

Автореферат
3-69

ОДЕССКИЙ ИНСТИТУТ НИЗКОТЕМПЕРАТУРНОЙ ТЕХНИКИ И ЭНЕРГЕТИКИ

На правах рукописи

ЗМИГРОЧЕНКО Юрий Владимирович

УДК 621.592

СОВЕРШЕНСТВОВАНИЕ АДСОРБЦИОННОГО КРИОГЕННОГО
РЕФРИЖЕРАТОРА НА УРОВЕНЬ 60 К

Специальность 05.04.03 - Машины и аппараты холодильной
и криогенной техники и систем кондиционирования

А В Т О Р Е Ф Е Р А Т

диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук



Одесса - 1992

Работа выполнена в Одесском институте низкотемпературной техники и энергетики

Научный руководитель - доктор технических наук, профессор
Г.К.Лавренченко

Официальные оппоненты - доктор химических наук, профессор
А.Л.Цыкало;

кандидат технических наук, доцент
В.М.Браун

Ведущая организация - СКТБ по криогенной технике с опытным
производством СТИПТ АН Украины,
г. Харьков

Защита диссертации состоится "7" января 1993 г.
в 11⁰⁰ часов на заседании специализированного Совета К.068.27.01
при Одесском институте низкотемпературной техники и энергетики
по адресу: 270057, г.Одесса, ул. Петра Великого, 1/3, ОИНТЭ.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке института.

Автореферат разослан "3" декабря 1992 г.

Р.К.Никульшин

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы. В последние годы в связи с разработкой различных устройств на базе высокотемпературных сверхпроводников появилась потребность в системах криостатирования на уровень температур до 60 К. Эти системы с учетом специфичности объектов охлаждения не должны создавать магнитные и электрические поля, вызывать вибрации.

Указанным требованиям могут удовлетворять системы, основанные на откачке жидкого либо твердого криоагента. К ним можно отнести и системы охлаждения с адсорбционной откачкой, называемые адсорбционными криогенными рефрижераторами (АКР). Такие системы уже находят свое применение в области сверхнизких температур. Охладители на базе АКР имеют такие достоинства, как надежность, простота конструкции и управления, возможность выполнения из немагнитных материалов, что делает выгодным их использование и на более высоких уровнях криостатирования, в частности, до 60 К. При этом, АКР могут выступать в качестве нижних ступеней систем охлаждения каскадного типа.

Для создания предпосылок к более широкому применению АКР необходимо провести комплексные исследования, направленные на повышение их эффективности, особенно, при использовании для криостатирования на уровень 60 К.

Целью работы является проведение теоретических и экспериментальных исследований систем охлаждения на базе АКР периодического и непрерывного действия на уровень 60 К, а также создание на основе полученных результатов программы режимной и конструктивной оптимизации АКР.

Поставленная цель достигается решением следующих основных задач: поиск наилучших адсорбента и рабочего тела для обеспечения эффективного функционирования АКР на температурном уровне 60 К; поиск новых схемных и конструктивных решений для создания более совершенной системы охлаждения на базе АКР; решение задачи расчета фаз временной диаграммы работы АКР с учетом его особенностей; постановка и решение задачи оптимизации режимных и конструктивных параметров АКР.

Научная новизна. С учетом особенностей регенерации тепла предложено новое схемное решение непрерывнодействующего АКР; подтверждена возможность создания безмашинной (не содержащей движущиеся элементы в холодной части и работающей с использованием холода жидкого криопродукта) системы охлаждения для криостатирова-

ния на уровне 60 К только с двумя адсорбционными насосами; среди класса существующих цеолитов, силикагелей и активированных углей найден наиболее эффективный адсорбент для выбранного рабочего тела АКР на уровень 60 К; установлены зависимости энергетических характеристик АКР на уровень 60 К от ряда режимных и конструктивных параметров адсорбционных насосов.

Основные научные положения, защищаемые в работе:

1. При использовании наиболее эффективных адсорбента (активированного угля) и рабочего тела (кислорода) можно создать непрерывнодействующий АКР на уровень криостатирования 60 К с двумя адсорбционными насосами.

2. В непрерывнодействующем АКР на уровень 60 К следует использовать теплообменники-регенераторы.

3. В АКР, создаваемом на уровень криостатирования 60 К, адсорбционные процессы в насадке насосов должны реализовываться при температурах не выше 90-95 К.

Кроме этого, автор защищает:

1. Наиболее эффективные адсорбент и рабочее тело для АКР, работающего на уровне 60 К.

2. Энергетические характеристики указанного рефрижератора.

3. Методику расчета фаз временной диаграммы работы АКР.

4. Программу для определения оптимальных режимных и конструктивных параметров АКР.

Основные научные результаты:

1. Преимущественное влияние на эффективность работы АКР при производстве холода на уровне 60 К оказывают: при охлаждении адсорбционных насосов в диапазоне температур 77-90 К - ухудшение процессов теплообмена в слое адсорбента; свыше 90 К - низкая интенсивность адсорбционных процессов.

2. При использовании в АКР в качестве рабочего тела смеси газов O_2-N_2 величина предельной концентрации азота в валовом составе в зависимости от типа адсорбента лежит в диапазоне 0,2-0,3 моль/моль.

3. Эффективность работы АКР на смеси газов O_2-N_2 ниже, чем в случае применения чистого кислорода.

4. Существует диапазон оптимальных диаметров цилиндрических адсорбционных насосов, обеспечивающих максимум холодопроизводительности АКР.

Практическая ценность работы. Разработаны экспериментальный

и макетный образцы безмасляной системы охлаждения на базе АКР для уровня криостатирования 60 К, использующего в качестве источника охлаждения адсорбционных насосов жидкий азот. На основе исследованного АКР может быть создана система охлаждения с другими источниками холода для адсорбционных насосов на уровне 90-95 К. Пакет программ может быть рекомендован для расчета оптимальных энергетических и конструктивных параметров непрерывнодействующего АКР на различных температурных уровнях.

Публикации. По теме диссертации опубликовано 3 печатные работы.

Апробация работы. Основные результаты исследований по данной теме докладывались на научно-технических конференциях ОИИТЭ.

Структура и объем диссертации. Работа изложена на 120 страницах машинописного текста, содержит 28 рисунков, 8 таблиц и состоит из введения, четырех глав, списка литературы из 57 названий, приложения на 14 страницах.

СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

1. Выбор рабочих тел и адсорбентов для АКР на уровень криостатирования 60 К

Одной из основных задач, возникающих при разработке АКР на уровень 60 К, является выбор адсорбентов и рабочего тела рефрижератора. Для производства холода на уровне температур 60 К необходимо использовать криоагенты, имеющие низкую температуру кристаллизации. Таковым является, например, кислород с температурой плавления 54,4 К; привлекает внимание также смесь кислорода с азотом (при отношении содержаний N_2 и O_2 в жидкой фазе $x_{N_2}/x_{O_2} = 0,28$ она образует эвтектику при температуре около 50 К). Данные по адсорбции газов, опубликованные в ряде научных работ, могут служить основанием для предварительного выбора эффективного адсорбента. Окончательно решить эту задачу можно лишь при условии всестороннего исследования работы АКР на тех или иных рабочих телах и адсорбентах.

Сравнительные испытания проводились на установке, моделирующей работу АКР периодического действия (см. рис. 1, а).

В качестве определяющих параметров сравнения в ходе экспериментов были выбраны: температура криостатирования T_x (измерялась с помощью термодатчика, расположенного на доньшке испарителя);

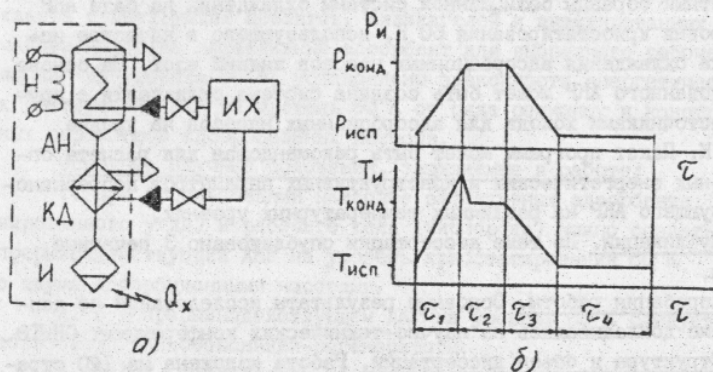


Рис. 1. АКР периодического действия (а) и временная диаграмма его работы (б).

тепловыделения объекта охлаждения Q_x (имитировались с помощью константановой грелки, размещенной также на испарителе); соответствие временного цикла АКР следующему условию:

$$\tau_1 + \tau_2 + \tau_3 \leq \tau_4, \quad (I)$$

где τ_1 - время отогрева адсорбционного насоса; τ_2 - время регенерации и конденсации рабочего тела; τ_3 - время выхода на рабочий режим; τ_4 - время рабочего режима.

Указанные в неравенстве (I) величины характеризуют временные фазы работы АКР. Это условие определяет возможность непрерывной работы адсорбционного рефрижератора, имеющего два плеча, каждое из которых представляет собой периодически действующий АКР.

Соответствующие условию (I) изменения во времени давления $P_{и}$ и температуры $T_{и}$ в испарителе (временная диаграмма АКР, работающего периодически) представлены на рис. 1, б. Значения $P_{конд}$ и $T_{конд}$ отвечают давлению и температуре рабочего тела в испарителе в период второй фазы работы АКР (в течение времени τ_2), а $P_{исп}$ и $T_{исп}$ - в период рабочего режима (τ_4). Значение $T_{исп}$ отличается от T_x на величину температурного напора из-за термического сопротивления доньшка испарителя и неравновесности процесса кипения рабочего тела.

Поиск адсорбентов и рабочих тел для АКР на уровень 60 К проводился в несколько этапов. Вначале были определены основные требования, предъявляемые к адсорбентам, и, в соответствии с этим, выбраны наиболее приемлемые из них для работы в АКР. К таким ад-

сорбентам следует отнести некоторые типы цеолитов и активированных углей. Их исследования вначале велись на чистом кислороде. В процессе испытаний в адсорбенты для улучшения их теплофизических характеристик добавлялся металлический наполнитель (МН) в виде латунной крошки, имеющей размеры, сопоставимые с размером гранул адсорбента. Исследованиями установлено, что МН должен в зависимости от типа адсорбента занимать 20-40% общего объема адсорбционного насоса. Затем наиболее эффективные адсорбенты испытывались на смеси кислорода с азотом.

Обобщенные результаты испытаний различных типов адсорбентов на чистом кислороде, представленные в табл. I, получены при следующих условиях: тепловыделения на имитаторе объекта охлаждения отсутствовали (теплопритоки, определяемые расчетно-экспериментальным путем, составили 0,3-0,35 Вт); нагрузка на адсорбционный насос в процессе регенерации (фазы τ_1 и τ_2) во всех случаях поддерживалась постоянной и равнялась 20 Вт; температура отогрева адсорбента (окончание фазы τ_2) составляла 160-200 К; холодный источник имитировался кипящим при атмосферном давлении азотом.

Таблица I

№	Адсорбент	Время фаз в среднем, мин.				Температура криостатирования T_x , К
		τ_1	τ_2	τ_3	τ_4	
1.	Цеолит NaA	7	14	22	9	63-64
2.	Вакуум.цеолит CaEH-4B	4	8	18	9	70-71
3.	Цеолит NaX	5	12	21	10	60,5-61,5
4.	80% NaX + 20% МН	4	8	13	10	60-61
5.	60% NaX + 40% МН	4	7	13	12	58,5-59,5
6.	Актив. уголь СКТ-6	6	8	12	30	58,5-59,5
7.	80% СКТ-6 + 20% МН	5	7	11	27	58-59

Из таблицы следует, что среди исследованных адсорбентов только активированный уголь типа СКТ в чистом виде и с наполнителем отвечает условию (I). Это указывает на то, что на основе двух периодически действующих АКР, заполненных этим адсорбентом, можно создать адсорбционный рефрижератор непрерывного действия.

Данный АКР, как видно из рис. 2, при использовании СКТ-6 будет в диапазоне исследованных температур криостатирования обеспечивать также и наибольшую холодопроизводительность.

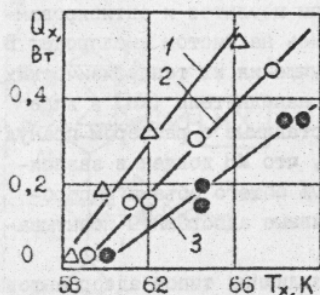


Рис. 2. Температурная зависимость холодопроизводительности АКР для адсорбентов: 1- СКТ-6; 2- NaX с 40% Mn; 3- NaX с 20% Mn.

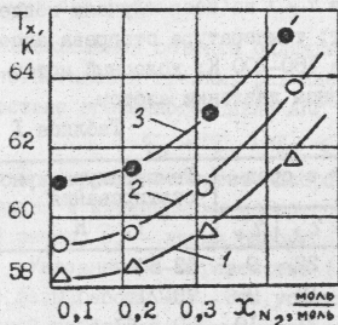


Рис. 3. Влияние содержания азота в смеси на начальную температуру кристаллирования для адсорбентов: 1- СКТ-6; 2- NaX с 40% Mn; 3- смесь цеолитов CaA-NaX с 30% Mn.

На следующем этапе поиска оптимального рабочего тела была исследована смесь O_2-N_2 указанного выше состава. Условия ее исследования были аналогичны тем, которые применялись в случае чистого кислорода. Изучение процессов, реализуемых в АКР, показали, что обеспечить самопроизвольно нужное соотношение компонентов в испарителе рефрижератора практически невозможно. Объясняется это тем, что азот и кислород по-разному поглощаются адсорбентом. Поэтому имело смысл исследовать определенный диапазон концентраций смеси O_2-N_2 , близких к указанному.

Исследования показали, что на угле СКТ-6 и цеолите NaX с наполнителем температуру ниже 60 К удается поддерживать при содержании N_2 в валовом составе смеси не более 20-30% (рис. 3, кривые 1 и 2). Кривая 3 характеризует зависимость от содержания азота для смеси цеолитов, состоящей из CaA, который адсорбирует преимущественно азот, и NaX, хорошо поглощающего кислород. Однако, и с помощью избирательной адсорбции, как видно из рис. 3, не удается улучшить энергетические характеристики АКР при его работе на смеси веществ. Кроме того, при работе АКР на смеси криоагентов наблюдается непостоянство температур конденсации и кристаллирования, а также более короткий рабочий режим по сравнению с использованием чистого вещества ($\tau_{4_{O_2-N_2}} < \tau_{4_{O_2}}$). Последнее обстоятельство затрудняет выполнение условия (I).

Таким образом, наиболее эффективным представляется применение кислорода в качестве рабочего тела АКР при криостатировании на уровне 60 К в сочетании его с активированным углем марки СКТ-6.

2. Расчетно-теоретические исследования АКР непрерывного действия

Решение задачи оптимизации АКР должно быть направлено на поиск оптимальных режимных и конструктивных параметров конкретного рефрижератора. В качестве целевой функции выбран эксергетический КПД АКР ζ_e^A . Исходя из особенностей работы АКР с двумя адсорбционными насосами, величину ζ_e^A можно представить в виде:

$$\zeta_e^A = \frac{Q_x \tau_x |1 - T_{oc} / T_x|}{N_p \tau_N + (Q_A \tau_A + Q_K \tau_K) |1 - T_{oc} / T_A|}, \quad (2)$$

где N_p - мощность нагревателей, используемых для регенерации адсорбента (фазы τ_1 и τ_2); Q_A - нагрузка на адсорбционный насос (фазы τ_3 и τ_4); Q_K - нагрузка на конденсатор (фаза τ_2); T_{oc} , T_A - температуры, соответственно, окружающей среды и охлаждения адсорбента. Кроме того, $\tau_x = \tau_4$; $\tau_N = 2(\tau_1 + \tau_2)$; $\tau_A = 2\tau_3 + \tau_4$; $\tau_K = \tau_2$; $\tau_4 = \tau_1 + \tau_2 + \tau_3 + \tau_4$.

При заданных Q_x и T_x на эффективность АКР прежде всего влияют величины N_p и T_A , а также T_p - температура отогрева адсорбента (конец фазы τ_2), и габаритные характеристики адсорбционных насосов (d_u - диаметр цилиндра; H_u - его высота). Очевидно, что перечисленные величины следует считать основными при общей постановке оптимизационной задачи, которая сводится к следующему: найти $d_u^*, H_u^*, N_p^*, T_p^*, T_A^* \equiv opt \{d_u, H_u, N_p, T_p, T_A\} \rightarrow Max \zeta_e^A$ (3) при выполнении условия (I) и следующих неравенств:

$$\begin{aligned} & \frac{1}{\tau_4} \{z(T_x)[m_K - m_3] - q_{тп}\} - Q_x \geq \delta; \\ & d_{u\min} \leq d_u \leq d_{u\max}; H_{u\min} \leq H_u \leq H_{u\max}; \\ & N_{p\min} \leq N_p \leq N_{p\max}; T_{p\min} \leq T_p \leq T_{p\max}; T_{A\min} \leq T_A \leq T_{A\max}; \\ & T_A \leq \bar{T}_i \leq T_p; P_{исп} \leq P_u \leq P_{конд}; T_x \leq T_u \leq T_{конд}. \end{aligned} \quad (4)$$

Чтобы обеспечить выполнение условия (I), нужно располагать надежно методикой расчета фаз временной диаграммы АКР, которая должна базироваться на расчете параметров следующих основных процессов: адсорбция и десорбция рабочего тела в адсорбционном насосе (данный расчет тесно связан с определением температуры адсорбента, находящегося в охлаждаемом либо нагреваемом цилиндре); откачка паров кипящей криожидкости (расчет направлен на определение температуры в испарителе); конденсация рабочего тела (определяется нагрузка на конденсатор).

На основе перечисленных процессов разработана математическая модель непрерывнодействующего АНР, которая включает в себя указанные ниже соотношения:

1. Уравнения для определения температуры адсорбента $\bar{T}_i(\tau_i)$ в i -тый момент времени в процессе адсорбции

$$\bar{T}_i(\tau_i) = T_A + (T_P - T_A) \sum_{n=1}^{\infty} \frac{4}{M_n^2} \exp(-M_n^2 Fo) \quad (5)$$

при $T(R, \tau_i) = T_A$; $\bar{T}_i(0) = T_P$; $R = d_u/2$,

и в процессе десорбции

$$\frac{\bar{T}_i(\tau_i)}{T_A} = 1 + Pd \left[Fo - \frac{1}{8} \left(1 + \frac{4}{Bi} \right) + \sum_{n=1}^{\infty} \frac{1}{M_n^2} B_n \exp(-M_n^2 Fo) \right] \quad (6)$$

при $T(R, \tau_i) = T_A + h\tau_i$; $T(R, \tau_i) \leq T_P$; $\bar{T}_i(0) = T_A$; $Bi \rightarrow \infty$,

где $Fo = \lambda_a \tau_i / (c_a \rho_a R^2)$; $Pd = c_a \rho_a h R^2 / (\lambda_a T_A)$;

λ_a, c_a - теплофизические свойства засыпки адсорбента; ρ_a - плотность засыпки адсорбента; h, M_n, B_n - экспериментальная и теоретические константы.

2. Уравнения для расчета производительности адсорбционного насоса:

$$a_i = a_0 \exp[-\alpha (\bar{T}_i - T_0)]; \quad (7)$$

$$R_A = (a_{i-1} - a_i) / (\tau_i - \tau_{i-1}); \quad (8)$$

$$V_A = (a_i - a_{i-1}) / (\tau_i - \tau_{i-1}), \quad (9)$$

где a_{i-1} и a_i - адсорбционная емкость насоса в $(i-1)$ -ый и i -тый моменты времени; R_A, V_A - соответственно, десорбционная и адсорбционная производительности насоса; a_0, T_0, α - параметры уравнения адсорбции, зависящие от свойств адсорбента и рабочего тела.

3. Уравнения для расчета нагрузки на адсорбционный насос

$$Q_A(\tau_3 + \tau_4) = M_{ag} C_a (T_P - T_A) + Z_a; \quad (10)$$

теплоты адсорбции (для кислорода $q_a \approx 485$ кДж/кг)

$$Z_a = q_a m_k; \quad (11)$$

нагрузки на конденсатор

$$Q_k \tau_2 = m_k (i_B - i_J); \quad (12)$$

$$\ln \left[\frac{m_k}{(m_k - m_3)} \right] = Z [(T_{кр} - T_{и})^n - (T_{кр} - T_{комд})^n]; \quad (13)$$

холодопроизводительности рефрижератора

$$Q_x \tau_4 = Z(T_x) \cdot [m_k - m_3] - q_{тп}, \quad (14)$$

где M_{ag} - масса адсорбента; i_B, i_J - энтальпии рабочего тела, соответственно, при параметрах выхода из адсорбционного насоса и при сливе в испаритель; m_k - начальная масса криожидкости в испарителе; m_3 - количество откачанного рабочего тела; Z, n - коэффициенты, учитывающие термодинамические и теплофизические свойства криоагента; $Z(T_x)$ - теплота испарения рабочего тела при заданной температуре криостатирования; $q_{тп}$ - потери холода от теплопритоков; подстрочные индексы соответствуют фазам временной диаграммы АКР (см. рис. 2).

Задача расчетного построения временной диаграммы и оптимизации АКР является многопараметрической задачей высокого уровня сложности. Поэтому при ее решении важно было ввести обоснованные ограничения на переменные и принять ряд упрощающих допущений: теоретически возможные законы распределения температуры в слое адсорбента могут быть реализованы в конкретной конструкции адсорбционного насоса; насос рассматривался как неограниченный цилиндр с исчезающе малым термическим сопротивлением стенки; не учитывались потери холодопроизводительности из-за гидравлических сопротивлений и неравновесности процесса откачки рабочего тела; теплоемкость испарителя пренебрегали; величина потерь из-за теплопритоков к испарителю АКР рассматривалась как часть холодопроизводительности рефрижератора.

Реализация описанной модели позволила провести расчетные исследования влияния габаритных размеров и режимов работы адсорбционных насосов на энергетические характеристики АКР.

Расчеты ξ_a^A для разных диаметров цилиндров d_u показали, что при условии непрерывной работы АКР наиболее экономичным является режим с минимально допустимой мощностью нагревателя $N_{p \min}$ адсорбционного насоса, обеспечивающей непрерывность действия рефрижератора. При этом, с увеличением массогабаритных параметров насосов (рис. 4) наблюдается рост величины $N_{p \min}$. При постоянных же габаритах существует диапазон температур T_P , для которых мощность $N_{p \min}$ оказывается наименьшей.

В целом увеличение массогабаритных характеристик адсорбционных насосов, как и повышение температуры отогрева адсорбента, в исследованных интервалах однозначно приводит к росту эксерге-

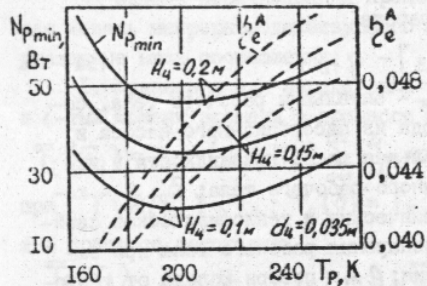


Рис. 4. Влияние температуры T_p на минимально допустимую мощность и эксергетический КПД АКР.

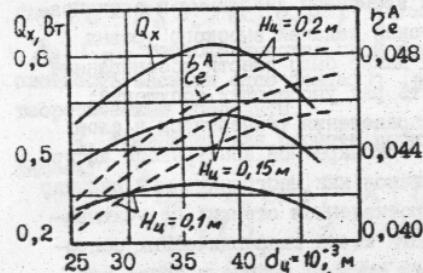


Рис. 5. Зависимости Q_x и z_e^A от диаметра цилиндра адсорбционного насоса ($T_p = 200$ K; $q_m = 0.5 \cdot Q_x \cdot \tau_u$).

шение работы его отдельных элементов конструкции, в частности, теплообменников, обеспечивающих регенерацию холода. При работе на уровне 60 K, когда перепад температур в АКР между теплым концом теплообменника (конденсатором) и холодным (испарителем) достигает 20 K, вопрос улучшения процессов регенерации избыточного холода представляется несомненно важным.

Возможно применение двух вариантов регенеративных теплообменников (см. рис. 6): рекуператора (холод откачиваемого рабочего тела используется для подохлаждения потока конденсирующейся жидкости в соседнем плече, т.е. теплообмен осуществляется между потоками разных плеч); регенератора (в этом случае теплообмен реализуется между откачиваемым и конденсирующимся потоками одного плеча).

Предварительный анализ показал, что использовать теплообменники-регенераторы эффективнее. Для прове...

тического КПД АКР (штриховая линия на рис. 4 и 5). Однако, существуют определенные значения диаметров цилиндров насосов (рис. 5), которым соответствует максимумы холодопроизводительности АКР. Причем для каждой высоты H_u имеется своя оптимальная величина d_u . Поэтому можно установить диапазон оптимальных диаметров цилиндров адсорбционных насосов, обеспечивающих максимум холодопроизводительности АКР, который в данном случае составил 35-40 мм.

3. Исследование системы охлаждения на базе непрерывнодействующего АКР для уровня 60 K

Одним из этапов совершенствования системы на базе АКР для уровня 60 K является улучшение...

XV1044
ИНСТИТУТ ХОЛОДА
ОНАХТ
Бібліотека

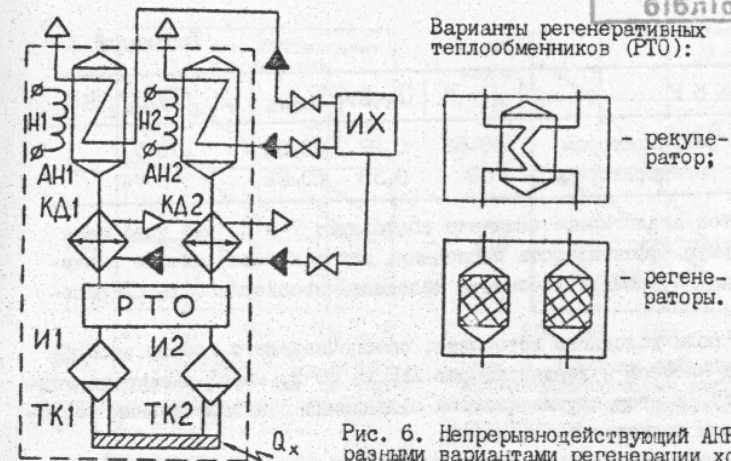


Рис. 6. Непрерывнодействующий АКР с разными вариантами регенерации холода

проведены сравнительные испытания обоих вариантов двухплечевого непрерывнодействующего АКР. В качестве адсорбента использовался уголь АКТ-6, рабочим телом являлся чистый кислород. Источником холода служил жидкий азот. В указанной модели АКР отсутствовали тепловые ключи, что исключило их влияние на процессы кипения в испарителях и позволило получить более полную картину работы одного плеча АКР. Цикл работы плеча в координатах $P_u - \tau$ и $T_u - \tau$ показан на рис. 7. Как видно из диаграммы, использование в АКР на 60 K рекуперативного теплообменника приводит к неустойчивому рабочему режиму рефрижератора (штриховая линия на рис. 7), что можно объяснить взаимовлиянием плеч АКР. Сравнение различных вариантов PТО по некоторым параметрам работы АКР представлено в таблице 2.

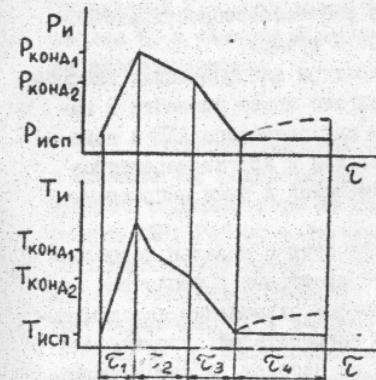


Рис. 7. Временная диаграмма работы одного плеча непрерывнодействующего АКР.

Из таблицы следует, что рекуперативный теплообменник позволяет снизить температуру конденсации на 4-5 K. При использовании регенераторов тех же

Таблица 2

№	А К Р	T_x, K	$Q_x, Вт$	$T_{конд1}, K$	$T_{конд2}, K$
1.	С рекуператором	60-62	0,28	80-82	76-77
2.	С регенераторами	60	0,35	80-82	73-74

габаритов аналогичное снижение составляет 7-8 К, что указывает на большую эффективность последних, так как более низкое значение $T_{конд2}$ позволяет увеличить холодопроизводительность рефрижератора.

В роли холодного источника, обеспечивающего работу адсорбционных насосов и конденсаторов АКР на 60 К, может выступать жидкий азот. В этом случае система охлаждения с адсорбционным рефрижератором является безмашинной.

К недостатку такой системы можно отнести зависимость от своевременности поставок азота при организации длительной работы АКР. От указанного недостатка можно избавиться, используя в качестве холодного источника дроссельные криогенные системы, ресурс работы которых в последнее время существенно возрос. При этом они имеют достаточно высокую холодопроизводительность в широком диапазоне температур криостатирования. Однако этот диапазон не всегда включает в себя азотный уровень охлаждения, поэтому целесообразно провести исследования АКР для определения работоспособности адсорбционных насосов при их охлаждении от 80 К и выше.

Известно, что с увеличением температуры адсорбционная способность адсорбента падает. Следовательно, это может привести к нарушению условия (I) непрерывной работы двухплечевого АКР и изменению как его холодопроизводительности, так и других параметров работы. На выяснение характера этих изменений и были направлены проведенные исследования.

В процессе опытов использовался криостат с моделью непрерывнодействующего двухплечевого АКР с регенераторами и тепловыми ключами в виде термосифонов. Различный уровень охлаждения адсорбционных насосов устанавливался посредством нагревателей, управляемых с помощью термодатчиков, расположенных на насосах, и автоматического блока поддержания температуры.

На рис. 8 приведены зависимости Q_x от температуры охлаждения адсорбционных насосов T_A для различных температурных уровней криостатирования, полученные экспериментальным и расчетным путем.

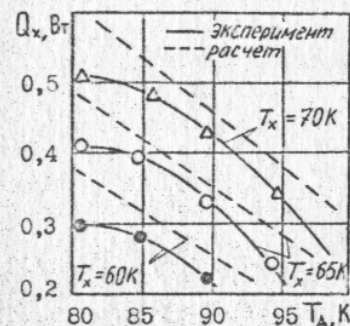


Рис. 8. Зависимость Q_x непрерывнодействующего АКР от температуры охлаждения адсорбента ($q_{тп} = 0,5 \cdot Q_x \cdot \tau_4$).

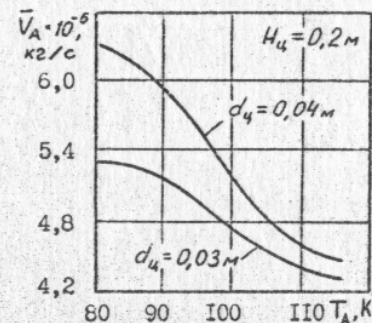


Рис. 9. Средняя теоретическая производительность адсорбционных насосов для различных температур T_A .

Анализ результатов показывает, что с увеличением T_A холодопроизводительность АКР при постоянстве уровня криостатирования снижается. Очевидно, что это происходит из-за ухудшения адсорбционной способности насосов при повышенных температурах T_A . Причем в области температур $T_A = 95-100$ К адсорбционная емкость становится настолько малой, что наблюдается резкое падение Q_x . Подтверждением могут служить расчетные зависимости средней теоретической производительности адсорбционных насосов \bar{V}_A от температуры охлаждения T_A , изображенные на рис. 9. Из рисунка видно, что величина \bar{V}_A в области высоких температур в 1,3-1,4 раза меньше, чем на азотном уровне.

Выводы

1. Экспериментальные сравнительные исследования адсорбентов в составе АКР подтверждают возможность создания непрерывнодействующего рефрижератора на основе не более двух периодически работающих АКР. Работу рефрижератора можно улучшить путем изменения теплотехнических характеристик адсорбционной засыпки за счет добавления в нее металлического наполнителя. Однако существует предельное содержание МН в засыпке адсорбента.

2. Ввиду непостоянства температур в рабочем цикле АКР и сокращения продолжительности рабочего режима не удастся использовать смесь газов (азота и кислорода) в качестве более эффективного рабочего тела по сравнению с чистым кислородом.

3. Наиболее экономичный режим работы АКР при постоянной тем-

пературе отогрева адсорбента реализуется при минимально допустимой мощности нагревателя $N_{p\ min}$ насоса, обеспечивающей непрерывность действия АКР. При этом наблюдается рост величины $N_{p\ min}$ с увеличением массогабаритных параметров адсорбционных насосов.

4. Увеличение массогабаритных характеристик адсорбционных насосов, как и повышение температуры отогрева адсорбента, однозначно ведет к росту эффективности АКР, хотя при определенных значениях диаметров цилиндров насосов наблюдается снижение холодопроизводительности рефрижератора.

5. Использование в конструкции непрерывнодействующего АКР для регенерации холода теплообменника-регенератора вместо теплообменника-рекуператора приводит к более устойчивому рабочему режиму. Кроме того, применение регенераторов обеспечивает и более высокую эффективность АКР за счет большего снижения конечной температуры конденсации.

6. С увеличением температуры охлаждения адсорбента холодопроизводительность АКР при постоянной T_x снижается за счет ухудшения характеристик процесса адсорбции. Поэтому целесообразно АКР с кислородом в качестве рабочего тела применять для получения холода на уровне 60 К с температурой охлаждения адсорбента не более 90 К.

Основное содержание диссертации изложено в работах:

1. Характеристики периодически работающего адсорбционного рефрижератора на уровень температур 55-65 К/Г.К.Лавренченко, Ю.В.Змитроченко, С.А.Зубрилин, С.М.Нестеренко.- Одесса, 1989.- 10 с.- Рукопись представлена Одесск.технол.ин-том холодиль.пром-сти. Деп. в УкрНИИПИ 24 апреля 1989г., №1147-Укр89.№984.

2. Система охлаждения с адсорбционной ступенью/Г.К.Лавренченко, В.Т.Архипов, Ю.В.Змитроченко и др.//Высокотемпературная сверхпроводимость: сб.статей.-ВИИИ.-М.- 1990.- №1.- С.116-121.

3. Энергетические характеристики непрерывнодействующего адсорбционного рефрижератора для криостатирования устройств с ВТСИ/Г.К.Лавренченко, Ю.В.Змитроченко, С.А.Зубрилин, С.М.Нестеренко//Высокотемпературная сверхпроводимость: сб.статей.- ВИИИ.- М.- 1991.- №3.- С.67-73.

Условные обозначения

АН - адсорбционный насос; КД - конденсатор; И - испаритель; ИХ - источник холода; Н - нагреватель; ТК - тепловой ключ; τ - время. Остальные обозначения поясняются в тексте автореферата.