конденсационной откачки

Если параметры откачиваемого газа задаются однозначно равновесной функцией распределения Максвелла (пространство изотропно), интенсивность вымораживания или, другими словами, удельная быстрота конденсационной откачки в свободно-молекулярном режиме течения газа будет определяться выражением

$$s = \frac{1}{4} \eta \bar{w} = 3,64 \eta \sqrt{\frac{T_p}{M}}, \quad (1)$$

где $\bar{w} = \sqrt{\frac{8RT_p}{\pi M}}$ — средняя арифметическая скорость молекул; R — газовая постоянная; T_p и M — температура и относительная молекулярная масса газа.

При $\eta = 1$ величина $s = s_0$ определяет максимально возможное число молекул, которое может откачать в единицу времени данная единичная поверхность.

Наряду с потоком отраженных от конденсирующей поверхности молекул $(1 - \eta) N$ всегда существует сублимационный поток I_c , также приводящий к снижению быстроты откачки (рис. 1). Так как I_c определяется температурой на поверхности криосадка и природой газа, то его влияние может быть учтено в выражении для удельной быстроты откачки.

$$s = \eta s_0 \left(1 - \frac{p_1}{p}\right), \quad (2)$$

где p — рабочее давление газа.

Равновесное предельное давление в вакуумной системе

$$p_1 = p_n \sqrt{\frac{T_r}{T_n}}, \quad (3)$$

где p_n — давление насыщенных паров при температуре конденсирующей поверхности T_n .

Выражения (2), (3) верны, если наличие конденсирующей поверхности не вносит существенных изменений в изотропное распределение газа внутри вакуумной системы.

Очевидно, что полная быстрота откачки конденсационного насоса

$$S = sA = \eta s_0 \left(1 - \frac{p_1}{p}\right) A, \quad (4)$$

где A — площадь конденсирующей поверхности.

Одним из существенных параметров всех типов насосов поверхностного действия является коэффициент прилипания. Если газ откачивается чистой конденсирующей поверхностью, то в первоначальной стадии идет процесс адсорбции, и откачка характеризуется коэффициентом прилипания этого процесса. Когда же толщина слоя откачанного газа превысит несколько монослоев, откачка будет характеризоваться коэффициентом конденсации.

До сих пор нет полной ясности в вопросе о коэффициенте прилипания. Наиболее убедительным решением вопроса о захвате молекул представляется решение, в котором принимается, что коэффициент прилипания в самоадсорбции, т.е. при конденсации вещества на своей собственной решетке, равен единице. Захват падающего атома с такой же массой и силовой постоянной, как и у решетки, происходит, если кинетическая энергия движения атомов меньше некоторого критического значения энергии, превосходящего примерно в 25 раз энергию связи частицы в кристаллической решетке поверхностного слоя. Заметное отличие коэффициента конденсации от единицы, по мнению авторов [10], может быть связано с наличием дефектов в поверхностном слое, приводящих к рассеянию решеточных волн и, в конечном счете, к уменьшению коэффициента конденсации. Таким образом, структура криоосадка и примеси в нем играют важную роль в процессе конденсации, оказывая существенное влияние как на коэффициент конденсации, так и на плотность и теплопроводность слоя конденсата.

Одной из главных характеристик вакуумного насоса является ресурс его работы. Ресурс работы конденсационного насоса

будет определяться допустимой толщиной криосадка (если, разумеется, обеспечено постоянное наличие хладагента). Существование градиента температуры по толщине сконденсированного слоя может привести к тому, что температура наружной поверхности слоя T_n повысится настолько, что значение давления насыщенных паров превысит допустимое значение рабочего давления. Выражение для толщины слоя конденсата выглядит так:

$$\delta = \frac{\bar{k} (T_n - T_x)}{q_{\text{конд}} + q_{\text{изл}}}, \quad (5)$$

где \bar{k} — усредненный коэффициент теплопроводности криосадка; T_x — температура хладагента в насосе; $q_{\text{конд}}$ — удельный поток тепла на конденсирующую поверхность за счет конденсации газового потока; $q_{\text{изл}}$ — удельная тепловая мощность, выделяющаяся в слое за счет теплового излучения окружающих поверхностей.

Допустимое значение температуры поверхности слоя $T_n \text{ max}$ определяется из тех соображений, что предельное равновесное давление в системе после прекращения подачи газа должно быть, по крайней мере, на порядок меньше рабочего давления. Тогда, как видно из формулы (4), рабочий газ будет откачиваться с быстротой не более чем на 10% отличающейся от максимально возможной в данных условиях. Ниже проведен оценочный расчет ресурса работы конденсационного насоса ($T_x = 20,4 \text{ K}$), откачивающего азот в области высокого вакуума.

Примем, что теплопритоки к конденсирующей поверхности за счет конденсации азота и теплоизлучения окружающих поверхностей равны. От теплового излучения стенок, имеющих комнатную температуру, конденсирующая поверхность закрыта оптически плотным экраном, температура которого $T_{\text{э}} = 78 \text{ K}$. Тогда по формуле Стефана-Больцмана можно вычислить удельную тепловую мощность, поглощаемую конденсирующей поверхностью

$$q_{\text{изл}} = Q_{\text{изл}}/A = 5,67 \cdot 10^{-12} E (T_{\text{э}}^4 - T_n^4) \approx 2 \cdot 10^{-6} \text{ Вт/см}^2, \quad (6)$$

если приведенная степень черноты системы конденсирующая поверхность — экран $E \approx 10^2$ (для этого нужно иметь хорошо полированную поверхность конденсационного насоса из чистого металла).

Можно показать, что удельный теплоприток из-за конденсации откачиваемого азота (за счет охлаждения от 78 К и отвердевания)

$$q_{\text{конд}} = Q_{\text{конд}}/A \approx 2,9 \text{ р Вт/см}^2, \quad (7)$$

где p - рабочее давление в мм рт.ст.

Приравнявая формулы (6) и (7), получим $p \approx 10^{-6}$ мм рт.ст. Таким образом, $q_{\text{изл}}$ будет преобладающим при $p < 10^{-6}$ мм рт.ст.

Для эффективной работы насоса необходимо, чтобы $p_{\text{п}}$ было не больше чем 10^{-1} р. Пусть давление насыщенных паров азота $p_{\text{п}} = 10^{-7}$ мм рт.ст., тогда по табл. 1 находим, что $T_{\text{п}} = 25,2$ К. Поэтому $T_{\text{п}} - T_{\text{х}} \approx 5$ К. Из литературных данных известен коэффициент теплопроводности твердого азота $\bar{\kappa} = 3 \cdot 10^{-3}$ Вт/см К. Подставляя все полученные числовые данные в формулу (5), получим $\delta = 4 \cdot 10^3$ см, т.е. при выбранных условиях слой конденсата может практически безгранично возрастать без заметного перегрева его поверхности.

При давлении 10^{-6} мм рт.ст. один монослой газа на поверхности образуется примерно за 1 с, следовательно, время работы рассмотренного гипотетического насоса приблизительно 10^3 лет. Таким образом, в области высокого вакуума ресурс работы конденсационного насоса весьма велик. На практике толщина сконденсированного слоя составляет приблизительно 1 см, а значит ресурс работы насоса равен нескольким месяцам при давлении приблизительно 10^{-6} мм рт.ст.

От рассмотренного насоса реальный насос отличается еще и тем, что слой сконденсированного газа увеличивает поглощательную способность теплового излучения, что может привести к большому увеличению E.

При $E = 1$, как нетрудно показать, $q_{\text{изл}}$ становится преобладающим вплоть до давления, равных приблизительно 10^{-4} мм рт.ст., что приводит к большому расходу хладагента в насосе даже при идеальной защите конденсирующей поверхности экраном, температура которого $T_2 = 78$ К.

Попадание же тепловых лучей от поверхностей, имеющих комнатную температуру, может увеличить $q_{\text{изл}}$ до $4 \cdot 10^2$ Вт/см². Отсюда становится ясной важность данных о поглощении тепловых лучей слоями конденсатов различных газов.

До сих пор шла речь о конденсационной откачке в молекулярном режиме течения газа. В переходном и особенно в вяз-

костном режимах течения, когда откачиваются большие количества газа, необходимо учитывать некоторое повышение удельной быстроты откачки и резкое уменьшение коэффициента конденсации из-за возрастания температуры поверхности криослоя.

Из газокинетической теории следует, что максимальная удельная быстрота откачки в вязкостном режиме выражается уравнением

$$s_{\text{вязк}} = b \frac{\gamma+1}{2\gamma} w_{3b} = b \frac{\gamma+1}{2\gamma} \sqrt{\frac{\gamma RT_{\Gamma}}{M}}, \quad (8)$$

где $\gamma = \frac{c_p}{c_v}$ - отношение удельных теплоемкостей газа, а

$$b = \left(\frac{2}{\gamma+1} \right)^{\frac{\gamma}{\gamma+1}} = \frac{P_{\text{кр}}}{P_{\text{рец}}}, \quad (9)$$

где $P_{\text{кр}}$ - критическое давление у конденсирующей поверхности, при котором достигается звуковая скорость газового потока; $P_{\text{рец}}$ - давление газа в реципиенте.

В табл. 2 приведены значения отношения удельной быстроты откачки в вязкостном режиме $s_0^{\text{вязк}}$ к удельной быстроте откачки в молекулярном режиме $s_0^{\text{мол}}$ для аргона, азота и паров воды одно-, двух и трехатомного газа, а также значения $s_0^{\text{вязк}}$ при $T_{\Gamma} = 293 \text{ К}$.

Таблица 2

Газ	Аргон	Азот	Пары воды
γ	1,67	1,40	1,33
b	0,484	0,526	0,540
$s_0^{\text{вязк}}/s_0^{\text{мол}}$	1,81	1,71	1,69
$s_0^{\text{вязк}}$	17,9	20,1	24,8

Удельная быстрота откачки конденсирующей поверхности в вязкостном режиме может быть на 70–80% больше, чем в молекулярном режиме, причем, как уже говорилось, для достижения максимальной быстроты откачки в молекулярном режиме коэффициент конденсации ζ должен быть равен единице, а в вязкостном режиме достаточно, чтобы $\zeta \approx 0,5$. Действительно, так как $\zeta \approx 0,5$, то $P_{\text{кр}}$ должно быть приблизительно равно $0,5 P_{\text{рец}}$, а для этого достаточно, чтобы приблизительно половина молекул была захвачена конденсирующей поверхностью.

Однако долгое время сохранить быстроту откачки в вязкостном режиме на максимальном уровне невозможно, так как при работе в этом режиме довольно быстро растет толщина слоя сконденсированного газа, который при этом содержит значительное число дефектов кристаллической решетки, а стало быть обладает малым коэффициентом конденсации. Возрастает также температура поверхности слоя, и если она превысит T_{nmax} , то начнется падение быстроты откачки, определяемое уравнением (2). Увеличение градиента температуры между поверхностью криослоя и хладагентом в насосе связано не только с тем, что приходится отводить значительную теплоту конденсации газа через увеличенную толщину слоя с ухудшенной из-за дефектов теплопроводностью, но и с добавлением тепла из-за эффектов теплопроводности и конвекции остаточного газа в реципиенте. Повышенная тепловая нагрузка на криогенную поверхность может привести к существенному ухудшению теплообмена между стенкой насоса и хладагентом (например, к переходу от пузырькового к пленочному типу кипения криожидкости). Для того чтобы не возникали слишком большие перепады температур, процесс теплообмена приходится интенсифицировать.

Экспериментальные исследования конденсационной откачки

В настоящее время получение низких температур не составляет особой проблемы. Возможно достижение температур вплоть до 10^{-3} К в экспериментальных приборах. Это означает, что поскольку давление насыщенных паров веществ экспоненциально уменьшается с понижением температуры, то при сверхнизких температурах в принципе могут быть достигнуты сколь угодно малые давления всех веществ, включая изотопы гелия. При конденсационной откачке гелия абсолютным конденсационным насосом с $T_n = 0,24$ К получены давления, приблизительно равные 10^{-12} мм рт. ст. при откачке водорода в камере, погруженной в жидкий гелий, понижение температуры ниже 2,4 К приводило к достижению неизмеримо малых давлений. Минимальное зарегистрированное давление составило $8 \cdot 10^{-15}$ мм рт. ст. Для всех остальных веществ даже при $T_n = 4,2$ К уже достигаются неизмеримо малые давления. Так, давление насыщенных паров неона при этой температуре приблизительно равно 10^{-20} мм рт. ст., азота — 10^{-70} мм рт. ст.

Неконденсируемый гелий при работе гелиевого конденсационного насоса или неконденсируемые неон, водород и гелий при работе водородного конденсационного насоса устраняют вспомогательные насосы. Ранее, как правило, для этой цели применяли диффузионные насосы, в настоящее время применяют более чистые средства откачки — магниторазрядные (для откачки сравнительно небольших количеств неконденсируемых газов) или криосорбционные насосы.

Если при работе конденсационного насоса в области молекулярного режима течения газа неконденсируемые примеси влияют только на величину предельного вакуума, то при вязкостном режиме присутствие неконденсируемых примесей вблизи конденсирующей поверхности может затруднить доступ к ней конденсируемых газов и снизить интенсивность процесса откачки.

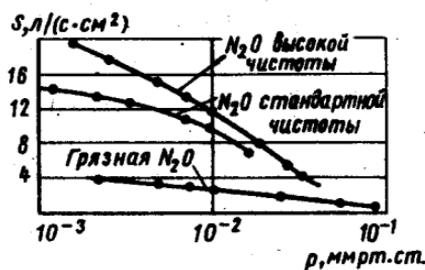


Рис. 2. Влияние примесей на конденсационную откачку азота

На рис. 2 показано влияние примесей на конденсационную откачку азота. Данные взяты из работы Даусона и Хейгуда, опубликованной в 1965 г.

Процесс достижения предельного вакуума конденсационным насосом после откачки больших количеств газа существенно зависит от явления переконденсации (перекачки). Если конструкция конденсационного насоса такова, что откачиваемый газ конденсируется не только на участках поверхности с самой низкой температурой T_{min} , но и на участках с несколько более высокой T , то после прекращения подачи газ, сконденсировавшийся на участках с T , будет перекачиваться на поверхность с T_{min} . Этот процесс может сказаться весьма длительным особенно в области сверхвысокого вакуума [9], и в конструкции конденсационного насоса, работающего в этой области, должны быть предусмотрены меры борьбы с явлением переконденсации.

Знание точной величины конденсирующей поверхности особенно необходимо при экспериментальном определении коэффициен-

та конденсации. Большой разброс величин коэффициентов конденсации для разных веществ (0,4–1,0), приводимых в литературе до последнего времени, на наш взгляд, связан с экспериментальными погрешностями, в частности, из-за явления переконденсации. В тех работах, где проявляют достаточное внимание к методике получения и к обработке экспериментальных данных, получают значения коэффициентов конденсации, весьма близкие к единице. Так, в работе Хэбитса и других, опубликованной в 1975 г., получены коэффициенты конденсации азота ($T_n = 16$ К, $T_r = 380$ К) не меньше, чем 0,995.

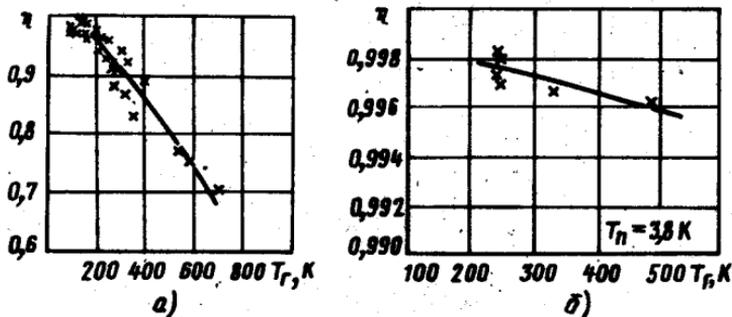


Рис. 3. Зависимость коэффициента конденсации от температуры откачиваемого газа: а - водорода; б - неона.

Зависимость коэффициента конденсации от температуры откачиваемого газа при гелиевой температуре конденсирующей поверхности представлена на рис. 3. Заметное уменьшение коэффициента конденсации водорода начинается при температуре больше 200 К, а коэффициент конденсации неона практически не меняется вплоть до температур 500 К. Эти данные взяты из работы Чабба, опубликованной в 1966 г. В работе Брауна и других (1970) показано, что коэффициенты конденсации CO_2 , N_2 и Ar остаются близкими к единице до температур откачиваемых газов 1400 К.

По вопросу о коэффициенте захвата откачного устройства с конденсационным насосом и об оптимальной экранировке конденсирующей поверхности существует довольно много работ. Пропускную способность экранов рассчитывают методом статистических испытаний (Монте-Карло), методом алгебры лучистых потоков, методом графов и т.д.

Для правильной оценки ресурса работы конденсационного насоса необходимо знать, как влияет рост толщины криослоя на

поглощательную способность теплового излучения. В табл. 3. приведены значения толщины криослоев различных веществ, примерно на порядок величины увеличивающих первоначальную поглотительную способность конденсирующей поверхности α_0 (обычно $\alpha_0 = 0,02-0,03$) при облучении ее черным телом, имеющим комнатную температуру (инфракрасное излучение с $\lambda_{\text{max}}=10$ мкм).

Максимально "чернит" конденсирующую поверхность вода.

В отличие от данных, полученных в 1962 г. американским исследователем Муром, слои азота оказались прозрачными к инфракрасному излучению [9]. Наименьшей поглотительной способностью обладают слои аргона, как и следует из теории поглощения инфракрасного излучения. Заметно черными оказались слои сконденсированного водорода.

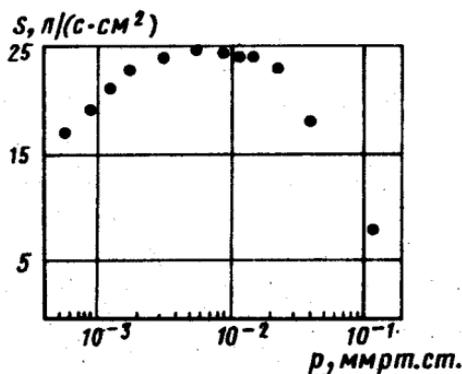
Конденсационная откачка водорода имеет ряд особенностей по сравнению с откачкой других газов. В работе Чабба в 1966 г. было показано, что при откачке больших количеств водорода поверхностью гелиевого конденсационного насоса трудно получить вакуум выше чем 10^{-9} мм рт.ст. даже при температуре конденсирующей поверхности 2,3 К (давление насыщенных паров водорода при этой температуре 10^{-15} мм рт.ст.). В некоторых работах этот предел был снижен до 10^{-10} мм рт.ст., а затем в 1972-1973 гг. в ЦЕРНе и Калэме (Англия) при тщательной экранировке конденсирующей поверхности азотными экранами и выборе соответствующих материалов подложки были получены давления $10^{-13} - 10^{-14}$ мм рт.ст. Впрочем, уже говорилось, что в камере с водородом, погруженной в жидкий гелий, т.е. идеально заэкранированной от внешних источников теплового излучения, был зарегистрирован вакуум приблизительно 10^{-15} мм рт.ст. Таким образом, было выяснено, что действительно большую роль играет экранировка от теплового излучения. В последнее время проведены оценки влияния теплового сопротивления границы "криослой - стенка насоса",

Таблица 3

Вещество	Вода	Двуокись углерода	Водород	Азот	Аргон
Толщина криослоя, мм	0,005	0,11	0,74	10	100

которые не исключают возможности влияния этого теплосопротивления на градиент температуры между твердым слоем водорода и жидким гелием в насосе. Существенно также влияние эффекта переконденсации на достижение предельного вакуума гелиевым конденсационным насосом при откачке водорода в сверхвысоковакуумной области.

Экспериментальные исследования конденсационной откачки в форвакуумной области давлений проводятся давно, однако систематических полных данных, характеризующих такую откачку, нет до сих пор. В [12] приводится библиография зарубежных, а в [15] отечественных работ по форвакуумной конденсационной откачке, опубликованных к 70-м годам. В ряде работ показана возможность конденсационной откачки от атмосферного давления. Для получения давлений в несколько десятков мм рт.ст. применяется в качестве хладагента азот, температура которого понижена путем откачки паров механически.



при повышении давления авторы связывают с уменьшением коэффициента конденсации при росте T_{II} .

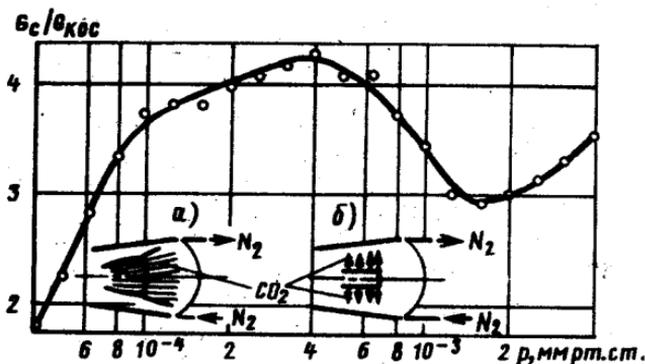


Рис. 5. Влияние направленности струи на конденсацию двуокиси углерода:
 G_c - массовый расход CO_2 при подаче через сопло (а); G - массовый расход CO_2 при напуске через малые отверстия (б)

Довольно часто конденсационная откачка применяется в газодинамических установках, где существует направленный поток газа. Если для изотропного случая объем газа, падающий на единицу поверхности в единицу времени, равен $G_0 = \bar{w}/4$, то на поверхность, находящуюся на пути сверхзвуковой струи, будет попадать объем, равный $G = w_{max}$, где w_{max} - максимальная скорость истечения струи в вакуум. Влияние направленности потока газа на его конденсацию можно продемонстрировать с помощью рис. 5. Здесь приведена зависимость отношения массовых расходов двуокиси углерода к давлению при подаче газа через сопло и через множество отверстий. Откачка производилась азотным конденсационным насосом. При увеличении давления приблизительно от $4 \cdot 10^{-5}$ мм рт.ст. происходит формирование струи в схеме с соплом, что приводит к возрастанию отношения G_c/G . При давлении около $5 \cdot 10^{-3}$ мм рт.ст. тепловая нагрузка на конденсирующую поверхность возрастает настолько, что заметно увеличивается встречный сублимационный поток и снижается эффект направленности.

Типы конденсационных насосов

Наливные конденсационные насосы явились первыми в ряду криогенных насосов в связи с простотой их конструкции. Клас-

сическая схема установки с конденсационными насосами (рис. 6) была использована для получения сверхвысокого вакуума внутри объема, защищенного от непрогрываемых стенок камеры азотным и водородным экранами. Чаще в аналогичных системах

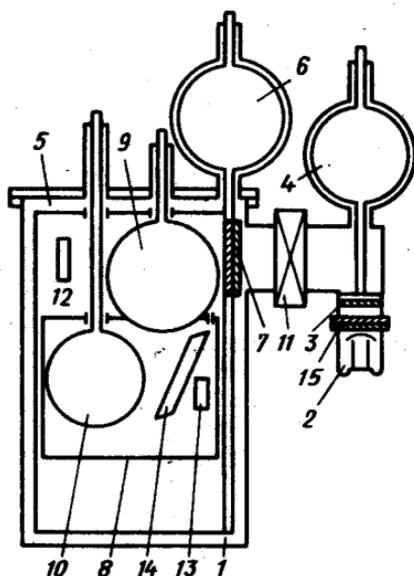


Рис. 6. Схема установки с конденсационными насосами; 1 - корпус; 2 - диффузионный насос; 3, 7, 15 - шевронные экраны; 4, 6 - сосуды с жидким азотом; 5 - азотный экран; 8 - водородный экран; 9 - сосуд с жидким водородом; 10 - сосуд с жидким гелием; 11 - клапан; 12, 13 - манометры; 14 - тепловой экран

применяют только азотные экраны. В дальнейшем было показано, что в прогреваемой вакуумной системе допустимо применение конденсационных насосов без экрана. Так, в установке "Град" [13] в неэкранированном гелиевом конденсационном насосе был достигнут расход жидкого гелия всего около 0,5 л/ч, что позволило работать после однократного залива гелия в течение 8 ч (с жидким водородом несколько суток). При быстроте откачки конденсационного насоса $\geq 10^4$ л/с в реципиенте, имеющем комнатную температуру стенок, объемом 100 л достигнут вакуум $10^{-13} - 10^{-14}$ мм рт.ст.

Новый тип заливного конденсационного насоса (рис. 7) - насос, в котором наряду с режимом уменьшением расхода жидкого гелия предприняты меры борьбы с переконденсацией [9]. Насосы такого типа позволяют работать без дополнительных

заливов жидкого гелия в течение длительного времени (более месяца при запасе жидкого гелия несколько литров) в области высокого и сверхвысокого вакуума. Откачивающий элемент насоса состоит из гелиевого сосуда 3 и азотного экрана 2 с шевроном 5. В межстенное пространство между гелиевым и азотным сосудом молекулы откачиваемого газа могут попасть только через лабиринт, образованный диафрагмой 4 азотного экрана и выступом гелиевого сосуда. Поскольку коэффициент конденсации близок к единице, то молекулы газа попадают практически только на дно гелиевого сосуда. В верхней части насоса герметичная мембрана 6 также не позволяет газу попасть на поверхности конденсационного насоса, имеющие переменную температуру. Таким образом, в данной конструкции насоса исключена переконденсация. В результате после снятия

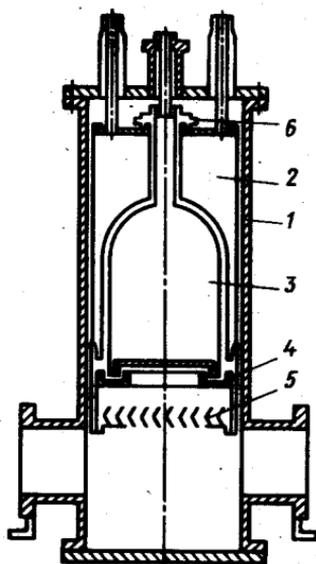


рис. 7. Гелиевый конденсационный насос с малым расходом хладагентов:
 1 - корпус; 2 - азотный экран; 3 - гелиевый сосуд; 4 - диафрагма; 5 - шеврон; 6 - мембрана - тепловой мост

большой газовой нагрузки предельный вакуум насосов такого типа достигается практически без временной задержки. Принятие мер борьбы с переконденсацией одновременно ведет к снижению расхода жидкого гелия в насосе, так как за счет роста криослоя "чернится" лишь небольшая доля поверхности гелиевого сосуда. Поверхности гелиевого сосуда и азотного экрана тщательно отполированы, шеврон почернен.

В настоящее время созданы и испытаны заливные насосы с расходом жидкого гелия приблизительно $10 \text{ см}^3/\text{ч}$ (расход жидкого азота несколько л/сут) на скорости откачки $10^2 - 10^4 \text{ л/с}$. Реально создание насоса на 10^5 л/с .

Недостаток заливных насосов – малый удельный теплосъем в условиях кипения криожидкости в большом объеме. Проточные конденсационные насосы не имеют этого недостатка. Наибольшее распространение они получили в космических имитаторах и газодинамических установках низкой плотности (рис. 8)

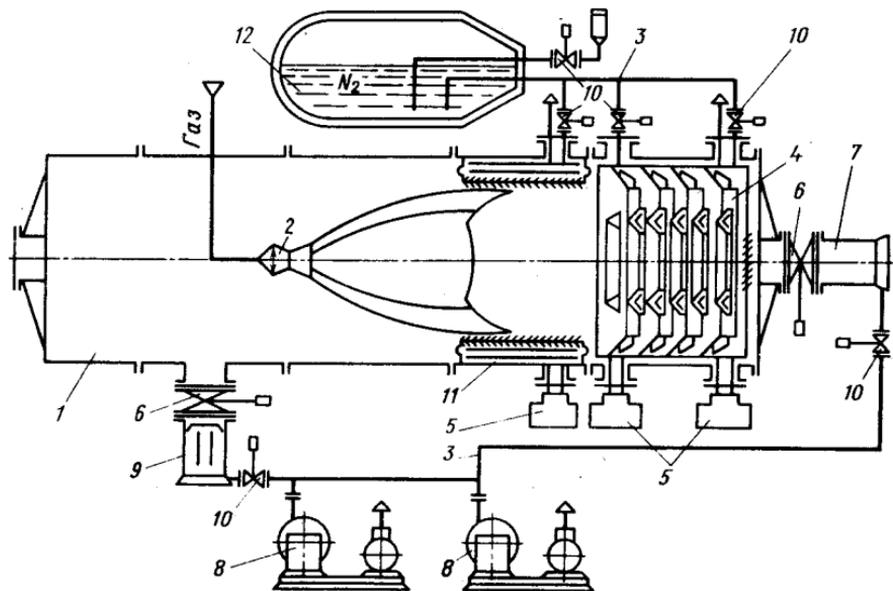


Рис. 8, Вакуумная газодинамическая установка с комбинированной откачкой:

- 1 - вакуумная камера; 2 - сопло; 3 - магистраль; 4 - криогенный насос; 5 - гелиевые холодильные установки; 6, 10 - клапаны; 7 - бустерный насос; 8 - форвакуумные насосы; 9 - высоковакуумный агрегат; 11 - вспомогательный криогенный насос; 12 - танк для жидкого азота

при использовании газовых рефрижераторных холодильных систем. Конденсирующие поверхности в этом случае – криопанели, охлаждаемые газообразным гелием. Экраны охлаждаются жидким азотом.

Поскольку мощность, переносимая газовым потоком в газодинамических установках, достигает иногда десятков киловатт, большое внимание приходится уделять вопросам экономичности работы.

Были созданы также высоковакуумные конденсационные насосы с автономными охладителями водорода [2] и гелия [1]. На рис. 9 представлена схема водородного конденсационного насоса с быстротой откачки по воздуху 10^5 л/с. Очевидно, что при работе конденсационных насосов в области высокого и особенно сверхвысокого вакуума затраты холода на конденсацию газа невелики. Рассмотрим конденсационную откачку азота. Можно показать, что для охлаждения азота от 78 К до тройной точки, а затем его перевода в твердое состояние и дальнейшего охлаждения до температуры хладагента, от конденсирующей поверхности необходимо отводить тепловую мощность $Q_{\text{конд}} \approx 0,5pS$ (Вт), где p – рабочее давление, (мм рт.ст.); S – быстрота откачки конденсационного насоса (л/с). Отсюда видно, что например, для работы насоса с $S = 10^6$ л/с при $p = 10^{-6}$ мм рт.ст. необходима мощность по холоду лишь 0,5 Вт. Из-за непроизводительных потерь холода на преодоление теплопритоков за счет излучения, по деталям конструкций и так далее в криогенераторе (охладителе, рефрижераторе, газовой холодильной машине), в насосе и при подаче хладагента в насос реальная мощность

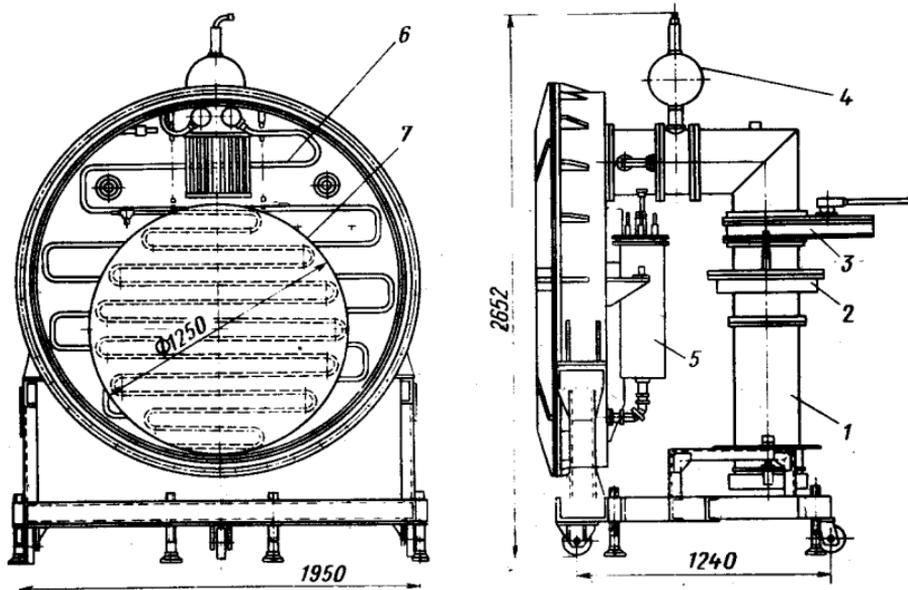


Рис. 9. Водородный конденсационный насос с быстротой откачки 10^5 л/с:

1 – вспомогательный диффузионный насос; 2, 4 – азотные ловушки; 3 – клапан; 5 – сжигатель водорода; 6 – змеевик; 7 – конденсирующая поверхность

требуется существенно большая. Эти потери холода уменьшаются, когда хладагент производится как можно ближе к насосу, — случай уже упомянутых насосов с автономными ожижителями или насосов с малыми газовыми холодильными машинами (ГХМ). Насосы на основе ГХМ получают в последние годы все большее развитие как за рубежом, так и у нас в стране. В [11] описан насос с быстротой откачки в молекулярном режиме примерно 10^3 л/с, в вязкостном режиме примерно $\sim 10^2$ л/с. Снабжавшая его холодом ГХМ обеспечивала мощность 4 Вт на уровне 25 К и примерно 10 Вт при 100 К, что позволяло эксплуатировать насос при $p = 1 \cdot 10^{-7}$ мм рт. ст. более 10 ч (толщина слоя твердого азота или аргона составляла около 3 см). Основными параметрами проточных конденсационных насосов (в том числе насосов с автономными криогенераторами), которые предстоит улучшить, являются надежность работы и срок службы без ремонта.

Сравнение вакуумных насосов с идеальным средством откачки

Очевидно, что идеальным средством получения вакуума можно назвать устройство, позволяющее достигать сколь угодно высокий вакуум, обеспечивающее сверхчистые вакуумные условия в любой области вакуума, обеспечивающее максимальную быстроту откачки при минимальных размерах насоса, удобное в эксплуатации, простое в изготовлении, экономичное.

В табл. 4 знаками "+" и "-" обозначено соответственно наличие или отсутствие у насоса данного типа качества, присущего гипотетическому идеальному насосу. Знаком "+" обозначено наличие данного качества в некоторых случаях. Знаком "Ti" (титан) условно обозначены магниторазрядные, геттерно-ионные и электродуговые насосы. Под p_{min} понимается способность насоса достигать вакуума, сравнительно легко измеримого современными средствами, т.е. примерно равного 10^{-15} мм рт.ст. В редких случаях такой вакуум достигается при применении диффузионных насосов с ловушками и "Ti" — насосов. Сверхчистые условия возможно будут достигнуты и с помощью турбомолекулярных насосов с электромагнитной подвеской ротора. Знак "+" для криогенных сорбционных насосов обозначает, что при применении сыпучих адсорбентов возможно наличие пыли в вакуумной камере. Под "комфортом" пони-

Таблица 4

Качество идеального насоса	Тип насоса				
	механичес- кий (ТМН)	диффузион- ный	T_i	криогенный	
				сорбци- онный	конден- сацион- ный
P_{min}	-	+	+	+	+
Возможность получения сверхчистых условий	+	-	-	+	+
S_{max}	-	-	-	-	+
"Комфорт"	-	-	+	+	+
Σ_{min}	+	+	+	+	+

мается возможность изготовления насоса любой формы и, главным образом, возможность использования насоса как "сторожа" — без подвода электроэнергии и воды. Вопрос о минимуме средств на изготовление или эксплуатацию того или иного насоса, пожалуй, наиболее сложен при столь кратком рассмотрении, так как зависит от многих факторов, в частности от области вакуума, в которой должны применять насосы, от конструкции того или иного типа насоса и т.д. В [15] показано, что удельные энергетические затраты в высоковакуумной области минимальны для конденсационных насосов. Поскольку криогенные сорбционные насосы могут работать на более высоком температурном уровне, по-видимому, в дальнейшем именно эти насосы должны оказаться наиболее экономичными.

При рассмотрении различных типов насосов видно, что наиболее полно требованиям к идеальному откачному устройству отвечают криогенные насосы. Этот вывод подтвержден практикой: самый высокий вакуум получен с помощью криогенных насосов, только криогенные насосы дали возможность получить быстроту откачки $10^6 - 10^7$ л/с и обеспечить получение сверхчистых вакуумных условий во всей области вакуума.

Вопросы для самопроверки

1. Перечислите основные преимущества и недостатки криогенных насосов.

2. Дайте определения коэффициентов прилипания и захвата.
3. Расскажите о влиянии природы откачиваемого газа на быстроту откачки насоса.
4. Какие свойства поверхности являются определяющими при рассмотрении процесса вымораживания газов на поверхности?
5. Расскажите о влиянии межмолекулярного взаимодействия газов на быстроту откачки насоса.
6. В чем общность конденсационных и адсорбционных методов откачки газов?
7. Что ограничивает продолжительность непрерывной работы конденсационного насоса?
8. Перечислите преимущества и недостатки проточных криогенных насосов.
9. Как Вы оцениваете перспективы применения криогенных насосов в народном хозяйстве страны?

2. АДСОРБЦИОННЫЕ НАСОСЫ

Типы адсорбентов

Принцип действия адсорбционных насосов основан на поглощении газов твердыми телами с развитой поверхностью — адсорбентами. Это поглощение вызывается силами взаимодействия молекул с поверхностью твердого тела. Относительная роль различных эффектов, вызывающих адсорбцию, показана в табл. 5. Чисто электростатические силы характерны для молекул с постоянным дипольным моментом (ориентационный эффект) или с наведенным дипольным моментом (индукционный эффект). Дисперсионные силы взаимодействия определяются изменениями плотности электронного облака, которые при совпадении по фазе приводят к возникновению мгновенных диполей. Дисперсионные силы — наиболее универсальные и проявляются в любых молекулах, даже неполярных.

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

Гетерополярные адсорбенты характеризуются наличием катионов и анионов, поэтому их поглощающие свойства определяются, в основном, электростатическими силами. Этот тип адсорбентов имеет большее сродство к полярным молекулам (NH_3 , H_2O , H_2S , SO_2 и т.д.), чем к неполярным (O_2 , CH_4 , Ar и т.д.). Примером гетерополярных адсорбентов являются при-

родные и искусственные цеолиты, характеристики которых приведены в табл. 6. Они представляют собой семейство алюмосиликатов, имеющих структурную формулу



где RO — окисел какого-либо металла; n — число молекул кристаллизационной воды; \times — мольное соотношение



Таблица 5

Вещество	Эффект, %		
	ориентационный	индукционный	дисперсионный
Окись углерода	0	0	100
Иодистый водород	0,1	0,4	99,5
Бромистый водород	3,3	2,2	94,5
Хлористый водород	14,4	4,2	81,4
Аммиак	44,6	5,4	50
Вода	77	4	19
Этиловый спирт	55	12,6	32,4

Таблица 6

Характеристика	Тип цеолитов				
	KA	NaA	CaA	CaX	NaX
Диаметр пор, Å	3,8	4	5	9	10
Удельная поверхность, м ² /г	650-800			1000	
Пористость, %	45			51	
Плотность активизированного цеолита насыщенного водой	г/см ³				
	1,55			1,99	
Насыпная плотность гранул	Ø 3 мм	0,72			
	Ø 1,5 мм	0,688			
	порошка	0,528			

Величина мольного соотношения определяет форму цеолита. При $15 > X > 2$ - цеолиты типа X, Y, а при $X \leq 2$ - типа A. Цеолиты построены из тетраэдров SiO_4 и AlO_4 , сочетание которых образует алюмокремниевый остов решетки цеолита. У цеолитов группы фожазита (их аналогами являются многие синтетические цеолиты), шестичленные кольца тетраэдров образуют кубоктаэдры, имеющие сравнительно большие свободные пространства, которые и определяют характерные размеры полостей цеолита. Кубоктаэдры у этих цеолитов сочленяются между собой четверными (для цеолитов типа A) или шестерными (для цеолитов типа X и Y) кольцами кислородных мостиков. Решетки таких сложных анионных радикалов обладают отрицательным зарядом. Эти заряды компенсируются ионами металлов, расположенными внутри полостей. Внутрикристаллические катионы оказывают существенное влияние на поглощающие свойства пористых кристаллов, их термостабильность и т.д. Катионы, размещенные в каналах, по которым двигаются молекулы газа, могут в значительной степени сужать или расширять конечное сечение этих каналов. Так, например, замена катиона Na на катион Ca изменяет более открытую форму цеолита NaA на менее открытую CaX и, наоборот, такая же замена превращает менее открытую форму цеолита NaA в более открытую - CaA.

В структуре цеолитов различают первичную и вторичную пористость.

Первичная пористость образуется при нагреве цеолита до 450-700 K за счет удаления кристаллизационной воды. Эта пористость может быть представлена в виде сферических полостей, соединяемых между собой узкими парами или окнами. Диаметры первичных пор различных цеолитов находятся в пределах 3,8-10 А.

Вторичная пористость образуется при соединении отдельных кристаллов цеолита, имеющих размеры в несколько микрон, в гранулы при помощи различных связующих добавок. Диаметры вторичных пор цеолитов составляют $(5-10) \cdot 10^3$ А. Доля поверхности вторичных пор мала, поэтому их вклад в процесс поглощения невелик. Они служат только каналами для доступа газа к внутренним полостям адсорбента.

Для цеолитов характерна большая селективность адсорбционных свойств, определяемая малыми размерами окон, сравнимых с кинетическими диаметрами молекул.

В настоящее время синтезирован ряд искусственных цеолитов NaA, CaA, NaX, CaX, AgX, MnX и др., в том числе

специально предназначенных для целей вакуумной техники: СаА-4В и комплексных Na-Ca, цеолитов с малой концентрацией ионов Са (СаЕН-4В) и большой их концентрацией (СаЕ-Т). Цеолиты применяют в виде кристаллических порошков или в виде гранул, таблеток или шариков, состоящих из таких порошков и добавок связующих веществ алюмосиликатной природы (10-15%).

Ковалентные адсорбенты не имеют поверхностных ионов. В этом случае процесс поглощения газов определяется только дисперсионным эффектом и практически не зависит от полярности молекул. Примером ковалентных адсорбентов являются активированные угли. Активированные угли - твердые тела, состоящие из кристаллического углерода. В вакуумной технике обычно используются газовые угли. Их характеристики приведены в табл. 7. В последнее время показана высокая эффективность для целей криовакуумной техники некоторых новых видов активных углей (полимерных углей, углеродного волокна и др.).

Таблица 7

Название углей	Насыпная масса, г/см ³	Объем, см ³ /г			Удельная поверхность переходных пор, м ² /г	Прочность по МИС-3
		микропор	переходных пор	макропор		
Сарановый	0,58	0,56	0,06	0,05	≈ 10	-
СКТ	0,36	0,68	0,17	0,31	-	70
СКТ-2	0,5	0,4	0,11	0,23	≈ 64	90
БАУ	0,26	0,23	0,08	1,19	≈ 57	80
КПД	0,32	0,34	0,15	0,51	-	90

Анионные адсорбенты характеризуются наличием чисто кислородных или содержащих кислород анионных групп. По своим свойствам они занимают промежуточное положение между гетерополярными и ковалентными адсорбентами. Примером анионных адсорбентов являются силикагели. Силикагели - высокомолекулярные твердые кремниевые кислоты, получаемые в процессе конденсации в водном растворе и затем высушиваемые.

В вакуумной технике наибольшее применение нашли тонкопористые силикагели (табл. 8). тонко-

Таблица 8

Образец тонкопористого силикагеля	Насыпная плотность высушенного образца при 150°C, г/см ³	Поверхность одного грамма образца, м ²	Объем пор. одного грамма образца, см ³	Средний радиус пор, А
СШ-1	0,8	590	0,41	≈14
СИЛ № 5	0,68	700	0,55	≈13
СИЛ № 6	0,85	550-750	0,31-0,38	≈12
СШ-5	0,93	540	0,33	≈12
СШ-10	0,77	600	0,48	≈16
СШ-18	0,82	650	0,43	≈13
СШ-19	0,81	790	0,48	≈12

Основные вакуумные характеристики адсорбентов

Для микропористых адсорбентов, применяемых в криовакуумной технике, основная характеристика — адсорбционная емкость. Благодаря перекрытию силовых полей стенок пор, адсорбция газовых молекул осуществляется во всем объеме поры (объемное заполнение). При этом теряет смысл понятие удельная поверхность, которым обычно пользуются для характеристики более широкопористых адсорбентов, адсорбирующих газовые молекулы только на стенках пор.

Явление перекрытия силовых полей в микропорах обеспечивает высокую теплоту адсорбции в них, и следовательно, низкие равновесные давления газа над ними, т.е. возможность получения высокого вакуума. Однако уменьшение размеров входов в поры до размеров близких к кинетическим диаметрам молекул адсорбата снижает вероятность проникновения их в пору. Это сказывается на кинетике адсорбционного процесса (активированная физическая адсорбция). Эффекты активированной физической адсорбции особенно существенны при низких давлениях (когда "работают" наиболее узкие поры с макси-

мальной теплотой адсорбции) и низких температурах (когда особенно существенна кинетика).

Адсорбционная емкость определяет количество газа, поглощаемого единицей веса адсорбента при постоянных температуре и давлении. Она зависит от вида адсорбента и поглощаемого газа, их температур и предьстории адсорбента.

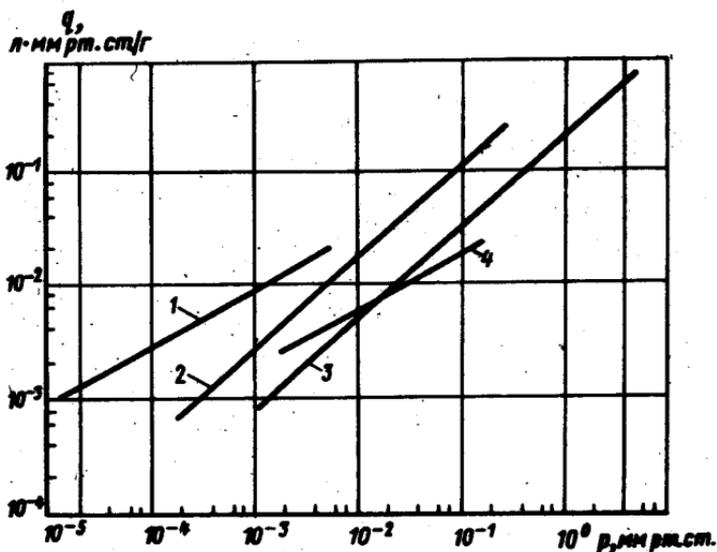


Рис. 10. Изотерма адсорбции воздуха различными посылками при температуре 300 К:
1 - MgX ; 2 - CaA ; 3 - NaX ; 4 - MgX

Зависимость между адсорбционной емкостью и равновесным давлением газа, устанавливающимся над поверхностью адсорбентов при постоянной температуре за достаточно большое время (изотерма адсорбции), является одной из основных характеристик процесса поглощения. Она может быть определена аналитически на основе уравнений, предложенных для различных видов поглощения Дубининым и Радушкевичем, Брунауэром и др. Однако на практике обычно пользуются экспериментальными данными (рис. 10–12).

Изотермы адсорбции позволяют рассчитать предельный вакуум адсорбционных насосов при известной газовой нагрузке, а также критическую величину адсорбционной емкости используемых в них адсорбентов. Последняя величина соответствует выходу на горизонтальный участок изотермы адсорбции и характеризует максимальное количество газа, приходящегося на

единицу веса адсорбента, которое может быть им поглощено при данной температуре.

Влияние температуры на величину адсорбционной емкости адсорбента определяется по изобарам адсорбции, характеризующим процесс поглощения при постоянном равновесном давлении

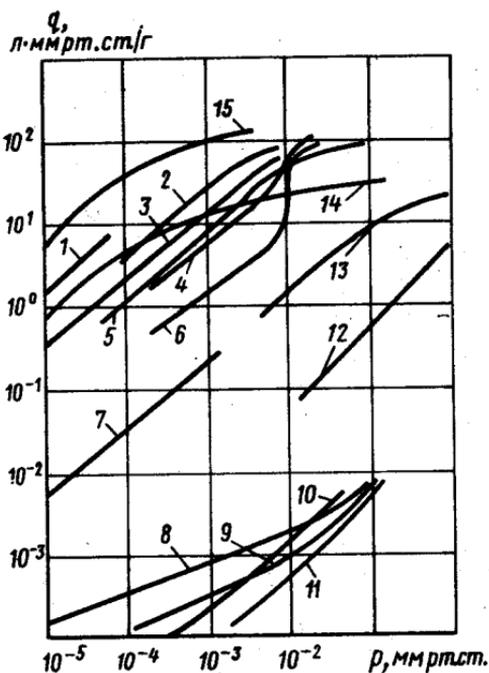


Рис. 11. Изотермы адсорбции газов различными адсорбентами при температуре 77 К (температура регенерации 700 К):

- 1 - ксенона СаА и NaX; 2 - азота СаА и NaX;
- 3 - воздуха углем СКТ-М; 4 - аргона СаА; 5 - воздуха СаА;
- 6 - кислорода СаА; 7 - воздуха углем БАУ; 8 - гелия СаХ; 9 - неона СаХ; 10 - неона СаА;
- 11 - гелия СаА; 12 - водорода NaX; 13 - водорода СаА; 14 - водорода СаЕ-Т; 15 - воздуха СаЕ-Т

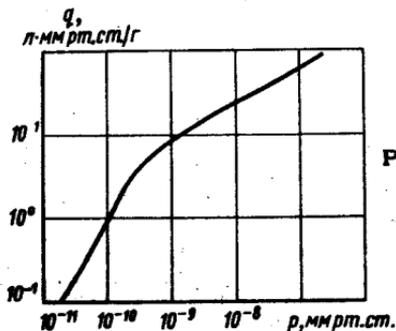


Рис. 12. Изотерма адсорбции гелия цеолитом СаА при температуре 4,2 К

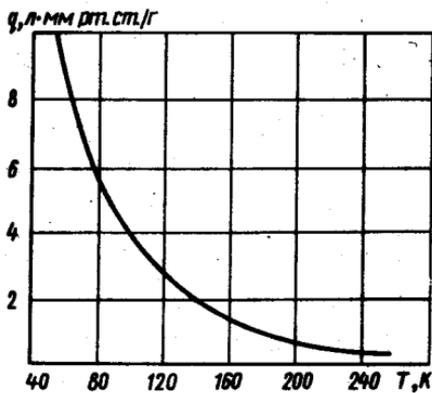


Рис. 13. Изобара адсорбции азота активированным углем при равновесном давлении 10^{-4} мм рт. ст.

(рис. 13). Анализ этой зависимости показывает целесообразность работы адсорбционных насосов при низких температурах. Из-за дешевизны и доступности жидкий азот (температура кипения приблизительно 78 К) обычно выбирают в качестве хладагента в адсорбционных насосах. Однако сравнительно невысокий вакуум, обеспечиваемый насосами с таким охлаждением, заставляет все чаще переходить к жидкому водороду (20,4 К) и жидкому гелию (4,2 К). Иногда используют пары этих жидкостей при промежуточных температурах (8–10 К и 25–50 К).

Применение адсорбентов в вакуумной технике и типы адсорбционных насосов

К конструкциям охлаждаемых адсорбционных насосов предъявляют следующие требования: максимальное использование поглощающих свойств адсорбентов, применяемых в насосе (полный тепловой контакт адсорбента с хладагентом, минимальное вакуумное сопротивление элементов насоса откачиваемому газу и т. д.), возможность периодической регенерации адсорбента после его насыщения; минимальный расход хладагента; наличие аварийного клапана, срабатывающего при повышении давления в насосе, технологичность и простота конструкции насоса.

Форвакуумные адсорбционные насосы обычно выполняются в виде колбы из нержавеющей стали, внутри которой расположен адсорбент (рис. 14).

Колба охлаждается жидким азотом, заливаемым во внешний съемный или стационарный дюар. Адсорбенты, применяемые в вакуумной технике, отличаются малой теплопроводностью порядка $10^{-4} - 10^{-3}$ кал/с·см·град, а эффективный коэффициент теплопроводности адсорбционной полости в условиях вакуума имеет значение еще на два-три порядка ниже. Поэтому, для увеличения скорости охлаждения и для понижения температуры поглощающего слоя в полость с адсорбентом иногда добавляют стружку из материалов с высокой теплопроводностью или используют разделительные медные пластины. Дополнительное повышение теплопроводности может быть достигнуто внедрением в гранулы адсорбентов частиц металлов с высокой теплопроводностью. Иногда применяют откачивающие адсорбционные элементы в виде адсорбционных панелей или других адсорбционных изделий, в которых адсорбент представляет собой более теплопроводную, чем в случае засыпки гранул, конструкцию, допускающую создание хорошего теплового контакта с хладагентом.

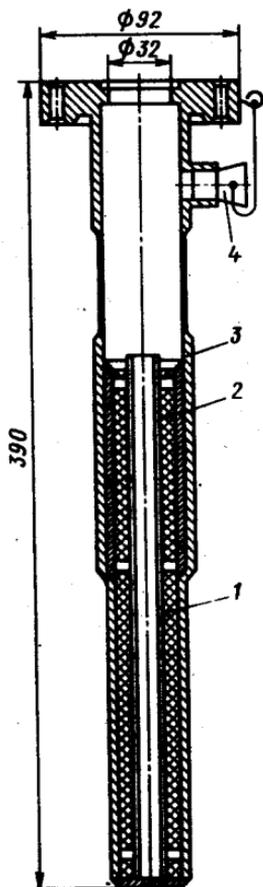


Рис. 14. Адсорбционный насос ЦВН-0,1;
1 - цеолит СаА; 2 - перфорированная трубка; 3 - корпус насоса; 4 - предохранительный клапан

Насосы в процессе регенерации адсорбента обычно прогревают встроенным в корпус или съемным нагревателем. Температура регенерации определяется типом адсорбента и меняется от $300-350^{\circ}\text{C}$ для силикагелей до $400-450^{\circ}\text{C}$ для цеолитов и активированных углей. Цеолит СаЕ-Н регенируется при температуре приблизительно 200°C .

Форвакуумные адсорбционные насосы сравнительно невелики по размерам. В зависимости от типа насоса они вмещают от нескольких сотен грамм до нескольких килограмм адсорбентов. Это позволяет создавать в объемах до нескольких сотен литров разрежение $10^{-1} - 10^{-2}$ мм рт.ст. Для получения более

низкого давления до 10^{-3} - 10^{-4} мм рт.ст. целесообразна последовательная работа двух или более насосов. При этом один из насосов охлаждается и откачивает газ как из объема реципиента, так и из объемов остальных еще не охлажденных насосов. После насыщения первый насос отключается, охлаждается следующий насос и т.д.

Анализ изотерм адсорбции воздуха показывает возможность достижения давления 10^{-5} мм рт.ст. и ниже с помощью только адсорбционных насосов в объемах, откачиваемых от атмосферного давления. Однако практически не удается при этом получить давление ниже 10^{-2} - 10^{-3} мм рт.ст. Это несоответствие между экспериментально полученными изотермами адсорбции воздуха, который представляет собой смесь газов, и практически достигаемым разрежением связано с особенностью измерения изотерм адсорбции. Их изучение обычно начинается с области высокого вакуума путем подачи малых порций исследуемого газа. Парциальные давления слабо поглощаемых адсорбентами компонентов воздуха (H_2 , Ne , He) при этом малы, в то время как при откачке от атмосферного давления они достаточно велики. Поэтому при определении предельно достижимого с помощью адсорбционных насосов разрежения необходимо использовать изотермы адсорбции по отдельным компонентам воздуха, а при использовании изотерм адсорбции воздуха учитывать наличие слабопоглощаемых газов.

Для снижения предельного разрежения адсорбционных насосов (как форвакуумных, так и высоковакуумных), определяемого слабо поглощаемыми газами, могут быть использованы следующие методы:

- применения адсорбентов со специально подобранным распределением пор по размерам, обеспечивающим высокую адсорбционную способность по различным компонентам воздуха (эта же цель может достигаться специальной обработкой адсорбента, например его палладированием для лучшего поглощения водорода);

- применения более низкокипящих хладагентов, вплоть до жидкого гелия;

- использования предварительной продувки вакуумной системы вязкостным потоком какого-либо легкоконденсируемого газа с последующей откачкой его адсорбентом;

- предварительной откачки объемов от атмосферного давления примерно до 1 мм рт.ст. каким-либо другим откачным средством (использование для этой цели водоструйных или

механических насосов позволяет снизить предельное разрежение в объемах, откачиваемых форвакуумными адсорбционными насосами, до 10^{-5} - 10^{-4} мм рт.ст.).

В отличие от форвакуумных, в высоковакуумных адсорбционных насосах (см. рис. 15, а) иногда используют комбинированный состав адсорбентов. Обычно в него входит цеолит, активированный уголь и палладированный силикагель. Выбор состава и соотношение входящих в него адсорбентов зависит от вида газовой нагрузки и определяется по изотермам адсорбции.

Для снижения теплового потока излучения, составляющего заметную долю тепловой нагрузки, в высоковакуумных адсорбционных насосах иногда используют охлаждаемые жалюзийные экраны (см. рис. 15, б), располагаемые во входном сечении насоса. Это позволяет снизить температуру адсорбента, повысив тем самым предельный вакуум насоса, и значительно уменьшить расход хладагента. Кроме того, защитный экран является ловушкой, на которой конденсируются легкокипящие составляющие откачиваемой газовой смеси, сжимая общую газовую нагрузку на адсорбент. Это позволяет значительно увеличить время работы насоса между двумя регенерациями.

Адсорбционные насосы нашли применение в вакуумных системах с повышенными требованиями к чистоте остаточного газа, в частности к наличию углеводородных загрязнений, паров воды, активных высококипящих компонентов воздуха. Простота конструкции, отсутствие электрических и других коммуникаций, почти полное отсутствие необходимости обслуживающего персонала, возможность практически неограниченно развивать откачивающую поверхность и тем достигать предельно высокой скорости откачки - все это делает применение адсорбционных криогенных насосов весьма перспективным. Форвакуумные адсорбционные насосы применяются в высоковакуумных агрегатах типа ЭРА для создания предварительного разрежения, обеспечивающего пуск магниторазрядных насосов; в некоторых технологических процессах электровакуумной и полупроводниковой промышленности; для создания предварительного разрежения в ряде электрофизических установок; для откачки паров гелия-3, гелия-4 и водорода в установках для получения сверхнизких (до 0,3 К) и промежуточных (5-20 К) температур.

Высоковакуумные адсорбционные криогенные насосы широко применяются для откачки вакуумных теплоизолирующих полостей устройств, предназначенных для хранения и транспортировки криогенных жидкостей, или устройств, основанных на их

использовании (сверхпроводящих магнитов, кабелей, машин и т.д.). Их эффективно применяют также в некоторых электронно-физических приборах. Например, их применение в электронных микроскопах ликвидирует опасность образования масляных пленок на объекте (зарастание объекта) и на стенках прибора, где они, заряжаясь, искажают электронную оптику микроскопа.

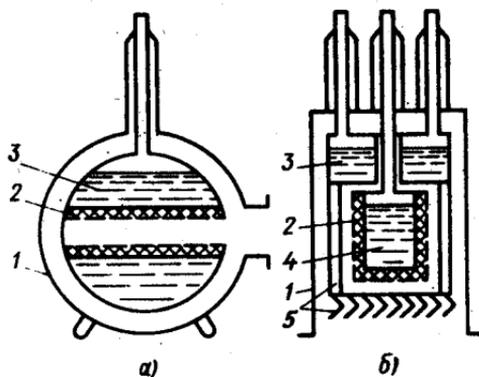


Рис. 15. Высоковакуумные адсорбционные насосы: а - адсорбент в полости, охлаждаемой жидким азотом; б - адсорбент на внешней поверхности сосуда с хладагентом (жидким водородом или жидким гелием); 1 - корпус насоса; 2 - адсорбент; 3 - жидкий азот; 4 - жидкий водород (гелий); 5 - жалюзийный экран

Кроме того, высоковакуумные криоадсорбционные насосы применяют в технологических устройствах для получения сверхчистых металлов; термообработки активных металлов, обеспечивающей повышение их механических характеристик; осаждения вакуумных конденсатов со стабильными наперед заданными свойствами и т.д.

Одной из причин, тормозящих более широкое использование адсорбентов в вакуумной технике, является их недостаточно высокая механическая прочность, что приводит к попаданию пыли в откачиваемый объем. Для устранения или по крайней мере, снижения вероятности запыления адсорбенты должны тщательно обеспыливаться. Это может быть достигнуто промывкой в дистиллированной воде с последующим прокаливанием на воздухе при температуре не менее 450-500 К перед загрузкой в насос.

В настоящее время разрабатывают конструкции откачных устройств, в которых обеспечивается при некотором снижении

быстроты откачки почти полная ликвидация пыления даже при использовании порошковых адсорбентов. Кроме того, разрабатывают новые типы адсорбентов с более высокой механической прочностью. Их промышленный выпуск должен создать условия для более широкого использования адсорбционных откачных средств.

Вопросы для самопроверки

1. Назовите типы адсорбентов, используемых в вакуумной технике.
2. Объясните изотермы адсорбции и расскажите об их практическом применении.
3. Перечислите основные требования к конструкциям адсорбционных насосов.
4. Расскажите о применении адсорбционных насосов.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Батраков Б.П., Боровик Е.С., Кобзев П.М. Гелиевый конденсационный насос со скоростью откачки по водороду 40000 л/с и предельным давлением ниже 10^{-9} мм рт.ст. - "Журн. техн. физики", 1970, т. 40, № 10, с. 2225-2232.
2. Боровик Е.С., Михайлов И.Ф., Косик Н.А. Автономный водородный конденсационный насос ВК-100. - "Журн. техн. физики", 1971, т. 41, № 6, с. 1316-1322.
3. Бреславец К.Г., Коган В.С., Серюгин А.Л. Криовакуумная адсорбция водорода на активном угле. - В кн.: Вопр. атомной науки и техники. Сер. Физика и техника высокого вакуума. Вып. 1(4), ХФТИ, Харьков, 1975, с. 43-45, 53-57.
4. Бреславец К.Г., Коган В.С. Криовакуумная адсорбция гелия микропористыми углеродными адсорбентами. - В кн.: Вопр. атомной науки и техники. Сер. Физика и техника высокого вакуума. Вып. 1(4) ХФТИ, Харьков, 1975, с. 58-59.
5. Волчкович А.И. Вакуумные адсорбционные насосы. М., "Машиностроение", 1974, 150 с.
6. Грошковский Я. Техника высокого вакуума М., "Мир", 1975, 624 с.
7. Коган В.С., Бреславец К.Г., Тапатаров Л.В. Особенности адсорбции газов микропористыми адсорбентами при малых заполнениях. - В кн.: Вопр. атомной науки и техники. Сер. Низкотемпературная адсорбция и криогенный вакуум. Вып. 1(2), ХФТИ, Харьков, 1972, с. 3-24.

8. Коган В.С., Серюгин А.Л. Исследование влияния парциального давления отдельных компонентов криогенного вакуума на структуру и свойства тонких пленок. - В кн.: Вопр. атомной науки и техники. Сер. Низкотемпературная адсорбция и криогенный вакуум. Вып. 1, ХФТИ. Харьков, 1971, с. 117-124.

9. Криогенный сверхвысоковакуумный насос с малым расходом хладагента. - "Журн. техн. физики", 1972, т. 42, № 9, с. 1987-1991. Авт.: С.Ф. Гришин, Е.Я. Гришина, В.А. Коваленко и др.

10. Мак-Каррел Б., Эрлих Г. Захват и передачи энергии при столкновениях атомов с кристаллической поверхностью. - В кн.: Взаимодействие газов с поверхностями. М., 1965, с. 78-101.

11. Минайчев В.Е., Зыков В.М. Криоконденсационный бустерный насос. - "ПТЭ", 1974, № 3, с. 148-150.

12. Пауэр Б.Д. Высоковакуумные откачные устройства. Пер. с англ. Под ред. В.И. Кузнецова. М., "Энергия", 1969, 528 с.

13. Получение ультравысокого вакуума $\leq 10^{-13}$ тор с помощью конденсационных насосов. - "Журн. техн. физики", 1971, т. 41, № 7 с. 1519-1524. Авт.: С.Ф. Гришин, Е.Я. Гришина, В.А. Коваленко и др.

14. Розанов Л.Н. Вакуумные машины и установки Л, "Машиностроение", 1975, 336 с.

15. Сверхвысокий вакуум в радиационно-физическом аппаратостроении. Под ред. Г.Л. Саксаганского. М., Атомиздат, 1976, 288 с. Авт.: Г.Л. Саксаганский, Ю.Н. Котельников, М.Д. Малев и др.

16. Федорова М.Ф. Исследование физической адсорбции и ее практические применения. - В кн.: Физика и техника сверхвысокого вакуума. Л., 1968, с. 10-22.

СОДЕРЖАНИЕ

Введение	3
1. Конденсационные насосы	5
Теоретическое обоснование конденсационного метода получения вакуума	5
Экспериментальные исследования конденсационной откачки	12
Типы конденсационных насосов	17
Сравнение вакуумных насосов с идеальным средством откачки	22
Вопросы для самопроверки	23
2. Адсорбционные насосы	24
Типы адсорбентов	24
Основные вакуумные характеристики адсорбентов	28
Применение адсорбентов в вакуумной технике и типы адсорбционных насосов	31
Вопросы для самопроверки	36
Список литературы	36