

Автореф
А84

проф. Гушак М.В.

ОДЕССКИЙ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЙ ИНСТИТУТ ХОЛОДИЛЬНОЙ ПРОМЫШЛЕННОСТИ

На правах рукописи

Для служебного пользования

Экз. № 066

АРОЯН Акоп Арутюнович

УДК 621.59.004

СОВЕРШЕНСТВОВАНИЕ АДСОРБЦИОННЫХ КРИОГЕННЫХ
РЕФРИЖЕРАТОРОВ ОТКАЧКИ ГЕЛИЯ-4 И ГЕЛИЯ-3

Специальности: 05.04.03 - Машины и аппараты холодильной и
криогенной техники и систем
кондиционирования

05.14.05 - Теоретические основы теплотехники

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени

кандидата технических наук

Одесса - 1987



Работа выполнена в Ереванском физическом институте

Научные руководители - доктор технических наук,
доцент Г.К.ЛАВРЕНЧЕНКО;
кандидат физико-математических наук,
старший научный сотрудник
Р.Т.МИНА

Официальные оппоненты - доктор физико-математических наук,
старший научный сотрудник
В.А.МИХЕЕВ;
кандидат технических наук,
доцент А.В.ТРОЦЕНКО

Ведущая организация - НПО "Гелиймаш", г. Москва

Защита состоится "29" июня 1987 г. в 11⁰⁰ часов
на заседании специализированного совета К.068.27.01 при
Одесском технологическом институте холодильной промышленности
по адресу: 270057, г. Одесса, ул. Петра Великого, 1/3,
СТИХП.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке
института.

Автореферат разослан " " " 1987 г.

секретарь

ного совета

Р.К.НИКОЛЬШИН

- 3 -

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы. Для решения ряда задач современной физики требуются криогенные системы длительного криостатирования при температурах $T_x = 0,5 \dots 1,0$ К. К таким задачам относятся, например, создание высокоэффективных протонных поляризованных мишеней в физике высоких энергий, детекторов инфракрасного излучения в космической радиоастрономии.

В настоящее время для этих целей применяются рефрижераторы с внешней откачкой гелия-3 (для криостатирования на уровне $\sim 0,5$ К) и гелия-4 (для криостатирования на уровне $\sim 1,0$ К). Холодопроизводительность таких рефрижераторов, температурный уровень криостатирования, как правило, определяются характеристиками откачной системы. Недостатками рефрижераторов с внешней системой откачки являются: необходимость использования откачных трубопроводов большого сечения, что увеличивает теплоприток к низкотемпературной ванне и, тем самым, существенно снижает холодопроизводительность; потребность в многокаскадной системе очистки из-за наличия масла и воздуха в контуре циркуляции рабочего газа; низкий ресурс работы, обусловленный применением механического оборудования.

Большинство указанных недостатков может быть устранено при использовании внутренней системы откачки с криоадсорбционными насосами. В этих системах удается насос разместить в криостате вблизи от ванны с откачиваемым криоагентом, что позволяет уменьшить теплоприток к ней и увеличить холодопроизводительность рефрижератора. Однако периодичность действия насоса, связанная с необходимостью регенерации адсорбента, не дает возможности криостатировать объекты в течение длительного времени.

В некоторых работах предлагаются конструкции адсорбционных криогенных рефрижераторов (АКР), состоящих из нескольких криоадсорбционных насосов, периодически переключаемых на откачиваемую ванну. Наличие механических узлов, работающих при низких температурах, и невысокая холодопроизводительность ввиду просачивания газа из регенерируемого адсорбента в откачивающий насос ограничивает применение таких АКР.

Целью работы является разработка, создание и исследование характеристик новых конструкций совершенных АКР, имеющих повышенную холодопроизводительность и высокую надежность, не содержащих подвижных элементов в области криогенных температур.

Основными задачами при этом являются: поиск схемных решений для создания надежного АКР длительного действия, не содержащего

подвижных элементов в области криогенных температур; создание АКР периодического действия для изучения временных характеристик процессов адсорбции и десорбции гелия-4 и гелия-3, обоснование двухплечевой схемы АКР непрерывного действия; разработка расчетной модели цикла подготовки к работе регенерируемого плеча; разработка АКР непрерывного действия; создание эффективных тепловых ключей, изучение их характеристик; исследование факторов, влияющих на энергетические характеристики и режимные параметры АКР; изучение возможности создания на базе АКР системы криостатирования при 0,1...0,2 К.

Научная новизна. Впервые создан и изучен совершенный бесклапанный АКР непрерывного действия на основе двух криоадсорбционных насосов и двухсекционной низкотемпературной ванны с холодопроизводительностью до 5 мВт при $T_x \sim 0,6$ К для гелия-3 и 30 мВт при $T_x \sim 1,1$ К для гелия-4. Создана расчетная модель процессов регенерации АКР периодического действия для выявления эффективных режимов работы. В результате расчетного и экспериментального исследования процессов в элементах АКР проведено описание режимов его работы. Созданы и исследованы эффективные термосифоны - тепловые ключи. Впервые получена информация об энергетических характеристиках АКР непрерывного действия без подвижных элементов при криогенных температурах. На базе АКР создан непрерывно работающий рефрижератор растворения изотопов гелия-3 и гелия-4 с конденсационным насосом.

Основное научное положение, новизна которого защищается автором: На термическое сопротивление термосифона, заполненного гелием-3, в диапазоне температур криостатирования 0,5...1,1 К превалирует влияние оказывают процессы теплообмена в зоне конденсации термосифона: до 0,7 К - скачок Капицы, выше 0,9 К - теплоотдача при фазовых переходах. Разный характер температурной зависимости этих факторов должен приводить к наличию минимума термического сопротивления от температуры криостатирования.

Кроме этого, автор защищает:

1. Рациональные схемные и конструктивные решения, реализованные при создании совершенных АКР непрерывного действия без подвижных элементов при криогенных температурах (А.с.№918724,966450, 1139942).

2. Разработанные и исследованные эффективные конструкции тепловых ключей в виде термосифонов с гелием-3 в качестве теплоносителя, использованные при создании АКР бесклапанного типа на уровень температур криостатирования 0,5...1,1 К.

3. Методику расчета отдельных процессов цикла подготовки к работе регенерируемого плеча АКР.

4. Энергетические характеристики совершенных АКР откачки гелия-4 и гелия-3; результаты применения АКР в качестве конденсационного насоса автономной ступени растворения изотопов гелия-3 и гелия-4 для криостатирования на уровне 0,1...0,2 К.

Основные научные результаты работы:

1. Продолжительность насыщения адсорбента парами криоагента и время его регенерации определяются как энергетическими и температурными характеристиками АКР (заданной холодопроизводительностью, температурой криостатирования), так и его конструктивными параметрами (количеством направляемого криоагента, поверхностью конденсации).

2. На начальном этапе цикла подготовки к работе регенерируемого плеча АКР осуществляется переходной процесс повышения давления во всем тракте насос-секция до давления конденсации, продолжительность которого не зависит от заполнения насоса криоагентом.

3. При регенерации насоса с постоянной тепловой нагрузкой давление в тракте практически постоянно в течение всего процесса конденсации, несмотря на двукратное повышение к концу процесса температуры адсорбата на выходе из насоса.

Практическая ценность. Результаты исследований использованы для создания надежного АКР непрерывного криостатирования объектов в диапазоне температур 0,5...1,1 К. АКР применен в качестве конденсационного насоса автономной ступени растворения изотопов гелия-3 и гелия-4, что дало возможность обеспечить криостатирование на уровне 0,1...0,2 К.

Результаты работы положены в основу разрабатываемого в ЕРФИ АКР повышенной холодопроизводительности для криостатирования объектов физики элементарных частиц, а также использованы в опытной разработке бесклапанного АКР в НПО "Гелиймаш".

Апробация работы. Основные положения и результаты работы докладывались на семинарах по физике твердого тела в ЕРФИ в 1983 - 1987 гг.; на объединенном семинаре Института физпроблем АН СССР, НПО "Гелиймаш" и ЕРФИ (г.Москва, 1986 г.); на Всесоюзном совещании по веществам для поляризованных мишеней (г.Харьков, 1986 г.).

Публикации. По теме диссертации опубликованы 3 статьи, получены 3 авторских свидетельства на изобретения.

Объем и структура диссертации. Диссертационная работа состоит из введения, пяти глав и выводов, списка литературы, включающего 119 наименований, и приложения, изложенных на 148 страницах.

СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

1. Направления совершенствования АКР откачки гелия-4, гелия-3

Применяемые в настоящее время рефрижераторы с внешней системой откачки (с бустерными и механическими насосами) обладают низкой экономичностью, значительными потерями холодопроизводительности в диапазоне от температуры криостатирования T_x до температуры окружающей среды; нуждаются в сложных в эксплуатации блоках очистки циркулирующего газа; имеют низкую надежность из-за наличия механического оборудования с ограниченным ресурсом работы.

При использовании адсорбционных насосов удается откачную систему и криостатируемую ванну совместить в одном модуле и тем самым избежать указанных недостатков. Однако эти системы значительно уступают по холодопроизводительности рефрижераторам с внешней откачкой. Производительность адсорбционного насоса можно несколько повысить за счет использования более эффективных адсорбентов (например, наладированного силикагеля) и оптимизации конструкции насоса. Анализ данных решений указывает на то, что производительность насоса по гелию-3 составит 10^{-2} моль/с. Это характерно для системы криостатирования с внешней откачкой.

Однако большинство систем криостатирования с адсорбционными насосами имеют ограниченное время непрерывной работы. Это делает невозможным применение криостатов с адсорбционной откачкой в экспериментах, требующих большой холодопроизводительности и длительного времени непрерывной работы (например, при работе на ускорителях элементарных частиц).

Предлагаемые в настоящее время схемы АКР непрерывного действия предусматривают наличие нескольких адсорбционных насосов, циклически переключаемых на откачиваемую ванну низкотемпературными клапанами. Такая же схема откачной системы присуща и рефрижераторам растворения с криогенным циклом циркуляции гелия-3, в которых откачка применяется для криостатирования камеры испарения при температурах ниже 0,7 К.

Некоторого улучшения характеристик известных АКР можно достичь за счет уменьшения потерь холодопроизводительности (использование теплообменника для регенерации холода откачиваемых паров, а также совмещение низкотемпературного клапана и адсорбционного насоса в одном блоке). Сравнительный анализ показывает, что эти усовершенствования позволяют на 15% повысить холодопроизводительность АКР при одинаковых расходах гелия-3. Но из-за наличия низкотемператур-

ных клапанов, присущих всем предлагаемым конструкциям, снижается надежность рефрижераторов с непрерывной адсорбционной откачкой. В связи с этим актуальным является создание АКР бесклапанного типа.

Полное отсутствие разработок в этом направлении предопределяет необходимость поиска новых схемных решений, создания на их основе совершенных АКР для исследования энергетических характеристик и установления эффективных режимов работы.

В предложенных автором АКР бесклапанного типа низкотемпературная ванна разделяется, по крайней мере, на две термически изолируемые и попеременно криостатируемые секции, от которых холод циклически передается объекту. Анализ схем указывает на то, что основная задача при этом - выбор и разработка эффективных тепловых ключей. На рис. 1 представлены принципиальные схемы АКР бесклапанного типа. В первой конструкции (рис. 1, а) низкотемпературная ванна выполняется из секций, сообщаемых по жидкому криоагенту и соединенных трубопроводами с отдельными насосами. Разность давлений в плечах (работакшем и регенерируемом) уравнивается гидростатическим столбом жидкого гелия-3 в секции ванны. Теплопередача в работающем пле-

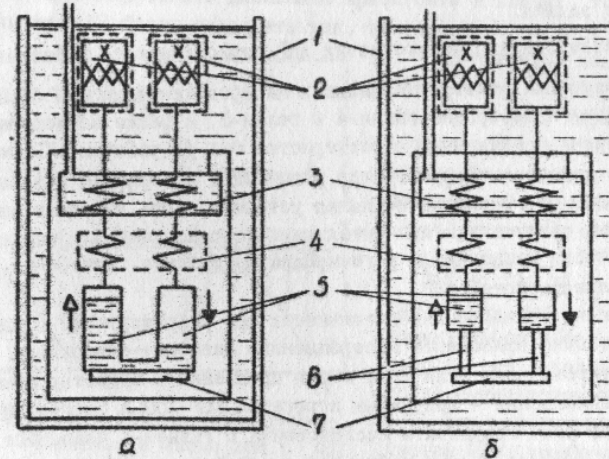


Рис. 1. Принципиальные схемы АКР бесклапанного типа: 1 - сосуд с жидким гелием-4 при 4,2К; 2 - адсорбционные насосы; 3 - конденсатор при 1,5К; 4 - двухсекционный теплообменник; 5 - секции низкотемпературных ванн; 6-тепловые ключи; 7 - криостатируемый объект.

че осуществляется за счет конвективного теплообмена в криоагенте, в регенерируемом - за счет теплопроводности. Из-за низкой теплопроводности гелия-3 тепловой поток в жидком гелии-3 будет ничтожно мал. Таким образом, при включении насоса в работу или его отключении для регенерации адсорбента с помощью данного теплового ключа значительно увеличивается или резко снижается тепловой поток в соответствующих секциях ванны.

Во второй конструкции АКР (рис. 1, б) секции низкотемпературной ванны термически сопрягаются с объектом или теплоизолируются с помощью тепловых ключей, представляющих собой тепловые трубы (термосифоны) с гелием-3 в качестве теплоносителя.

Предложенные АКР бесклапанного типа должны обладать высокой надежностью в связи с отсутствием подвижных элементов при криогенных температурах. Кроме этого, они, очевидно, будут иметь и более высокую холодопроизводительность, так как в рассмотренных конструкциях АКР исключаются дополнительные магистрали, уменьшающие быстроту откачки паров криоагента из-за просачивания через них газа из регенерируемого плеча рефрижератора.

Проведенный анализ позволил наметить основные направления совершенствования АКР откачки гелия-4 и гелия-3, сформулировать конкретные задачи.

2. Исследования характеристик АКР периодического действия

Для изучения факторов, влияющих на продолжительность процессов адсорбции и десорбции гелия-4 и гелия-3, а также исследования энергетических и временных характеристик был разработан АКР периодического действия. Рефрижератор размещался в серийном гелиевом дьюаре КГ-300/60. Экспериментальная установка была укомплектована необходимыми датчиками и измерительными устройствами для исследования процессов насыщения и регенерации адсорбента, измерения нагрузочных характеристик АКР.

Измерения холодопроизводительности $Q_{х}$ рефрижератора проводились при откачке криоагента адсорбционным насосом, содержащим 200 г активированного угля БАУ, и для сравнения с существующими системами охлаждения - вакуумным агрегатом АВР-150 с быстротой действия 150 л/с. Результаты исследований с гелием-4 указывают на то, что при $Q_{х}$ до 25 мВт наблюдается устойчивая работа адсорбционного насоса при практически постоянной температуре криостатирования $T_{х} = 0,9$ К, которая оказывается ниже $T_{х}$ (1,20...1,25 К), обеспечиваемой при откачке криоагента внешней системой. Адсорбци-

онная емкость насоса позволяла проводить двухчасовое криостатирование с $Q_{х} = 15$ мВт. При использовании гелия-3 температура криостатирования понижалась до 0,4 К.

При работе АКР исследовалась десорбция гелия-4 из адсорбента с последующей его конденсацией при 1,5 К на стенках откачной трубы, проходящей через конденсатор. При скорости конденсации 0,03л/с гелия-4, выходящего из насоса с температурой до 30 К, значительного повышения температуры конденсатора при полной регенерации насоса не наблюдалось.

Измерения скоростей откачки и регенерации гелия-4 показали, что с помощью исследованного АКР можно реализовать циклический режим работы: в течение двух часов - работа с $Q_{х} = 15$ мВт; после этого за 0,5 часа - регенерация адсорбента. Данный вывод позволяет утверждать, что конструктивным совмещением двух исследованных рефрижераторов в одной установке можно добиться непрерывного криостатирования двух термически изолированных ванн.

Анализ показывает, что для непрерывного криостатирования с помощью такого двухплечевого рефрижератора процессы в каждом плече должны осуществляться в определенной последовательности. Если основные характеристики давлением криоагента в плечах, то диаграмма работы АКР будет выглядеть так, как показано на рис. 2.

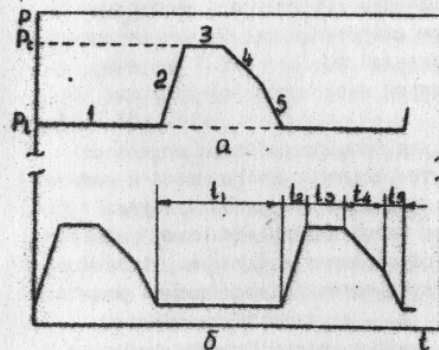


Рис. 2. Диаграммы работы плеч криомодуля: а - работающее плечо при $t = 0$; б - плечо в состоянии регенерации; 1, 2, 3, 4, 5 - фазы работы; P_1, P_2 соответствуют максимальному и минимальному давлениям в секции.

В пределах каждого пика можно выделить пять различных фаз, характеризующих состояния насоса и криоагента. Из диаграммы следует, что продолжительность рабочей фазы

$$t_1 \geq t_2 + t_3 + t_5 \quad (1)$$

где t_2, t_3, t_5 - продолжительности фаз отогрева насоса, его захлаживания и конденсации криоагента.

При известном количестве M_k криоагента в секции ванны предельная холодопроизводительность АКР непрерывного криостатирования составит:

$$Q_{x_{max}} = \frac{M_k \tau_u}{t_2 + t_3 + t_5} \quad (2)$$

где τ_u - теплота фазового перехода. При этом время t_4 фазы ожидания приравнивается к нулю.

3. Исследования процессов цикла подготовки к работе регенерируемого плеча АКР

Для подтверждения возможности непрерывного криостатирования в бесклапанном АКР был разработан двухплечевой криомодуль, обеспечивающий откачку и регенерацию криоагента таким образом, чтобы давление в плечах АКР изменялось в соответствии с диаграммой, представленной на рис. 2.

Криомодуль был сконструирован на базе гелиевого дьюара СД-II, в вакуумном кожухе которого были размещены два адсорбционных насоса, конденсатор, рекуперативный теплообменник и другие элементы. Насосы, содержащие по 400 г угля марки БАУ, заливного типа с однослойным расположением адсорбента на медных пластинах. Конденсатор представляет собой змеевиковый теплообменник, погруженный в кипящий при $\sim 1,5$ К гелий-4. Криоагент в процессе десорбции охлаждался и конденсировался внутри трубок. Рекуперативный теплообменник имел развитую поверхность для обеспечения эффективного теплообмена при незначительном гидравлическом сопротивлении. Расчетное значение перепада давлений на нем составляло не более 10^{-5} мм рт.ст. для обоих криоагентов при теплообменной поверхности со стороны каждого потока $0,35$ м².

На основе исследований криомодуля была разработана модель отдельных фаз цикла подготовки к работе регенерируемого плеча и подтверждена ее адекватность реальным процессам. Разработка модели затруднялась тем, что регенерируемое плечо АКР представляет собой сложную систему. Это, прежде всего, обусловлено следующим: насос и конденсатор взаимодействуют с тепловыми источниками, имеющими разные температуры, причем одна из них, T_n , изменяется во времени; количество адсорбата, выходящего из насоса, также переменное.

Одним из основных соотношений модели является уравнение адсорбции $F(V, P, T) = 0$, описывающее количество адсорбата V в адсорбенте при P и T . Для обоснованного выбора уравнения и расчета его параметров были проведены исследования процессов адсорбции гелия-4 на угле марки БАУ при температурах 4,2; 2К. Измерения зависимости равновесного давления P от V показали, что результаты в ко-

ординатах $\ln(V/P), V$ хорошо аппроксимируются уравнением Вильямса:

$$\ln(V/P) = A(T) + B(T)V; \quad (3)$$

$$A = -a_0 - a_1 T^{-1}; \quad B = b_0 - b_1 T^{-1}, \quad (4)$$

где a_0, a_1, b_0, b_1 - константы, определяемые из обработки экспериментальных данных.

Выявленная зависимость параметров адсорбции на угле БАУ позволила построить модель, описывающую фазы повышения давления в регенерируемом плече и последующей конденсации криоагента:

$$z_a = -R \left(\frac{\partial \ln P}{\partial T} \right)_V = R a_1 (1-m); \quad (5)$$

$$V_i \rho M_y \frac{dm}{dt} = - \frac{W_H(t)}{z_a(t)}; \quad (6)$$

$$P \left(\frac{V_n}{M} + \frac{V_c}{M} \right) = \frac{R V_i \rho M_y (m_n - m)}{M}; \quad (7)$$

$$\frac{P}{W_H(t)} \frac{\pi d R d_{ox} a_i (1-m)}{C_p} = \ln \left(\frac{T_n - T_0}{T_c - T_k} \right) + \frac{d_{ox} \tau_u}{d_k C_p (T_c - T_k)}; \quad (8)$$

$$F(T_n, T_c, m) = 0, \quad (9)$$

где z_a - теплота адсорбции; R - универсальная газовая постоянная; $V_i = a_i/b_i$; $m = V/V_i$ - степень насыщения криоагентом адсорбента; ρ - плотность адсорбата при нормальных условиях; M_y - количество адсорбата в насосе; $W_H(t)$ - мощность, выделяемая нагревателем насоса; M - молекулярная масса адсорбата; V_n - объем насоса, который может быть заполнен криоагентом при нормальных условиях; V_c - объем секции; m_n - степень насыщения адсорбента в плече при $t = 0$ (начальное заполнение адсорбента); l, d - длина и внутренний диаметр трубки змеевика конденсатора; d_{ox}, d_k - коэффициенты теплоотдачи при охлаждении криоагента и его конденсации; C_p - теплоемкость адсорбата; T_n, T_k, T_c - соответственно температуры насоса, конденсатора и накапливаемого в секции адсорбата (температура секции).

Уравнение (5) устанавливает связь между теплотой адсорбции z_a и значением m . Уравнение (6) характеризует динамику десорбции. Для обеспечения замкнутости модели в нее включены уравнения (7) и (8). Их использование вызвано тем, что цикл подготовки к работе регенерируемого плеча (фазы 2 и 3 на рис. 2 диаграммы) условно разделен на три этапа: опорожнение гелия из охлаждающей рубашки насоса; повышение в плече давления до P_c при заполнении его

криоагентом; конденсация криоагента и накопление его в секции.

Время первого этапа определяется количеством жидкого гелия в охлаждающей рубашке насоса и мощностью $W_H(t)$. На втором этапе десорбируемый газ заполняет два объема V_H и V_C с отличающимися температурами T_H и $T_C \approx T_K$. Это позволяет связать величины P, T_H, m функциональной зависимостью (7). На третьем этапе характер зависимости температур насоса T_H и секции T_C от m и, соответственно, от времени с учетом (5) и (6) описывается уравнением теплопередачи конденсатора (8). Уравнение (9) получено на основе (3), (4) и зависимости давления насыщенных паров адсорбата от температуры.

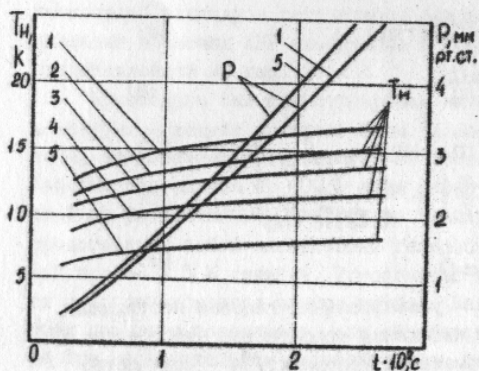


Рис. 3. Зависимости температуры насоса T_H и давления P в плече от времени при $W_H = 315$ мВт на втором этапе регенерации при значениях m_n : 1 - 0,1; 2 - 0,15; 3 - 0,2; 4 - 0,3; 5 - 0,5.

ностью отрегенировать адсорбент и переключить насосы. Процесс регенерации, как показывает анализ, может контролироваться только по значению измеряемой температуры $T_H(t)$. Более частое переключение насосов лимитируется повышенным расходом гелия-4 на захолаживание насоса после регенерации, а также на охлаждение и конденсацию адсорбата.

На рис. 3 представлены зависимости P и T_H в тракте насос-секция от времени t на втором этапе регенерации при использовании в насосе гелия-4. Расчеты проводились при разных значениях m_n и одинаковой мощности $W_H = 315$ мВт. В качестве исходных данных использо-

Решение системы уравнений (3)-(9) позволяет определить зависимости $m(t), P(t), T_H(t), T_C(t)$ на основных этапах регенерации насоса. Это дает возможность проводить расчет динамических характеристик АКР. Кроме этого, данная информация позволяет эффективно управлять, изменяя W_H , процессом регенерации таким образом, чтобы за время t_s (время захолаживания насоса, определяемое экспериментально) до окончания функционирования работающего плеча (время откачки $t_1 = M_k Z_u(T_H)/Q_H(T_H)$) полностью

ваны параметры созданного криомодуля. Из рис. 3 видно, что давление P в тракте при переходном процессе приблизительно линейно увеличивается во времени и практически не зависит от начального заполнения m_n . Температура же насосов существенно изменяется при вариациях начального заполнения адсорбента m_n , увеличиваясь с его уменьшением. Особенностью переходного процесса, как показывают расчеты, является то, что время увеличения давления в тракте до давления в конденсаторе практически одинаково при любых начальных заполнениях. Например, из сравнения кривых 1 и 5 видно, что давление возрастает до 3 мм рт.ст. практически за одно и то же время (~ 3 мин) при $m_n = 0,1$ и $0,5$.

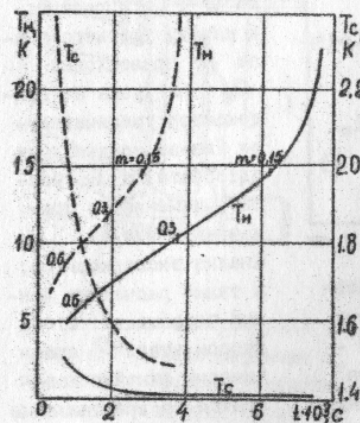


Рис. 4. Зависимости температуры насоса T_H и стекающей жидкости T_C от времени на третьем этапе регенерации при разных мощностях нагревателя W_H (1260 мВт - пунктирные линии; 630 мВт - сплошные). Вертикальными черточками обозначены текущие значения степени насыщения m .

криомодуля измерялись давления в конденсаторе P_K и секции P

На рис. 4 показаны примеры конкретного численного расчета зависимостей T_H и T_C для гелия-4 на третьем этапе регенерации при двух различных мощностях $W_H = 1260$ мВт и $W_H = 630$ мВт. Как и в предыдущих расчетах, использовались параметры исследованного криомодуля. Из анализа кривых следует, что температура T_C стекающей жидкости сильно зависит от мощности нагревателя W_H и текущего значения $m(t)$. Однако при степенях насыщения $m < 0,3$ разность между температурами стекающей жидкости T_C и конденсатора T_K незначительна (не более 0,2 К), а сама температура T_C стремится к температуре конденсатора $T_K = 1,4$ К.

Расчеты выявили также важную для управления АКР зависимость в поведении системы: температуре насоса можно в однозначное соответствие поставить степень насыщения адсорбента, что и подтверждается данными, приведенными на рис. 4.

Была проведена экспериментальная проверка построенной выше модели. В процессе исследования

а также сопротивления $R(T)$ угольного термометра на выходе из насоса. Исследования проводились при начальных заполнениях m_n , равных 0,5; 0,3; 0,2; 0,15; 0,1, с постоянными значениями W_n . Адсорбатом являлся гелий-4. Построенные по измеренным $R(T)$, P_k , P зависимости T_n , T_k , T_c и P от времени приведены на рис. 5.

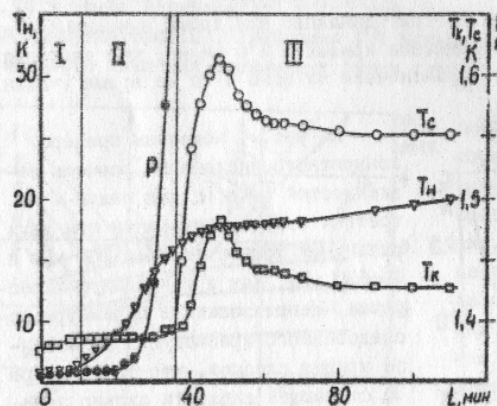


Рис. 5. Экспериментальные кривые зависимостей T_n , T_k , T_c , P от времени при $m_n = 0,15$ и $W_n = 315$ мВт; I, II и III - соответственно этапы опорожнения гелия из охлаждающей рубашки насоса; повышения в плече давления до P_c ; конденсации криоагента.

меньше времени третьего, в связи с этим количество выходящего из насоса адсорбата составляет несколько процентов от начального заполнения; 3) несмотря на почти двукратное повышение температуры выходящего из насоса адсорбата в конце третьего этапа, температура стекающего криоагента не повышается, если достаточной является поверхность конденсатора.

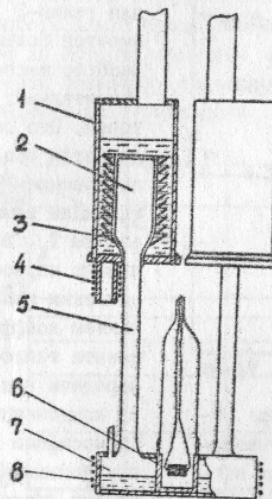
В целом расчетная модель на обоих этапах регенерации качественно хорошо согласуется с экспериментальными данными. Некоторое несоответствие масштабов времени связано с тем, что согласно расчетной модели вся тепловая нагрузка W_n , выделяемая нагревателем насоса, расходуется только на теплоту десорбции.

Из анализа кривых можно выделить основные этапы регенерации: на первом этапе P , T_n , T_k - постоянны; на втором этапе P , T_n - растут; к началу третьего этапа P превосходит P_k , нагрузка на конденсатор увеличивается (из-за конденсации адсорбата) и T_k растет, изменяется производная dT_n/dt .

Анализ экспериментов, а также расчетных данных показывает: 1) на втором этапе P практически линейно изменяется во времени и не зависит от начального заполнения; 2) время второго этапа намного

4. Энергетические характеристики АКР

Для разработки АКР непрерывного действия на основе криомодуля необходимо было решить задачу создания эффективных тепловых ключей. В работе исследовались два типа ключей, которые схематически представлены на рис. 1. Сравнительные испытания двух типов ключей показали, что при одинаковой холодопроизводительности более низкие температуры T_x достигаются в рефрижераторе, использующем тепловые ключи - термосифоны с гелием-3 в качестве теплоносителя.



На рис. 6 представлена конструкция низкотемпературной части АКР с тепловыми ключами указанного типа.

Для уменьшения термического сопротивления наружная поверхность зоны конденсации термосифона имела горизонтально расположенные ребра. Энергетические характеристики АКР исследовались при работе на двух криоагентах: гелии-4 и гелии-3. Теплоносителем термосифона в обоих случаях служил гелий-3. На рис. 7 изображены результаты экспериментов.

Рис. 6. Низкотемпературная часть АКР с термосифонами с гелием-3 в качестве теплоносителя: 1 - секция низкотемпературной ванны; 2 - зона конденсации; 3 - горизонтальные ребра; 4 - нагреватель секции; 5 - адиабатная зона; 6 - угольный термометр сопротивления; 7 - общая зона испарения (общая ванна); 8 - нагреватель общей ванны.

Зависимости установившихся температур T_x общей ванны и секции T_x^c от тепловой нагрузки построены по данным многодневных измерений характеристик обоих плеч рефрижератора. Измерения проводились в произвольный момент цикла откачки. Верхние кривые для гелия-4 и гелия-3 на рис. 7 дают представление об энергетических

характеристиках АКР $Q_x = f(T_x)$. Подтверждением эффективности тепловых ключей данного типа является то, что перепад температур на термосифоне при работе АКР на гелии-3 с Q_x до 5 мВт не превосходит

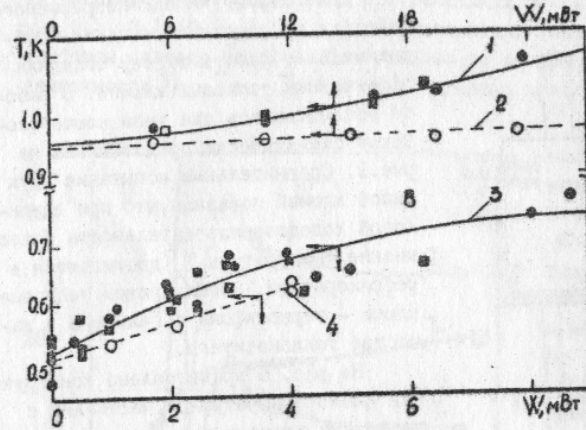


Рис. 7. Энергетические характеристики АКР при работе с гелием-4 (1,2) и гелием-3 (3,4). Пунктирные и сплошные линии соответствуют тепловым нагрузкам, выделяемым соответственно на секции и общей ванне.

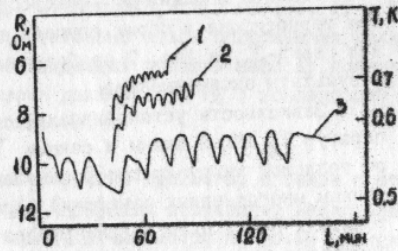


Рис. 8. Записи сопротивлений угольного термометра во времени при различных Q_x : 1 - 5; 2 - 3; 3 - 1 мВт.

рис. 7 для гелия-4 практически нет разброса экспериментальных точек при $Q_x = idem$.

Исследования рефрижератора с системой термосифонов как тепло-

вых ключей дали возможность провести анализ работы термосифонов этой конструкции. Перепад температуры ΔT на термосифоне, определяемый по измеренным значениям температур на секции и на общей ванне, позволил определить его полное термическое сопротивление. Это сопротивление представляет собой сумму частных сопротивлений, каждое из которых отвечает определенному механизму теплопередачи. Оценки показали, что наибольшим термосопротивлением обладает зона конденсации термосифона.

На рис. 8 представлены записи температур по показаниям термометра сопротивления для трех значений Q_x .

Аналогичные исследования в случае, когда в качестве криоагента использовался гелий-4, показали, что осцилляции температуры отсутствуют из-за сверхтеплопроводности криоагента. Поэтому на кривых

Рис. 9. Зависимости термосопротивления термосифона от температуры общей ванны: кривые 1, 2 построены соответственно по данным для скачка Капицы и по формуле Нуссельта; \circ - обозначены экспериментальные точки.

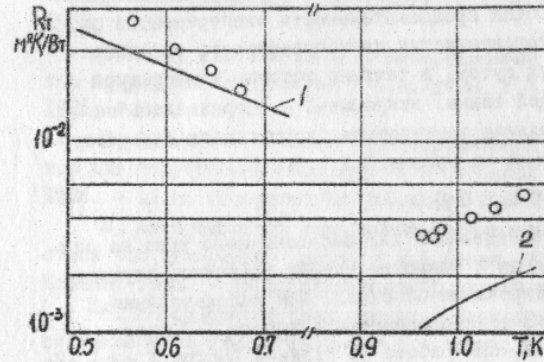


Рис. 9. Зависимости термосопротивления термосифона от температуры общей ванны: кривые 1, 2 построены соответственно по данным для скачка Капицы и по формуле Нуссельта; \circ - обозначены экспериментальные точки.

0,7 К) термосопротивление исследованного термосифона в значительной мере определяется скачком Капицы. В области несколько более высоких температур (0,9...1,1 К) расчетная кривая и экспериментальные точки дают качественно одинаковый характер зависимости от температуры. Количественное расхождение вызвано тем, что не учитывается скачок Капицы. Следовательно, можно утверждать, что эффективность теплопередачи в области низких температур, в основном, обусловлена проявлением скачка Капицы, а в области высоких температур - разностью между паровой и жидкой фазами гелия-3 при конденсации. Разная зависимость этих факторов от температуры приводит к минимуму термического сопротивления рассмотренных тепловых ключей.

Проведенные исследования позволили создать АКР бесклапанного

xv 881

ИНСТИТУТ ХОЛОДА
ОНАХТ

типа с относительно большой холодопроизводительностью для непрерывного криостатирования объектов в диапазоне температур 0,5...1,1 К.

Исследования АКР показали, что температурный уровень криостатирования и холодопроизводительность АКР вполне достаточны для конденсации паров смеси гелия-3 и гелия-4, поступающих из камеры испарения рефрижератора растворения изотопов. Для определения работоспособности такого рефрижератора с АКР была состыкована автономная ступень растворения, изготовленная в НПО "Гелиймаш". Конденсационным насосом для циркуляции смеси в автономной ступени служило дно общей ванны АКР. Общая продолжительность экспериментов по изучению энергетических характеристик двухступенчатого рефрижератора составляла более двух суток, в течение которых температура верхней ступени (т.е. общей ванны) непрерывно поддерживалась на уровне 0,5...0,7 К. Предельная температура, достигаемая в двухступенчатом рефрижераторе, была на уровне 0,1...0,2 К.

ВЫВОДЫ

1. Предложенные и исследованные АКР бесклапанного типа на основе двухплечевого криомодуля и тепловых ключей позволяют осуществлять непрерывное криостатирование объектов. При использовании в качестве криоагента гелия-3 холодопроизводительность АКР при $T_x \sim 0,6$ К составляет 5 мВт, при работе на гелии-4 Q_x при $T_x \sim 1,1$ К достигает 30 мВт.

2. Исследованные термосифоны, использующие в качестве теплоносителя гелий-3, являются эффективными тепловыми ключами в диапазоне температур 0,5...1,1 К. Данные ключи характеризуются предпочтительной температурной областью использования, которой соответствует минимум их термосопротивления.

3. Экспериментальное изучение адсорбции гелия-4 на активированном угле БАУ показывает, что изотерма адсорбции при температуре 4,2 К является прямой линией в координатах $\ln(V/P), V$ и поэтому может быть описана формулой Вильямса.

4. Предложенная методика расчета характеристик процесса регенерации позволяет определять наиболее эффективный режим переключения плеч АКР. При этом процесс может контролироваться и управляться только по данным измерения одной величины - температуры адсорбата на выходе из насоса.

5. Наблюдаемые на криостатируемом объекте осцилляции температуры вызваны периодическим изменением коэффициента теплопередачи термосифона в зоне его конденсации в связи с понижением уровня

гелия-3 внутри секции. Отсутствие осцилляций при работе АКР на гелии-4 связано со сверхтеплопроводностью последнего.

Основное содержание диссертации опубликовано в работах:

1. А.с. 918724 (СССР). Адсорбционный криогенный рефрижератор непрерывного действия / А.А.Ароян, Р.Т.Мина, Г.Д.Мовсесян. - Оpubл. в Б.И., 1982, № 13.

2. А.с. 966450 (СССР). Адсорбционный криогенный рефрижератор непрерывного действия / А.А.Ароян, Р.Т.Мина. - Оpubл. в Б.И., 1982, 1. 38.

3. А.с. 1139942 (СССР). Адсорбционный криогенный рефрижератор непрерывного действия / А.А.Ароян, Р.Т.Мина. - Оpubл. в Б.И., 1985, № 6.

4. Ароян А.А., Мина Р.Т. Адсорбционный криогенный рефрижератор для получения температур ~ 1 К откачкой гелия-4. - Ереван, 1984. - II с. (Препринт/Ер.физ.ин-т: ЕФИ-709(24)-84).

5. Адсорбционный криогенный рефрижератор непрерывного действия без движущихся узлов. / А.А.Ароян, М.А.Арутюнян, Р.Т.Мина. Ереван, 1985. - 19 с. (Препринт/Ер.физ.ин-т: ЕФИ-749(76)-85).

6. Рефрижератор растворения с бесклапанной адсорбционной системой циркуляции гелия-3 / А.А.Ароян, М.А.Арутюнян, Р.Т.Мина, С.Т.Болдарев, В.М.Мишачев, Р.Г.Амамчян. - Ереван, 1986. - 16 с. (Препринт/Ер.физ.ин-т: ЕФИ-937(88)-86).

Условные обозначения

T - температура; P - давление; V - объем; γ_u, γ_a - теплоты фазового перехода и адсорбции; R - универсальная газовая постоянная; ρ - плотность адсорбата при нормальных условиях; m - степень насыщения адсорбента; m_n - начальное заполнение адсорбента; M_y - количество адсорбента в насосе; W - тепловая нагрузка; R_T - термосопротивление термосифона.

Индексы

X - криостатируемый объект; H - насос; K - конденсатор; C - секция.

Ротапринт ОТИХП г.Одесса зак 3-87 тираж 100
объем 1,0 п.л.

188vx

ЛАНДРОХ СУСТАВОМ