

УДК 621.52; 621.59; 535.34; 533.581

СВЕРХВЫСОКОВАКУУМНЫЙ ГЕЛИЕВЫЙ ЗАЛИВНОЙ КРИОГЕННЫЙ НАСОС ПОВЫШЕННОЙ ПРОИЗВОДИТЕЛЬНОСТИ

М. П. Ларин

Описана конструкция сверхвысоковакуумного гелиевого заливного криогенного насоса с охватываемой зоной откачки, имеющего в несколько раз большую производительность по сравнению с крионасосами известной конструкции с подсоединительными фланцами того же проходного сечения. Приведены основные характеристики крионасоса и снятые на нем изотермы адсорбции H_2 и He на конденсатах N_2 и Ag при 4.2 и 2 К в области равновесных давлений 10^{-8} — 10^{-4} Па. Быстрота действия насоса на входном фланце Ду 340 при диаметре корпуса 0.5 м по N_2 — 5.5 м³/с, по H_2 — 20 м³/с, по He — 11.5 м³/с, а непосредственно в охватываемой зоне откачки по N_2 — 11 м³/с и по H_2 — 35 м³/с.

Насос наиболее эффективно может быть использован в установках молекулярно-пучковой эпитаксии, а другие его модификации — в ускорителях заряженных частиц, имитаторах космического пространства, установках термоядерного синтеза и других объектах с объемами рабочих камер от 0.1 до 100 м³ и рабочими давлениями от 10^{-3} до 10^{-10} Па.

Исследования в области вакуумной техники, опыт эксплуатации вакуумного оборудования с различными средствами откачки, накопленные за последние годы, показали, что наиболее эффективными высоко- и сверхвысоковакуумными насосами являются гелиевые заливные крионасосы. Они по своим характеристикам оказались отвечающими всем требованиям современной технологии изготовления электронно-лучевых, фотоэлектрических, полупроводниковых приборов, элементов на основе интегральных схем [1] как нынешнего, так и нового поколения. Кроме того, этот тип крионасосов показал свою высокую эффективность при откачке крупногабаритных технологических и исследовательских камер большой емкости (до 100 м³), ускорителей заряженных частиц [2], имитаторов космического пространства, различных масс-спектрометрических и других аналитических комплексов, установок для выращивания монокристаллов [3], установок термоядерного синтеза [4]. Накоплен за последние годы положительный опыт использования гелиевых заливных крионасосов и в установках по производству и исследованию различных структур, получаемых методом молекулярно-пучковой эпитаксии, при котором используются полупроводниковые и другие материалы с относительно высокой упругостью пара как химически инертные, так и агрессивные.

В известных, так называемых плоскопараллельных схемах конструкций гелиевых заливных крионасосов с подсоединительными фланцами снизу [5-9] или сверху [1, 2, 10] конденсирующей поверхностью является полусферическое или плоское дно или крышка сосуда, заполняемого жидким гелием, а шевронный экран, устанавливаемый на пути откачиваемых газов перед этой поверхностью, выполнен плоским. Такая геометрия этих основных элементов, хотя и обеспечивает простоту, технологичность и компактность конструкций таких типов крионасосов, не дает возможности обеспечить высокую быстроту действия насосов из-за сравнительно невысокого коэффициента Клаузинга — коэффициента проницаемости шевронных экранов по газу ($w_p = 0.22 \div 0.25$).

Так называемые встроенные заливные крионасосы [11, 12] в качестве откачивающего элемента имеют боковую поверхность цилиндрического сосуда, запол-

няемого жидким гелием, а их шевронный экран выполнен вдоль по образующей цилиндра и расположен коаксиально вокруг боковой поверхности этого сосуда. Такие крионасосы, хотя и обладают в несколько раз большей быстротой действия по сравнению с конструкциями плоскопараллельной схемы при тех же диаметрах гелиевых сосудов, имеют главный недостаток, часто являющийся

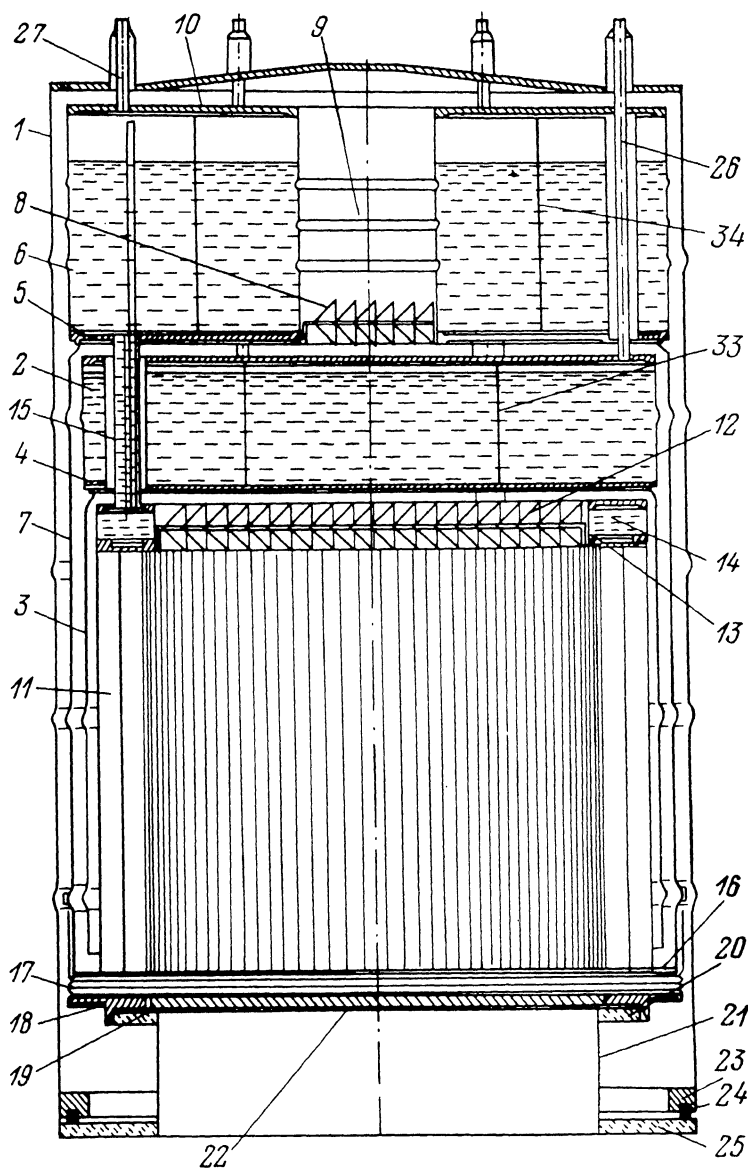


Рис. 1. Сверхвысоковакуумный гелиевый крионасос с охватываемой зоной откачки в разрезе.

определяющим, — занимают полезное пространство рабочей камеры, что не всегда допустимо. Кроме того, они имеют значительно большие расходы криоагентов из-за повышенных радиационных тепловых потоков, падающих на шевронный экран и криопанель от стенок камеры и других источников тепла, располагаемых в ней.

С целью создания крионасосов, частично лишенных недостатков вышеперечисленных обеих конструктивных схем, было разработано и создано несколько конструкций крионасосов с так называемой охватываемой зоной откачки, одна из модификаций которых приведена на рис. 1.

Криогенный насос содержит корпус 1, откачивающий элемент в виде сосуда 2, заполняемого жидким гелием, и обечайки 3, приваренной к днищу 4 сосуда 2. Откачивающий элемент снаружи окружен днищем 5 сосуда 6, заполняемого жидким азотом, обечайкой 7, приваренной к днищу 5, и шевронным экраном 8, перекрывающим центральный канал 9 в сосуде 6, который соединяет полость между корпусом 1 и наружными поверхностями обечайки 7 и крышки 10 с полостями, окружающими откачивающий элемент. Внутренняя поверхность обечайки 3 окружена цилиндрическим 11, а днище 4 — плоским 12 шевронными экранами. Верхняя часть экрана 11 сварена с экраном 12 и с хорошим тепловым контактом состыкована с днищем 13 кольцевого сосуда 14 (рис. 2),

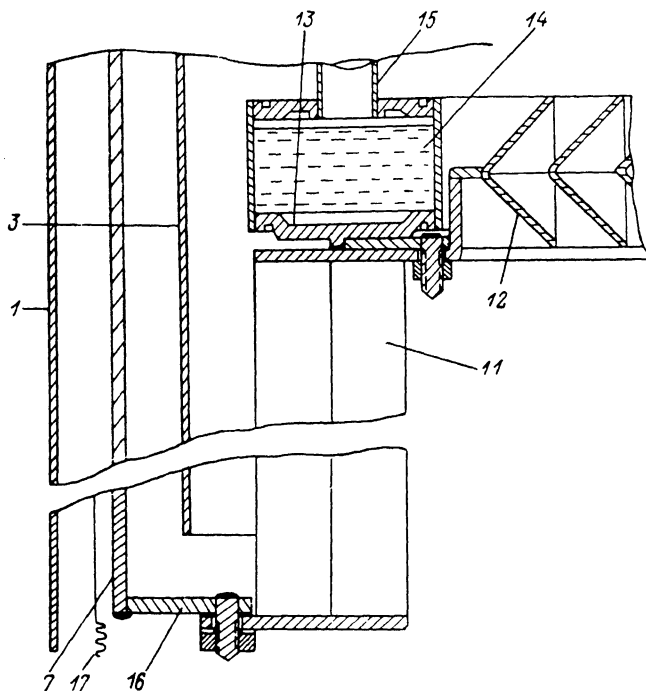


Рис. 2. Узлы крепления шевронных экранов крионасоса.

полость которого с помощью трех трубок 15 сообщается с полостью сосуда 6 (рис. 1). В нижней части шевронный экран 11 стыкуется с кольцом 16, приваренным к обечайке 7 (рис. 2). К ней же приварен тонкостенный тепловой мост 17 сильнофоноподобного вида, к нижней части которого приварен кольцевой фланец 18 с притертой поверхностью 19, плотно прилегающей к поверхности кольцевого фланца 20 входного патрубка 21 рабочей камеры. При необходимости на этот фланец 20 может быть герметично установлена плита 22 со смонтированными на ней узлами (например, молекулярными пушками, держателями образцов и другими элементами).

Корпус 1 в нижней части имеет кольцевой фланец 23 с резиновым уплотнением 24, с помощью которого крионасос вакуумно-плотно стыкуется с кольцевым фланцем 25 входного патрубка 21.

Сосуд 2 имеет две трубки 26, а сосуд 6 — три трубки 27 для заливки криоагентов и выхода их паров.

Для наблюдения за технологическим процессом в рабочей зоне, охватываемой экранами 11, 12 и плитой 22, а также для обеспечения возможности шлюзования образцов в боковой поверхности элементов 1, 3, 7, 11 крионасоса предусмотрены, например, смотровые окна 28 и 29 (рис. 3) или вводы шлюзовых устройств, неподвижные 30, 31 и подвижный 32 патрубки. Кроме того, в боковой поверхности корпуса 1 имеется патрубок с фланцем (на рисунках не показан), к которому стыкуется через вакуумный клапан насос предварительной безмасляной откачки, например сорбционный насос, охлаждаемый жидким или твер-

дым азотом [1]. Для исключения подвижности поверхностей крышек и днищ сосудов 2 и 6 при вакуумировании насоса к ним приварены перфорированные обечайки 33 и 34 (рис. 1).

Детали 1, 15, 17, 18, 20—23, 25—27 сделаны из нержавеющей стали 12Х18Н10Т, прокладка 24 — из силиконовой резины, окна 28, 29 — из молибденового стекла, остальные позиции — из меди марки М1.

Поверхности всех шевронных экранов покрыты эмалью КО-818 толщиной не менее 0.15 мм; поверхность узлов и деталей 1—7, 10, 14, 18—23, 25, обращен-

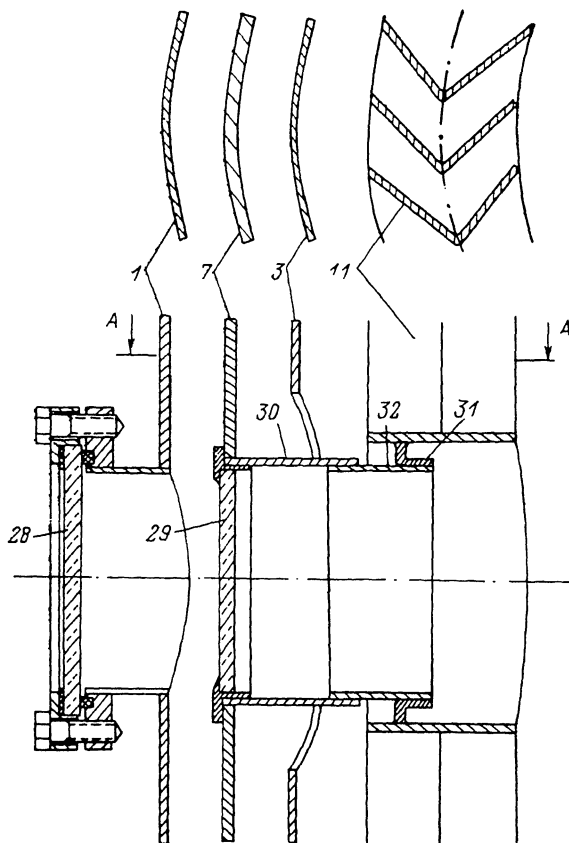


Рис. 3. Смотровые окна, вмонтированные в крионасос.

ные в вакуумный объем, отполированы до степени шероховатости Rz 0.08— Rz 0.16 и покрыты пленкой алюминия толщиной не менее 1 мкм методом термического испарения в протоке гелия по технологии, описанной в [13].

Наружный диаметр корпуса крионасоса 0.5 м, высота 0.8 м, диаметр и высота охватываемой зоны откачки соответственно 0.36 и 0.33 м. Объем гелиевого сосуда 15 л, азотного 30 л. Ресурс непрерывной работы крионасоса после однократной заливки жидкого гелия — 1 месяц при рабочем давлении не выше 10^{-5} Па. Необходимая периодичность дозаправки насоса жидким азотом — не реже 1 раза за трие суток. Вес крионасоса конструкции, показанной на рис. 1 [14], около 120 кг. Вес аналогичной конструкции тех же габаритов, но изготовленной из титана и алюминия, — 45 кг.

Конструктивно крионасос выполнен в виде поднимающегося и опускающегося колпака, самоуплотняющегося при опускании на рабочую плиту установки, например, гидropодъемником колпака стандартной напылительной установки.

Запуск крионасоса и его работа осуществляются следующим образом.

Насос опускают до соприкосновения уплотнительной прокладки 24 с фланцем 25, при этом произойдет подпружиненное прилегание притертых поверхно-

стей 19 и 20 за счет моста 17. При отсутствии плиты 22 патрубок 21 является входным патрубком, соединяющим крионасос с откачиваемой камерой, стыкуемой, например, с помощью металлического уплотнения с фланцем 25. При наличии плиты 22, например, в пылительной установке или установке молекулярно-пучковой эпитаксии смонтированные на ней технологические узлы после опускания крионасоса оказываются непосредственно в охватываемой зоне откачки.

Далее через систему байпасной откачки, например клапан, пристыкованный к одному из патрубков, расположенных на боковой поверхности корпуса крионасоса, откачивают вакуумируемый объем до давления около 40 Па, например, форвакуумным механическим насосом. Как известно [15], этот режим откачки полностью безопасен от миграции паров масла механического насоса в откачиваемый объем. Затем дальнейшую откачку до давления 10^{-1} — 10^{-3} Па ведут любым безмасляным насосом, лучше всего адсорбционным насосом [1], подсоединенным через клапан также к боковой поверхности корпуса 1. После этого сосуд 6 заполняют жидким азотом и давление, как правило, снижается до 10^{-3} — 10^{-5} Па после охлаждения сосуда, экрана 7 и шевронных экранов (через 20—40 мин после начала заполнения сосуда 6). Далее заливают жидкий гелий в сосуд 2, причем с целью экономии его целесообразно провести предварительное охлаждение стенок сосуда 2 и экрана 3 жидким азотом до $T=90\div 110$ К путем заливки 2—3 л азота через одну из двух трубок 26 с контролем температуры с помощью термопары, опускаемой через вторую трубку 26.

После заполнения сосуда 2 жидким гелием производят формирование на внутренней поверхности обечайки 3 и на днище 4 слоя криосорбента, если по условиям технологического процесса ожидается большое газовыделение водорода (до 10—100 м³. Па). Для этого через натекаТЕЛЬ, пристыкованный к рабочей камере либо к плите 22, производят напуск аргона высокой чистоты (или азота) при давлении напуска, измеряемом в камере, около $(1\div 2)\cdot 10^2$ Па в течение 15 мин—2.5 ч. При этом на криопанели будет сконденсировано соответственно около 10^2 — 10^3 м³. Па газа (1—10 н. л) с образованием слоя конденсата криосорбента толщиной порядка $10^4\div 10^5$ монослоев. При конденсации такого количества аргона расходуется около 0.13—1.3 л жидкого гелия соответственно.

После напуска газа-криосорбента для получения предельного давления в камере, равного 10^{-10} Па и ниже, достаточно прогреть ее стенки, технологическую оснастку, фланцы 18 и 20 при температуре 200—250 °С в течение 4—8 ч, не превышая давления при подъеме температуры выше $1\cdot 10^{-4}$ Па. Корпус крионасоса прогревать нет необходимости, поскольку как видно из рис. 1, конструктивно он выполнен так, что газовыделения с его внутренней поверхности, а также десорбируемые газы с резинового уплотнения 24, фланцев 23, 25 и наружной поверхности патрубка 21, мигрируя по зазору между узлами 1, 7, 10, каналу 9, через шевронный экран 8, конденсируются в основном на крышке сосуда 2 и не попадают в охватываемую зону откачки и рабочую камеру.

Результаты исследований

В процессе испытаний крионасоса и исследований ряда его характеристик были проведены измерения его быстроты действия по Ar, N₂, H₂ и He, определены коэффициенты захвата по этим газам, были измерены изотермы адсорбции H₂ и He на Ar- и N₂-конденсатах, проведен сравнительный анализ полученных экспериментальных данных с имеющимися в литературе.

1. Измерение быстроты действия насоса по Ar, N₂, H₂ и He и коэффициентов захвата по этим газам. Быстрота действия крионасоса (рис. 1) по основным газам, представляющим наибольший практический интерес, таким как Ar, N₂, H₂ и He, была измерена на его входном патрубке методом постоянных давлений по методике, описанной в [16], причем по H₂ и He быстрота действия была измерена на предварительно сконденсированном аргоном конденсате при температуре криопанели $T_k=4.2$ К,

а по He еще и при $T_k=2$ К. Результаты испытаний приведены на рис. 4, откуда видно, что быстрота действия по Ar, N₂ и H₂ в диапазоне давлений 10^{-8} — 10^{-2} Па является постоянной величиной. Средняя быстрота действия оказалась ($\text{м}^3/\text{с}$): по Ar — ${}^0\tilde{S}_n^{\text{Ar}}=4.5 \pm 0.1$ (кривая 1), по N₂ — ${}^0\tilde{S}_n^{\text{N}_2}=5.5 \pm 0.1$ (кривая 2), по H₂ — ${}^0\tilde{S}_n^{\text{H}_2}=20.5 \pm 0.5$ (кривая 5). Быстрота действия насоса по гелию на предварительно сконденсированном на криопанели при $T=4.2$ К аргоне в количестве 1.21 нл ($\sim 10^4$ монослоев) оказалась равной при температуре криосорбента $T_k=4.2$ К ${}^0_{4.2}\tilde{S}_n^{\text{He}}=11.5 \pm 0.3$, при $T_k=2$ К — ${}^0\tilde{S}_n^{\text{He}}=13.5 \pm 0.4$. При давлении напуска выше 10^{-4} Па происходило резкое снижение быстроты действия насоса по гелию из-за возрастания теплопритока к криосорбенту за счет молекулярного теплообмена между ним и экранами, имеющими температуру

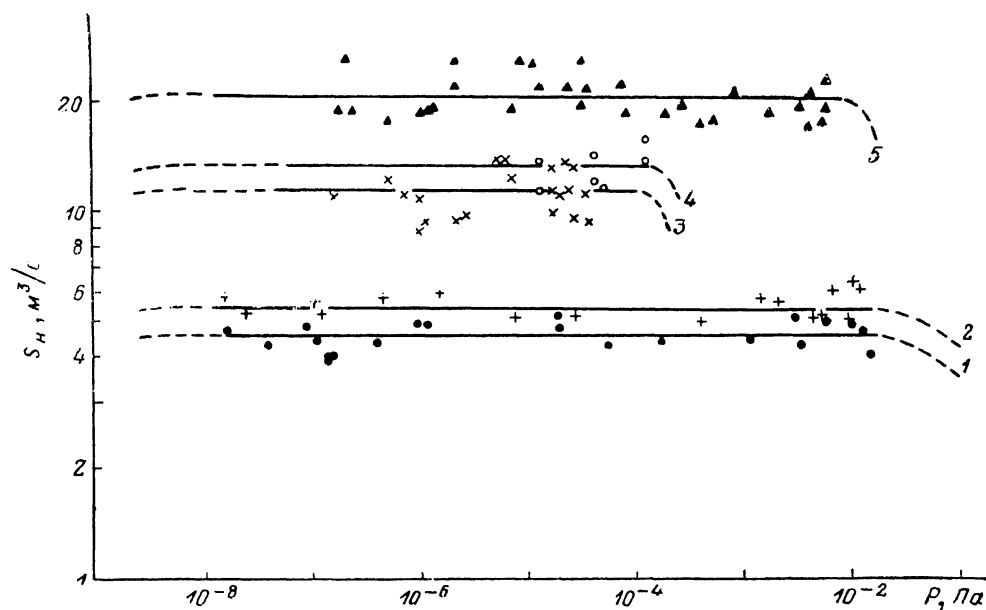


Рис. 4. Зависимости быстроты действия крионасоса от давления напуска газов в конденсационном режиме при температуре криопанели $T_k=4.2$ К по Ar (1) и N₂ (2), в конденсационно-сорбционном режиме по He на конденсате Ar с $T_k=4.2$ К (3), по He на конденсате Ar с $T_k=2$ К (4) и по H₂ на конденсате Ar с $T_k=4.2$ К (5).

жидкого азота, что приводило к росту температуры криосорбента и ухудшению его сорбционной способности.

Проведем сравнительные оценки быстроты действия и коэффициентов захвата насоса с охватываемой зоной откачки с насосами плоскопараллельной конструктивной схемы. Проводимость в молекулярном режиме входного патрубка 21, диаметр которого 340 мм (рис. 1), когда отсутствует плита 22, для исследованных газов при их температуре 293 К, по расчетам, оказывается равной ($\text{м}^3/\text{с}$): $F_{\text{вх}}^{\text{Ar}}=5.9$, $F_{\text{вх}}^{\text{N}_2}=10.7$, $F_{\text{вх}}^{\text{H}_2}=40.0$, $F_{\text{вх}}^{\text{He}}=28.3$. Соответственно коэффициент захвата насоса, выражаемый отношением $\gamma_{\text{н}}=S_{\text{н}}/F_{\text{вх}}$, оказывается равным для крионасоса с охватываемой зоной откачки ${}^0_{\text{н}}\gamma_{\text{н}}^{\text{Ar}}=0.51$ и ${}^0_{\text{н}}\gamma_{\text{н}}^{\text{N}_2}=0.51$ и ${}^0_{4.2, \text{н}}\gamma_{\text{н}}^{\text{He}}=0.41$, ${}^0_{2, \text{н}}\gamma_{\text{н}}^{\text{He}}=0.48$.

Крионасос плоскопараллельной конструкции с диаметром подсоединительного фланца 340 мм и диаметром корпуса 500 мм из конструктивных соображений может иметь максимальный диаметр плоского шевронного экрана 450 мм. При коэффициенте проницаемости последнего по газу (коэффициент Клаузинга) $\omega_f=0.22$ [17] и при коэффициенте прилипания криопанели по Ar и N₂ при ее температуре $T_{\text{н}}=4.2$ К, равном ${}_{4.2}\alpha_{\text{н}}^{\text{Ar}}={}_{4.2}\alpha_{\text{н}}^{\text{N}_2}=1$ [18–20], такой крионасос будет иметь быстроту действия ${}^{\text{н}}S_{\text{н}}^{\text{Ar}}=3.4$ и ${}^{\text{н}}S_{\text{н}}^{\text{N}_2}=4.1$ $\text{м}^3/\text{с}$, а при проводимости входного патрубка с диаметром 340 мм $F_{\text{вх}}^{\text{Ar}}=8.9$ и $F_{\text{вх}}^{\text{N}_2}=10.7$ $\text{м}^3/\text{с}$ коэффициент захвата насоса будет ${}^{\text{н}}_{\text{н}}\gamma_{\text{н}}^{\text{Ar}}={}^{\text{н}}_{\text{н}}\gamma_{\text{н}}^{\text{N}_2}=0.38$. Эти параметры в 1.3 ниже, чем у конструкции с охватываемой зоной откачки. При увеличении диаметров кор-

пусов крионасосов выше 500 мм отношения ${}^0S_{H/{}^u}S_H$ и ${}^0\gamma_{H/{}^u}\gamma_H$ еще больше увеличиваются.

Сравнение экспериментальных данных по скорости действия насоса с охватываемой зоной откачки (рис. 1) с насосом плоскопараллельной конструкции показывает особенно заметное увеличение коэффициента захвата He и H_2 у первой по сравнению со второй конструкцией. Так, при коэффициентах прилипания ${}_{4.2}\alpha_{N_2} = 1$, ${}_{4.2}\alpha_{H_2} = 0.5$ и ${}_{4.2}\alpha_{He} = 0.1$ [18-21] коэффициенты захвата насоса, например, типа КН-31 [2, 22] ${}_{4.2}{}^u\gamma_{N_2} = 0.345$, ${}_{4.2}{}^u\gamma_{H_2} = 0.293$ и ${}_{4.2}{}^u\gamma_{He} = 0.132$. Коэффициенты же захвата H_2 и He у рассмотренной конструкции (рис. 1), как было уже указано выше, ${}_{4.2}{}^0\gamma_{H_2} = 0.51$ и ${}_{4.2}{}^0\gamma_{He} = 0.41$, что соответственно в 1.7 и 3.1 раза больше, чем у крионасоса плоскопараллельной конструкции КН-31.

Это обстоятельство делает возможным использовать крионасосы с охватываемой зоной откачки наиболее эффективно для откачки гелия, например, в установках термоядерного синтеза.

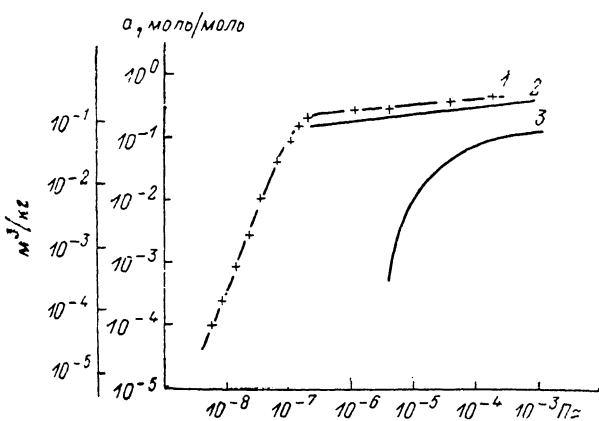


Рис. 5. Изотермы адсорбции H_2 при $T_k = 4.2$ К.

2. Измерение изотерм адсорбции H_2 и He на конденсатах Ag и N_2 .

С помощью крионасоса (рис. 1) были проведены измерения изотерм адсорбции H_2 на аргонном конденсате при $T_k = 4.2$ К (рис. 5, кривая 1) и He на конденсатах Ag и N_2 при $T_k = 4.2$ и 2 К (рис. 6) с целью сравнения с данными, приведенными в [21, 23-26], и дополнения и уточнения их в области равновесных давлений $10^{-5} - 10^{-8}$ Па.

Для формирования мелкопористых, обладающих высокой сорбционной способностью конденсатов-криосорбентов Ag и N_2 , в крионасос при $T_k = 4.2$ К напускался при $P = 1.3 \cdot 10^{-2}$ Па аргон либо азот в количестве $1.2 \cdot 10^{-3}$ м³ при $T = 293$ К и $1.013 \cdot 10^5$ Па, т. е. при нормальных условиях (1.2 н. л.), что соответствовало при условии равномерной конденсации их по всей поверхности криопанели, обращенной к шевронным экранам, слою конденсата толщиной около $1 \cdot 10^4$ монослоев.

Как видно из рис. 5, для сохранения максимальной скорости действия насоса по H_2 (~ 20 м³/с на входном фланце) при рабочем давлении его, например $10^{-7} - 10^{-6}$ Па, соответственно на каждые $2.6 \cdot 10^3 - 10.8$ предварительно сконденсированных при $T_k = 4.2$ К молекул Ag должно быть адсорбировано не более одной молекулы H_2 или на каждый кг аргонного конденсата не более $2.2 \cdot 10^{-4} - 5.2 \cdot 10^{-2}$ м³ H_2 при нормальных условиях. Тогда предельные давления по H_2 соответственно окажутся не выше $10^{-8} - 10^{-7}$ Па. При указанной газовой нагрузке ($2 \cdot 10^{-6} - 2 \cdot 10^{-5}$ м³. Па/с), если было предварительно сконденсировано 1.2—12 н. л аргона ($\sim 10^{-4} - 10^{-5}$ монослоев), предельные давления, равные $10^{-8} - 10^{-7}$ Па, станут через 6.5—156 и 65—1560 ч соответственно.

Для сравнения с измеренной изотермой 1 на рис. 5 показана изотерма 2, полученная в [23] при тех же условиях, но в диапазоне равновесных давлений $10^{-7} - 10^{-3}$ Па. Как видно, обе кривые в указанном диапазоне равновесных давлений находятся в хорошем согласии. Кроме того, на рис. 5 для сравнения:

эффективности конденсационно-сорбционной и сорбционной откачки водорода приводится изотерма адсорбции водорода активным углем БАУ, охлажденным до $T=4.2$ К (кривая 3), полученная автором работы [23].

Из сопоставлений кривых 1 и 3 видно, что в области давлений выше 10^{-4} Па сорбционная способность по H_2 (a_{H_2}) аргонного конденсата в 4—5 раз выше, чем у угля БАУ, на единицу их массы, а в области давлений ниже 10^{-5} Па a_{H_2} аргонного конденсата оказывается на 1.5—2 и более порядков выше a_{H_2} угля. Кроме этого, следует учесть тот факт, что аргонный и азотный конденсаты являются в высокой степени прозрачными для инфракрасного излучения в области длин волн 10—200 мкм и выше даже при их толщинах в несколько мм [26, 27], а активный уголь имеет высокую степень черноты, близкую к 1 даже при тонких слоях (~ 0.1 мм). Учитывая это, для откачки водорода в области давлений ниже 10^{-4} — 10^{-5} Па существенно более эффективным и экономичным в плане расхода жидкого гелия оказывается использование конденсационно-сорбцион-

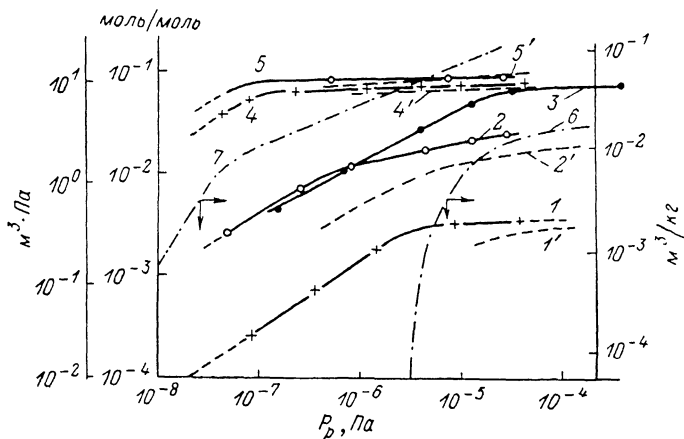


Рис. 6. Изотермы адсорбции Ne на конденсатах N_2 (1, 1', 4, 4') и (2, 2', 3, 5, 5') при $T_k=4.2$ К (1, 1', 2, 2', 3) и $T_k=2$ К (4, 4', 5, 5') при толщине криоосадков $\sim 10^4$ монослоев (1.2 н. л) (1, 2, 4, 5) и $\sim 2 \cdot 10^5$ монослоев (23 н. л) (3).

1—5 — наст. раб.: 1', 2' — [21, 23], 4', 5' — [23, 24].

ных насосов с газами конденсатами, чем с насыпными адсорбентами типа активных углей, охлаждаемыми жидким гелием.

На рис. 6 приведены изотермы адсорбции Ne на аргонном и азотном конденсатах при $T_k=4.2$ и 2 К, измеренные на крионасосе (рис. 1). Кривая 1 — изотерма адсорбции Ne на N_2 конденсате толщиной $\sim 10^4$ монослоев (1.2 н. л), кривая 2 — на Ag конденсате того же количества. Кривые 1', 2' — изотермы адсорбции, полученные авторами работ [21, 23] соответственно для конденсатов N_2 и Ag. Как видно, кривые 1 и 1', 2, 2' находятся в хорошем согласии, но кривые 1 и 2 охватывают более широкий диапазон равновесных давлений адсорбированного Ne.

Кривые 4 и 5 — изотермы адсорбции Ne при $T_k=2$ К соответственно для конденсатов N_2 и Ag такой же толщины, также полученные с помощью крионасоса (рис. 1). С ними в очень близком соответствии находятся изотермы 4' и 5', приведенные в [23, 24].

Из рис. 6 видно, что, например, с помощью крионасоса рассмотренной в данной работе конструкции можно эффективно откачивать достаточно большие количества Ne при сохранении довольно низких его равновесных давлений. Так, указанный крионасос может при $T_k=4.2$ К адсорбировать 0.5 — 2.5 м³·Па (5—25 н.см³) Ne и сохранить предельное давление по нему соответственно 10^{-7} — 10^{-5} Па, если на его криопанель предварительно было сконденсировано всего 1.2 н. л аргона. При большем количестве аргонного конденсата, например 23 н. л (рис. 6, кривая 3), равновесные давления Ne 10^{-6} — 10^{-4} Па станут после адсорбции 1.6—9.1 м³·Па гелия (15.6—90 н.см³).

Наибольший практический интерес, особенно для откачки установок термоядерного синтеза, представляет режим откачки гелия крионасосом с предвари-

тельно сконденсированным при $T_k=4.2$ К аргоном, охлажденным затем до 2 К и ниже путем откачки паров жидкого гелия (рис. 6, кривая 5). При этом аргонным конденсатом в количестве $\sim 10^4$ молюсов (для рассмотренного насоса — 1.2 н. л) может быть адсорбировано 10—11 м³. Па (100—110 н. см³) гелия, причем равновесные давления его станут соответственно 10^{-7} — 10^{-5} Па. Коэффициент адсорбции k_n , равный отношению объема адсорбированного газа к объему газа-криосорбента, приведенных к нормальным условиям, оказывается довольно высоким, а именно $k_n=0.083$ — 0.092 или 8.3—9.2 % соответственно при указанных равновесных давлениях (рис. 6 по шкале моль/моль). Если учесть, что и при толщинах конденсата аргона, на порядок больших, k_a незначительно уменьшается, то реально насосом рассмотренной конструкции можно откачивать гелий объемом около 1 н. л с сохранением его равновесного давления достаточно низким.

На рис. 6 приводятся для сравнения изотермы адсорбции гелия углем БАУ (кривая 6) [23] и цеолитом СаА (кривая 7) [25] при $T=4.2$ К, построенные в размерности a_{He} в м³/кг. Как видно, сорбционная способность по He угля БАУ, особенно при равновесных давлениях He ниже 10^{-5} Па, на несколько порядков ниже сорбционной способности Ar-конденсата при $T=4.2$ К. Сорбционная способность же цеолита СаА в области равновесных давлений 10^{-5} — 10^{-7} Па примерно в 4 раза выше сорбционной способности аргонного конденсата при $T=4.2$ К.

Выводы

В результате проведенной разработки, испытаний, исследований и опытной эксплуатации можно констатировать следующее.

1. Гелиевый заливной крионасос с охватываемой зоной откачки по сравнению с крионасосами с плоскопараллельной конфигурацией шевронных экранов одинаковых размеров корпусов и подсоединительных фланцев имеет быстроту откачки газов с коэффициентами прилипания к поверхности криопанели $4.2\alpha=1$ (N_2 , CH_4 , Ar, O_2 и др.), как минимум на 30 % большую, а газов с меньшими 4.2α , например, H_2 ($4.2\alpha^{H_2}=0.5$) и He ($4.2\alpha^{He}=0.1$), — соответственно в 1.7 и 3.1 раза большую, что дает возможность наиболее эффективно использовать крионасосы с охватываемой зоной откачки в установках термоядерного синтеза.

2. Измеренные изотермы адсорбции H_2 и He на конденсатах Ar и N_2 при $T=4.2$ и 2 К подтверждают экспериментальные результаты авторов работ [21, 23—26] и расширяют результаты в область более низких равновесных давлений. Сравнение адсорбционной способности гелия и водорода аргонными конденсатами и насыпными адсорбентами (активным углем БАУ, цеолитом СаА) при $T=4.2$ К, особенно в области равновесных давлений ниже 10^{-5} Па, а также учитывая значительные отличия их в поглощательной способности инфракрасного излучения (степени черноты), а именно для слоев с толщинами до 1 мм ($\epsilon_{Ar} \ll \epsilon_{БАУ}$), показывает, что использование гелиевых крионасосов конденсационно-сорбционных по сравнению с сорбционными с насыпными адсорбентами существенно более эффективно и экономично.

3. Крионасосы с охватываемой зоной откачки наиболее эффективны для откачки камер установок молекулярно-пучковой эпитаксии, а более крупные их модификации — для откачки ускорителей заряженных частиц, имитаторов космического пространства, установок термоядерного синтеза и других камер объемом несколько десятков—сотен м³ или с большой газовой нагрузкой.

4. Опыт проектирования, создания и эксплуатации крионасосов с охватываемой зоной откачки позволяет считать реальным возможность создания заливного гелиевого криогенного насоса, например, с подсоединительным фланцем ДУ 1000—ДУ 1600, имеющего быстроту откачки H_2 175—450 м³/с и He 100—250 м³/с. Такой крионасос при рабочем давлении ниже 10^{-5} Па имел бы расход криоагентов: не более 4—8 л жидкого гелия в сутки и 3—6 л/ч жидкого азота, а ресурс непрерывной работы до полного испарения гелия 2—4 месяца и жидкого азота 4—6 суток.

Литература

- [1] Ларин М. П. ПТЭ, 1983, № 6, с. 128—132.
- [2] Ларин М. П. ЖТФ, 1983, т. 53, № 5, с. 892—905.
- [3] Ажамжа В. М., Вьюгов П. Н., Решетова Л. Н. и др. ВАНТ. Физика и техника высокого вакуума. Харьков, 1973, в. 1 (1), с. 82—85.
- [4] Юферов В. Б., Сороковой Л. Г. Вопросы атомной науки и техники, серия: Низкотемпературная адсорбция и криогенный вакуум. Харьков, 1971, с. 145—150.
- [5] Гришин С. Ф., Гришина Е. Я., Коваленко В. А., Чернышенко В. Я. ЖТФ, 1972, т. 42, № 9, с. 1987—1991.
- [6] Venenuti C. J. J. Vac. Sci. and Technol., 1974, v. 11, N 3, p. 591—598.
- [7] Ларин М. П. ПТЭ, 1982, № 2, с. 130—133.
- [8] Ларин М. П. ЖТФ, 1985, т. 55, № 3, с. 449—467.
- [9] Ларин М. П. А. с. 1017817. Б. И., 1983, № 18.
- [10] Ларин М. П. А. с. 1084486 (СССР). Б. И., 1984, № 13.
- [11] Проспект фирмы Balzers 1F2A, P31-147101f, крионасосы KRY-1000U, KRY-5000.
- [12] Проспект фирмы Leybold Heraeus GmbH, 182.12-NV 250-Section 12. Edition 03/85, BPK 2000 Liquid Pool Cryopump.
- [13] Ларин М. П. Электронная техника. Сер. материалы, 1980, № 5, с. 14—16.
- [14] Ларин М. П. А. с. 1250707 (СССР). Б. И., 1986, № 30.
- [15] Фалалеев Л. В., Цейтлин А. Б. ПТЭ, 1972, № 5, с. 253.
- [16] ОСТ 11295.021-74. Насосы и агрегаты вакуумные. ВНИИ Электронстандарт, 1975. 23 с.
- [17] Справочник по физико-техническим основам криогеники. 3-е изд. Под ред. Малкова М. П. М.: Энергоатомиздат, 1985. 431 с.
- [18] Сверхвысокий вакуум в радиационно-физическом аппаратостроении. М.: Атомиздат, 1976. 288 с.
- [19] Иванов В. И. Безмасляные вакуумные насосы. Л.: Машиностроение, 1980. 89 с.
- [20] Минайчев В. Е. Вакуумные крионасосы. М.: Энергия, 1976. 152 с.
- [21] Юферов В. Б., Коваленко В. А., Кобзев П. М. ЖТФ, 1967, т. 37, № 9, с. 1726—1728.
- [22] Ларин М. П. Автореф. канд. дис. Л., 1985. 292 с.
- [23] Юферов В. Б. ВАНТ. Низкотемпературная адсорбция и криогенный вакуум. Харьков, 1971, с. 125—145.
- [24] Селиверстова Л. П., Коган В. С., Бреславец К. Г. Препринт ХФТИ, 83-6. Харьков, 1983. 44 с.
- [25] Великанов Е. Г., Гришин С. Ф., Гуревич Л. С. Криогенные насосы. М., 1977. 38 с.
- [26] Гришин С. Ф., Гришина Е. Я., Коваленко В. А. и др. ВАНТ. Физика и техника высокого вакуума. Харьков, 1975, в. 1 (4), с. 15—23.
- [27] Ларин М. П. ЖТФ, 1980, т. 50, № 9, с. 1955—1966.

Научно-техническое объединение
Институт аналитического
приборостроения АН СССР
Ленинград

Поступило в Редакцию
8 апреля 1987 г.