

Автореферат  
В67

проф. Гушаку М.В.

ОДЕССКИЙ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЙ ИНСТИТУТ ХОЛОДИЛЬНОЙ ПРОМЫШЛЕННОСТИ

На правах рукописи  
Для служебного пользования  
Экз. № 00025

ВОЛГУШЕВ Виктор Валентинович

УДК 621.565.6

ЭФФЕКТИВНЫЕ ДРОССЕЛЬНЫЕ РЕФРИЖЕРАТОРЫ НА МНОГОКОМПОНЕНТНЫХ  
РАБОЧИХ ТЕЛАХ ДЛЯ УРОВНЯ ОХЛАЖДЕНИЯ 150К

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

xv 951  
Институт холода  
ОНАХТ  
Библиотека

Одесса - 1985

Работа выполнена в Одесском технологическом институте  
холодильной промышленности

Научный руководитель – кандидат технических наук,  
доцент Г.К. Лавренченко

Официальные оппоненты – доктор технических наук,  
профессор Б.А. Минкус  
– кандидат технических наук,  
ст. н. сотр. В.Ф. Романишин

Будущее предприятие – НИИ прикладной физики (г. Москва)

Защита диссертации состоится 28 июня 1985г.  
в 14.00 часов на заседании специализированного совета К.068.27.01  
при Одесском технологическом институте холодильной промышленности  
(270057, г. Одесса, ул. Петра Великого, 1/3, ОТИХП).

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке института.

Автореферат разослан " \_\_\_\_\_ " \_\_\_\_\_ 1985г.

Ученый секретарь  
специализированного совета,  
кандидат технических наук,  
инженер

Р. Ч. Никульшин

### ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы. Интенсивное развитие инфракрасной техники, электронно-оптического приборостроения делает актуальной разработку на температурный уровень 150К компрессионных дроссельных систем охлаждения (КДСО) и баллонных дроссельных охладителей (БДО) с высокой энергетической эффективностью, улучшенными массо-габаритными и эксплуатационными характеристиками.

Для решения этой задачи можно использовать подход, развитый в работах В.М. Бродянского, А.К. Грезина, А.Д. Суслова и реализованный в разработках высокоэффективных микроохладителей, предназначенных для производства холода при азотных температурах. Однако, для создания КДСО и БДО на уровень 150К нужны новые смеси, эффективность которых должна быть подтверждена значениями энергетических характеристик реальных систем охлаждения. Причем, формирование смеси должно проводиться не только с учетом обеспечения высокой эффективности систем, но и удовлетворения эксплуатационным требованиям (для БДО с накопителем – высокая удельная холодопроизводительность и возможность работы без гидрофильных насадок; для КДСО со смазкой – высокие значения холодопроизводительности, эксергетического КПД и создание предпосылок для работы без маслоделителя).

Цель исследования. Цель данной работы состоит в создании эффективных КДСО и БДО с накопителем на температурный уровень 150К и исследовании их энергетических характеристик при использовании сформированных смесей.

Научная новизна. Впервые получены данные об энергетических характеристиках КДСО на уровень охлаждения 150К с компрессорами одноступенчатого сжатия, работающими на относительно простых бинарных расслаивающихся смесях. Подтверждена возможность создания эффективных БДО на сформированном МРТ, образующем в накопителе сублимирующую фазу.

Основные научные положения, новизна которых защищается автором.

1. Критическое давление истечения в выходном сечении дросселя при наличии потерь меньше давления, соответствующего течению без трения.

2. Оптимальный расход через холодную часть КДСО, отвечающий максимуму эксергетического КПД, консервативен при значительных изменениях поверхности теплообмена.

Кроме этого, автор защищает:

1. Методику, описывающую изменение параметров рабочего вещества

в баллоне и позволяющую рассчитывать процессы истечения.

2. Методику определения скорости истечения с потерями при перепадах давлений, превышающих критические.

3. Экспериментальные значения характеристик баллонного дроссельного охладителя с накопителем, работающего на смеси Ar-RI4-R744.

4. Энергетические характеристики КДСО на эффективных бинарных расслаивающихся смесях RI4-R22 и RI4-R290.

#### Основные научные результаты работы.

1. Критическое давление истечения при наличии потерь должно определяться из условия равенства скорости истечения местной скорости звука в сечении дросселя.

2. Критическое давление истечения реального газа в области низких температур в зависимости от давления перед дросселем может достигать максимума, предсказываемого предложенной моделью.

3. Сформированная смесь на основе Ar-RI4-R744, сублимирующая на уровне 150К при давлении окружающей среды, при таком же быстродействии, как для БДО на RI4, обеспечивает увеличение продолжительности автономной работы накопителя.

4. Оптимальный расход, отвечающий максимуму холодопроизводительности холодной части КДСО, существенно зависит от размеров поверхности рекуперативного теплообменника.

Практическая ценность. На основе рабочих тел RI4-R22 и RI4-R290 созданы КДСО на уровень охлаждения 150К, обладающие улучшенными энергетическими, массогабаритными и эксплуатационными характеристиками.

Результаты проведенных исследований могут использоваться при создании совершенных быстродействующих БДО с большой продолжительностью автономной работы, а также эффективных КДСО с компрессорами одноступенчатого сжатия. Основные результаты работы применены в опытно-конструкторских разработках КДСО и БДО на уровень охлаждения 150К в НИИ прикладной физики (г. Москва) и НИИ "Шторм" (г. Одесса).

Апробация работы. Основные исследования по данной теме докладывались на научно-технической конференции "Молодые специалисты и молодые ученые - производству" (г. Одесса, НПО "Кислородмаш", 1979г.); на Всесоюзной школе-семинаре "Современные проблемы гидродинамики и теплообмена и пути повышения эффективности энергетических установок" (г. Москва, МВТУ им. Баумана, 1983г.); на научно-технических конференциях ОТИХП (г. Одесса, 1976-1985гг.).

Объем и структура диссертации. Работа изложена на стр. машинописного текста, содержит рис., табл. и состоит из введения, трех глав, списка литературы из назв., приложения на стр.

## СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

### I. Задачи совершенствования характеристик КДСО и БДО на уровень температур 150К

Для систем с уровнем охлаждения 150К необходимо формировать относительно простые МРТ, позволяющие достичь высокой термодинамической эффективности и удовлетворяющие сложным эксплуатационным требованиям, предъявляемым к КДСО. Например, компактности микросистем можно добиться, используя компрессоры одноступенчатого сжатия, но при этом МРТ должно обеспечивать высокие значения эксергетического КПД или холодопроизводительности при относительно малых перепадах давлений (1,0...1,5МПа). Для достижения высоких энергетических показателей КДСО необходимо также, чтобы ее элементы (компрессор и микроохладитель) работали в оптимальных режимах.

Еще более сложно формировать МРТ для быстродействующих БДО с накопителем, работа которого характеризуется тремя периодами: пусковым, рабочим и автономным. В пусковом периоде за время  $\tau_n$  происходит охлаждение микротеплообменника и накопителя до заданной температуры. За время рабочего периода  $\tau_{раб}$  в накопителе собирается вещество, с помощью которого после прекращения подачи рабочего тела на протяжении  $\tau_{авто}$  поддерживается температура охлаждения. Для удержания охлажденного рабочего тела в накопителе, который после отделения от теплообменника должен обеспечить длительное автономное охлаждение при произвольной ориентации в пространстве, применяют гидрофильные насадки, уменьшающие и без того малый объем накопителя. Кроме этого, рабочее тело должно находиться в баллоне в газообразном состоянии при температуре окружающей среды 223...323К. Анализ показывает, что этим требованиям может удовлетворить МРТ, образующее после дросселирования в накопителе сублимирующую фазу и имеющее достаточно низкую критическую температуру.

Быстрое достижение температуры охлаждения ( $\tau_n = 1...2с$ ) и малое время работы БДО ( $\tau_{раб} = 7...10с$ ) приводят к большим расходам рабочего вещества из баллона БДО. Такие интенсивные процессы в сочетании с относительно небольшой массой баллона способны вызвать значительные изменения температуры в баллоне БДО, что оказывает существенное влияние на величину изотермического дроссель-эффекта рабочего тела и его расход. Для учета этих особенностей необходимо располагать моделью, описывающей реальные процессы истечения из баллона.

Критический анализ позволяет сформулировать следующие задачи: формирование смесей, предназначенных для использования в КДСО, создаваемых на основе одноступенчатых герметичных компрессоров со смаз-

кой или без смазки пары поршень-цилиндр; формирование МРТ для баллонных дроссельных охладителей, работающих на сжатых газовых смесях, которые образуют сублимирующую фазу в накопителе; разработка моделей, описывающих характер изменения во времени параметров сжатых газов в баллоне БДО; создание методики расчета параметров рабочих тел при истечении с потерями; исследование характеристик КДСО и БДО при работе на сформированных смесях для подтверждения их высокой эффективности.

## 2. Исследование энергетических характеристик КДСО на эффективных рабочих телах

Формирование эффективных МРТ для цикла на уровень охлаждения 150К с герметичными компрессорами одноступенчатого сжатия необходимо проводить в несколько этапов в тесной связи с разработкой КДСО.

На первом этапе выбирается компонент, обеспечивающий температуру криостатирования (R14), и высококипящий компонент для увеличения дроссель-эффекта смеси (R22 или R290). Предпочтение при таком выборе отдается расслаивающимся смесям, имеющим широкую по составу зону не-смесимости при температуре охлаждения  $T_x$  и давлении обратного потока  $P_{\delta c}$ . Давление трехфазного равновесия  $P_{3N}(T_x) = P_{\delta c}$  может быть рассчитано по известным методам при наличии единого уравнения состояния (ЕУС) смеси. Это позволяет при выбранных компонентах смеси считать определенным давление  $P_{\delta c}$ .

На втором этапе следует установить оптимальное давление прямого потока  $P_H$  с учетом термодинамических свойств смеси, а также объемных и энергетических характеристик компрессора. В качестве целевой функции выбираем холодопроизводительность КДСО.

Располагаемая холодопроизводительность компрессора описывается выражением:

$$Q_x = V_h \cdot \rho_{\delta c} (P_{\delta c}) \cdot \lambda (P_H, P_{\delta c}) \cdot \Delta i_T (P_H, P_{\delta c}). \quad (1)$$

Так как с ростом давления  $P_H$  коэффициент подачи  $\lambda$  уменьшается, а изотермический дроссель-эффект возрастает, то из выражения (1) следует существование оптимального давления нагнетания, соответствующего максимуму  $Q_x$ . В первом приближении можно считать, что  $\lambda$  линейно зависит от степени повышения давления  $\varepsilon$  компрессора, а дроссель-эффект пропорционален  $(P_H - P_{\delta c})$ . При таких допущениях максимум  $Q_x(\varepsilon)$  оказывается слабо зависящим от свойств сжимаемого рабочего тела и в основном определяется характеристиками компрессора. В результате, для малых герметичных компрессоров оптимальные  $\varepsilon$  лежат в интервале 9...11.

На третьем этапе при известных  $P_H$  и  $P_{\delta c}$  определяется оптималь-

ный состав смеси. Известные методы такой оптимизации, как правило, связаны с многократными расчетами на ЭВМ параметров рабочего тела по ЭУС в характерных точках цикла. Поэтому они оказываются довольно сложными, требуют большой подготовительной работы. В то же время для инженерных расчетов бывает достаточным приближенное определение оптимального состава смеси.

С этой целью предлагается простой способ расчета  $X_{opt}$ , основанный на использовании  $i$ - $X$ -диаграмм бинарных расслаивающихся смесей.

Состав, отвечающий максимуму удельной холодопроизводительности, можно вычислять по следующему уравнению:

$$X_{opt} = \frac{\left( \frac{i^y - i^x}{y - x^x} - \frac{i^x - i^x}{x^x - x^x} \right) \cdot X^x + \Delta i_{T_I} \cdot (1 - \Pi)}{\frac{i^y - i^x}{y - x^x} - \frac{i^x - i^x}{x^x - x^x} + (\Delta i_{T_I} - \Delta i_{T_{II}}) \cdot (1 - \Pi)} \quad (2)$$

Данная зависимость учитывает свойства смеси (концентрации и энтальпии в вершинах треугольника трехфазного равновесия в  $i$ - $X$ -диаграмме), изотермический дроссель-эффект компонентов, а также возможные потери  $\Pi$  от недорекуперации и теплопритоков из окружающей среды.

Результаты расчетов с помощью  $i$ - $X$ -диаграмм смесей R14-R22 и R14-R290 для давлений всасывания 0,12 МПа и нагнетания 1,3 МПа показывают, что найденные по уравнению (2) оптимальные концентрации изменяются от 0,23 до 0,18 при варьировании доли потерь  $\Pi$  в интервале 0...0,75. Оценка возможных потерь позволяет выбрать смеси R14-R22 и R14-R290 с оптимальной концентрацией 0,20 моль/моль (по легкокипящему компоненту, т.е. по R14). Первую из смесей рационально применить в КДСО с несмазываемым компрессором, а вторую - в системе со смазываемым компрессором.

Энергетические характеристики КДСО с одноступенчатым сжатием смесей R14-R22 и R14-R290 исследовались на экспериментальной установке, схема которой приведена на рис.1.

Рабочая смесь, сжатая мембранным компрессором 8, нагнетается в магистраль высокого давления, проходит через фильтр 7, регулирующий вентиль РВ6, электроклапан ЭК3 и поступает в холодную часть КДСО 1, состоящую из рекуперативного теплообменника, дроссельного вентиля РВ7 и испарителя. Затем рабочее вещество через ресивер 4, индикатор расхода 5 (ротаметр РС-3), электроклапан ЭК5 и регулирующий вентиль РВ10 попадает в емкость низкого давления 6 и после этого во всасывающий патрубок компрессора.



### 3. Исследование баллонных дроссельных охладителей и режимов работы их элементов

Анализ требований, предъявляемых к МРТ для быстродействующих БДО с накопителем, показал перспективность добавления к RI4 некоторого количества R744. Однако, полученная бинарная смесь с большим изотермическим дроссель-эффектом сублимировала при температурах выше 160K и имела высокую (выше 230K) критическую температуру. Для снижения температуры сублимации до 150K и критической температуры смеси до 223K к указанным компонентам добавлялся Ar. На сформированном МРТ и других веществах исследовались энергетические характеристики БДО, а также различные процессы истечения в элементах микроохладителя.

Интенсивное истечение газа из баллона, имеющего небольшую массу, может вызвать значительное понижение температуры рабочего тела. Это, в свою очередь, скажется на характере изменения давления в баллоне, величине изотермического дроссель-эффекта газа и его расходе. Для того, чтобы учесть эти факторы, нужна математическая модель истечения сжатого реального газа (это может быть чистое вещество либо газовая смесь) из баллона.

Из закона сохранения энергии для открытых систем можно получить дифференциальное уравнение, описывающее изменение температуры реального газа в баллоне:

$$\frac{dT}{dt} = \frac{v}{V \cdot c_v} \left[ \frac{dQ}{dt} - T \cdot v \cdot \left( \frac{\partial p}{\partial T} \right)_v \cdot C'(\tau) \right]. \quad (3)$$

Основную трудность при решении этого уравнения представляет определение величины теплового потока  $dQ/dt$  через стенки баллона и мгновенного расхода газа  $G(\tau)$ . Для расчета  $dQ/dt$  необходимо решить дифференциальное уравнение

$$\frac{\partial [r \cdot \psi(r, \tau)]}{\partial \tau} = a_{cm} \cdot \frac{\partial^2 [r \cdot \psi(r, \tau)]}{\partial r^2}, \quad \tau > 0, r_{\delta n} < r < r_{нар}, \quad (4)$$

описывающее нестационарное распределение избыточной температуры  $\psi(r, \tau) = T_{cm}(\tau) - T_0$  при начальных и граничных условиях:

$$\psi(r, 0) = T_0 = const, \quad (5)$$

$$-\frac{\partial \psi(r_{\delta n}, \tau)}{\partial r} + \frac{\alpha_{\delta n}}{\lambda_{cm}} \cdot [\psi(r_{\delta n}, \tau) - T(\tau)] = 0; \quad (6)$$

$$-\frac{\partial \psi(r_{нар}, \tau)}{\partial r} + \frac{\alpha_{нар}}{\lambda_{cm}} \cdot [T_0 - \psi(r_{нар}, \tau)] = 0. \quad (7)$$

Система нелинейных дифференциальных уравнений (4)–(7) решается численно методом прогонки. Аппроксимация линейными зависимостями коэффициентов теплоотдачи  $\alpha_{\delta n}$  и  $\alpha_{нар}$ , нелинейно зависящих от температуры газа, выполняется по методу наименьших квадратов.

При определении расхода газа  $G(\tau)$  из баллона применяют, в основном, два подхода: либо производят расчеты по известным формулам идеального газа, либо с помощью термодинамических таблиц или диаграмм графически находят критическое давление истечения реального газа и другие его параметры. Первый способ применяется для приближенных расчетов, второй является довольно трудоемким, чтобы его можно было рекомендовать для расчета элементов БДО или описания их нерасчетных режимов. Использование термодинамических соотношений, дополненных уравнением состояния рабочего тела, позволяет разработать методику расчета расхода, излагаемую ниже.

Рассмотрим стационарное изоэнтропное истечение реального газа в среду с давлением  $P_0$  через дроссель с площадью сечения  $f_2$ . Газ поступает к дросселю со скоростью  $w_1$  по каналу с площадью сечения  $f_1$ . Массовый расход газа

$$G_s = \frac{f_2 \cdot w_2}{v_2} \quad (8)$$

достигает максимального значения, когда скорость истечения

$$w_2 = \sqrt{2(i_1 - i_2) + w_1^2} \quad (9)$$

станет равной местной скорости звука

$$A = \sqrt{\frac{R}{T_{кр}} \cdot \frac{C_{p2}}{C_{v2}} \cdot T_2 \cdot (z_2 \cdot w_2 \cdot \frac{\partial z}{\partial w})}. \quad (10)$$

С учетом соотношений (8)–(10) критический режим изоэнтропного истечения описывается следующей системой уравнений:

$$2(i_1 - i_2) - A^2 \left[ 1 - \left( \frac{f_2}{f_1} \right)^2 \cdot \left( \frac{w_1}{v_2} \right)^2 \right] = 0; \quad (11)$$

$$S_1 - S_2 = 0; \quad (12)$$

$$G_s = \frac{A \cdot f_2}{v_2}, \quad (13)$$

которую необходимо решить совместно с термическим уравнением состояния реального газа  $\mathcal{F}(P, v, T) = 0$ .

Решение нелинейной системы уравнений (11)–(13) сводится к задаче минимизации функции

$$\varphi = \left\{ 1 - \frac{2(i_1 - i_2)}{A^2 \left[ 1 - \left( \frac{v_2}{v_1} \right)^2 \cdot \left( \frac{v_1}{v_2} \right)^2 \right]} \right\}^2 + \left( 1 - \frac{S_1}{S_2} \right)^2 \quad (14)$$

Потери от трения могут учитываться по-разному. Простейшим является введение скоростного коэффициента  $\psi$ , с помощью которого определяется расход  $G'' = \psi \cdot G_s$ .

Другая модель учитывает уменьшение скорости истечения  $w_r = \psi \cdot w_s$ . Затем при энтальпии  $i_{2r} = i_1 - w_r^2/2$  решается задача минимизации функции для определения параметров в дросселе (т.2' на рис.3) и расхода  $G'$ .

Недостатком этой модели является то, что критическое давление истечения принимается здесь одинаковым для течения с потерями и без потерь. Это справедливо для случая докритического истечения, когда выполняется условие  $P_{2r} = P_{2s} = P_0$ .

Так как работа БДО сопровождается, как правило, сверхкритическими перепадами давлений, для определения критического давления  $P_{2r}$  и соответствующего расхода  $G_r$  предлагается методика, основанная на термодинамическом условии критического режима течения, согласно которому в критическом сечении устанавливается такое давление  $P_{2r}$ , чтобы скорость истечения равнялась местной скорости звука (т.2r на рис.3). Местная скорость звука в т.2r рассчитывается при энтальпии  $i_{2r}$  и давлении  $P_{2r}$  по уравнению, аналогичному (10).

Для иллюстрации разработанной методики на рис.4 приведены значения расходов, рассчитанных по описанным моделям для различных давлений  $P_1$  газа в баллоне.

Анализируя результаты расчетов, можно отметить, что различия между расходами, рассчитанными по разным моделям, возрастают с увеличением давления перед дросселем. Это объясняется тем, что из-за роста энтропии при истечении с потерями и меньшего значения  $P_{2r}$  (по сравнению с  $P_{2s}$ ) увеличивается удельный объем газа  $v_{2r}$ .

Рис.5 иллюстрирует тот факт, что при понижении температуры перед дросселем параметр  $\psi = P_{2s}/P_1$  в области высоких давлений становится

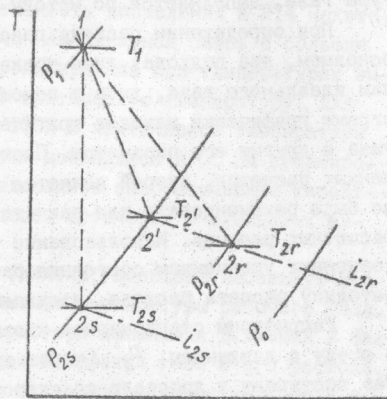


Рис.3. Параметры газа при различных моделях критического истечения

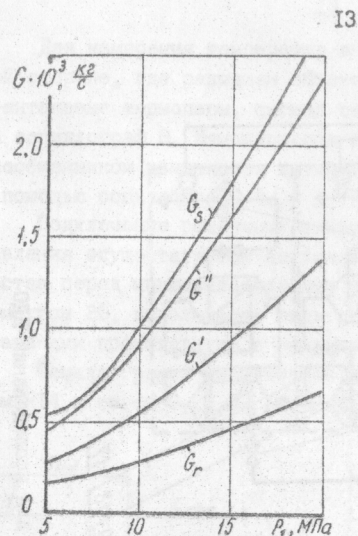


Рис.4. Зависимость расхода газа от давления  $P_1$  для различных моделей истечения с потерями

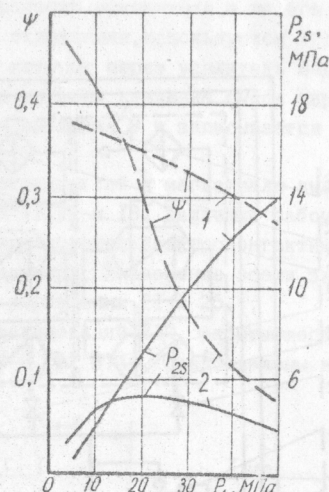


Рис.5. Изменения  $\psi = P_{2s}/P_1$  и  $P_{2s}$  от давления  $P_1$  перед дросселем при начальных температурах, К: 1-300, 2-200

ся намного меньше значения 0,5, принимаемого для идеального газа. Аналогично параметру  $\psi$  изменяется и критическое давление истечения  $P_{2s}$ . В случае истечения реального газа с низкой начальной температурой ( $T_1 = 200\text{К}$ )  $P_{2s}$  может иметь максимум. При  $P_1$ , соответствующем максимуму  $P_{2s}$ , как показывают расчеты, достигается максимального значения и температура истечения  $T_{2s}$ . Данное явление экспериментально наблюдалось Хендриком при исследовании истечения жидкого кислорода.

Экспериментальные характеристики БДО с накопителем исследовались на установке, принципиальная схема которой представлена на рис.6.

Рабочее вещество в теплообменники микроохладителей 17, 18, 19 с накопителями 14, 15, 16 подается через электроклапаны 2, 3, 5, 6 (в зависимости от выбранной емкости баллона) и электроклапан 7. Заправка баллонов 1, 22, 23, 24 производится очищенным и осушенным рабочим веществом через фильтр тонкой очистки. Для того, чтобы подачу рабочей смеси в микроохладитель прекратить сразу после закрытия электроклапана 7, смесь из линии между этим клапаном и микротеплообменником выпускает в атмосферу через электроклапан 10. Давление в баллонах контролируется манометром 4.

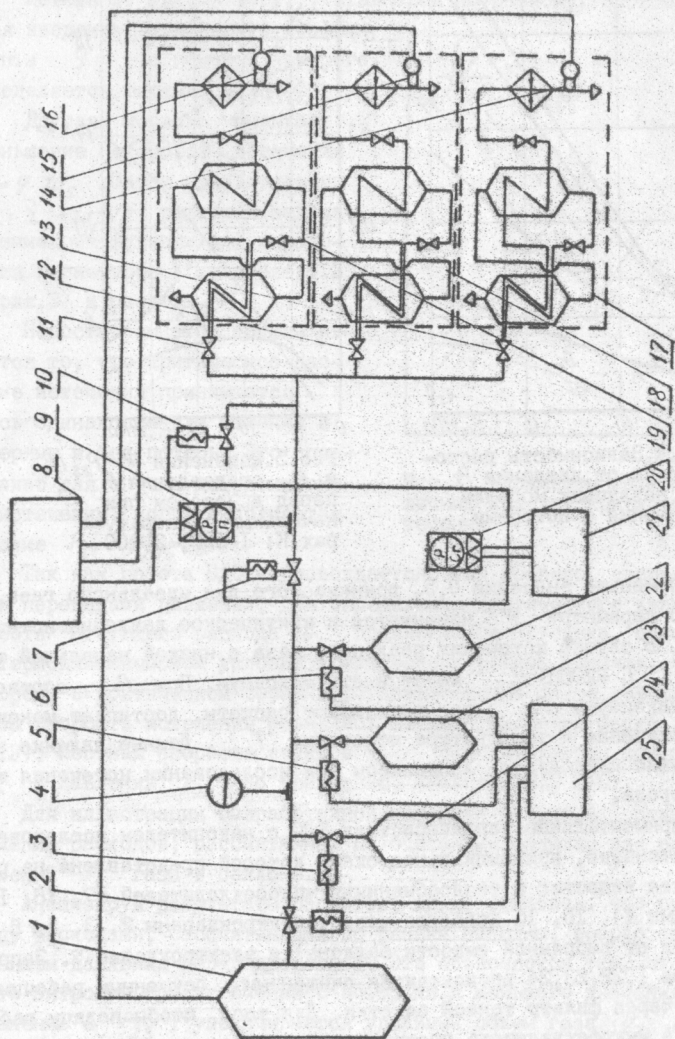


Рис. 6. Схема экспериментального стенда для исследований БДО

Для измерения температур в полости накопителя и на его внешней стороне, где размещен объект охлаждения, используются медь-константановые термодатчики, сигнал от которых через усилитель подается на осциллограф 8. Изменяющееся во времени давление смеси перед теплообменником измеряется датчиком давления 9 и записывается также с помощью осциллографа 8.

Подключение различных микроохладителей к магистрали высокого давления осуществляется вентилями И1, И2 и И3. Давление рабочего вещества перед микроохладителями регулируется электроконтактным манометром 20, выполняющим роль редуктора. Управление всеми электроклапанами производится с пультов управления 21 и 25.

Осциллограммы результатов исследований БДО, работающего на чистом RI4 и смеси 0,25 Ar - 0,68 RI4 - 0,052 R744, представлены на рис. 7.

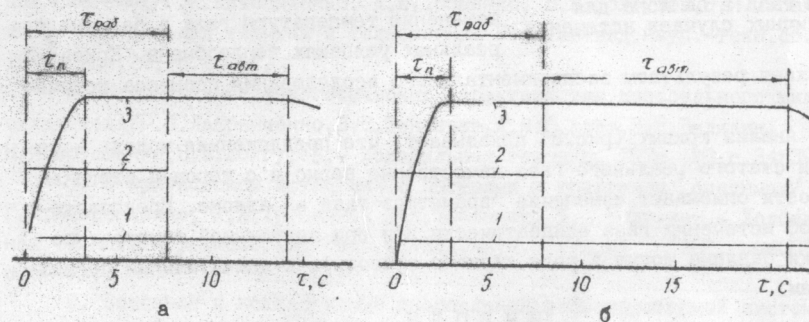


Рис. 7. Осциллограммы записи температур для БДО с накопителем, работающем на RI4 (а) и Ar-RI4-R744 (б): 1-температура окружающей среды,  $T_0 = 291\text{K}$ ; 2-продолжительность рабочего периода микроохладителя; 3-температура охлаждения,  $T_x = 150\text{K}$

Использование сформированного рабочего тела позволяет при таком же быстродействии, как и для БДО на RI4, увеличить продолжительность его автономной работы в два раза. Это объясняется тем, что сублимирующая при атмосферном давлении смесь Ar-RI4-R744 хорошо заполняет накопитель снегообразной массой, чем предотвращаются потери рабочего вещества.

Для изучения процессов истечения из баллона на экспериментальной установке проведены исследования, результаты которых отражены на рис. 8.

В данных экспериментах микроохладитель с накопителем заменялись калиброванной дюзой с диаметром 0,15 мм.

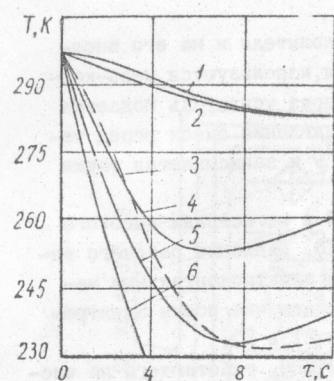


Рис.8. Зависимость температуры газа в баллоне для различных случаев истечения.

Анализ кривых (рис.8) показывает, что предложенная модель истечения сжатого реального газа качественно верно и с хорошей степенью точности описывает изменение параметров газа в баллоне. Предположения об истечении газа адиабатически или при постоянной температуре стенки баллона могут в ряде случаев приводить к значительным погрешностям.

#### В В О Д Ы

1. Для малых герметичных компрессоров, работающих в составе КДСО, оптимальная степень повышения давления, соответствующая максимуму холодопроизводительности, находится в интервале 9...11.

2. Оптимальный состав бинарных расслаивающихся смесей RI4-R22 и RI4-R290, соответствующий максимуму холодопроизводительности при давлении нагнетания  $P_n = 1,3 \text{ МПа}$  и всасывания  $P_{вс} = 0,12 \text{ МПа}$ , лежит в интервале 0,17...0,23.

3. Расход МРТ через холодную часть КДСО нужно выбирать в зоне компромисса, лежащей между максимумами энергетического КПД и холодопроизводительности.

4. КДСО, использующие смеси RI4-R22 и RI4-R290, могут работать без маслоотделителя и обладают большей энергетической эффективностью, чем аналогичные системы на RI4.

Результаты проведенных исследований и сравнение их с расчетами, выполненными по разработанной методике, характеризует рис.8. Начальное давление газа в баллоне составляло 15 МПа, температура окружающей среды равнялась 298 К. Кривая 6 отвечает расчетным значениям температуры газа в баллоне при адиабатической изоляции; кривая 4 – при идеальном теплообмене стенок баллона с окружающей средой, т.е. при условии, что температура стенки равна температуре окружающей среды. Кривые 1 и 2 иллюстрируют изменение температур наружной и внутренней стенок баллона, а кривая 5 – изменение температуры газа в баллоне при реальных условиях теплообмена. Кривая 3

отражает результаты экспериментального исследования процесса истечения.

5. Температура рабочей смеси в баллоне быстродействующего БДО с накопителем в процессе работы может снижаться более, чем на 60 К.

6. Использование смеси Ar-RI4-R744, сублимирующей при температуре 150 К, увеличивает время автономной работы БДО с накопителем в два раза, по сравнению с RI4.

Публикации по материалу, изложенному в диссертации.

1. Лавренченко Г.К., Волгушев В.В. Исследования истечения сжатого газа из баллона при неадиабатических условиях. – Холодильная техника и технология: Респ.межвед.науч.-техн.сб., 1976, вып.22, с.37-41.

2. О критических режимах истечения реального газа в криогенных системах/Г.К.Лавренченко, А.В.Троценко, Э.И.Табачник, В.В.Волгушев. – Холодильная техника и технология: Респ.межвед.науч.-техн.сб., 1977, вып.25, с.45-49.

3. Неадиабатическое истечение сжатого реального газа в криогенных системах/Г.К.Лавренченко, А.В.Троценко, В.В.Волгушев, Э.И.Табачник. – Холодильная техника и технология: Респ.межвед.науч.-техн.сб., 1978, вып.26, с.26-31.

4. Исследование энергетических характеристик дроссельного микроохладителя/Г.К.Лавренченко, В.С.Зиновьев, А.М.С.соев, В.Н.Валякин, Н.И.Артемченко, В.В.Волгушев. – Холодильная техника, 1976, №9, с.34-39.

5. О критическом истечении с потерями в криогенных системах/Г.К.Лавренченко, А.В.Троценко, Э.И.Табачник, В.В.Волгушев. – Холодильная техника и технология: Респ.межвед.науч.-техн.сб., 1982, вып.35, с.87-93.

6. Создание и исследование дроссельной рефрижераторной системы на уровень криостатирования 190 К с использованием герметичного компрессора К-063/Г.К.Лавренченко, А.В.Тригуб, В.В.Волгушев, Н.В.Дремова. – В кн.: Тезисы докладов Всесоюзной школы-семинара "Современные проблемы газодинамики и теплообмена и пути повышения эффективности энергетических установок". – М.: МВТУ, 1983, с.22-23.

7. Разработка математической модели рекуперативного теплообменника дроссельных рефрижераторов/Г.К.Лавренченко, В.В.Волгушев, Н.В.Дремова, Э.И.Табачник. – Одесса, 1983. – 20 с. – Рукопись представлена Одесск.технол. ин-том холод.пром-сти. Деп. в УкрНИИТИ 30 дек.1983г., №1483 Ук-Д83.

8. Лавренченко Г.К., Коваль В.Н., Волгушев В.В. Исследования дроссельного микроохладителя с пусковым баллоном. – Холодильная техника и технология: Респ.меж.ед.науч.-техн.сб., 1978, вып.27, с.48-51.

9. А.с. 1086003 (СССР). Хладагент для низкотемпературной ком-

прессионной холодильной машины /Г.К.Лавренченко, В.В.Волгушев, А.В.Тригуб.- Оpubл. в Б.И., 1984, №14.

Ю. А.с. 1134856 (СССР). Рабочее тело для низкотемпературной компрессионной холодильной машины /Г.К.Лавренченко, В.В.Волгушев, А.В.Тригуб и др. - Оpubл. в Б.И., 1985, №2.

#### УСЛОВНЫЕ ОБОЗНАЧЕНИЯ

$A$  - местная скорость звука;  $\alpha$  - коэффициент температуропроводности;  $\alpha$  - коэффициент теплоотдачи;  $C$  - теплоемкость;  $\Delta i_T$  - изотермический дроссель-эффект;  $\varepsilon$  - степень повышения давления;  $F$  - поверхность теплообмена;  $f$  - проходное сечение;  $G$  - расход рабочего вещества;  $i$  - энтальпия;  $l$  - длина активной зоны теплообменника;  $\lambda$  - коэффициент подачи;  $\lambda_{ст}$  - коэффициент теплопроводности;  $\omega$  - приведенная плотность;  $P$  - давление;  $\Pi$  - доля потерь;  $\psi$  - отношение критического давления истечения к давлению на входе;  $Q$  - тепловой поток;  $Q_x$  - холодопроизводительность;  $R$  - газовая постоянная;  $r$  - радиус;  $\rho$  - плотность;  $S$  - энтропия;  $T$  - температура;  $\tau$  - время;  $\vartheta$  - избыточная температура;  $V$  - объем;  $V_h$  - объем, описанный поршнем в единицу времени;  $v$  - удельный объем;  $w$  - скорость;  $X$  - валовый состав;  $x$  - состав жидкости;  $y$  - состав пара;  $Z$  - коэффициент сжимаемости.

#### ИНДЕКСЫ

0 - окружающая среда; 1 - вход; 2 - сечение дросселя;  $\bar{I}$  - высококипящий компонент;  $\bar{II}$  - низкокипящий компонент; *авт* - автономный; *вн* - внутренний; *вс* - всасывание; *e* - эксергетический; *кр* - критический; *н* - нагнетание; *нар* - наружный; *opt* - оптимальный; *п* - пусковой; *P* - изобарный; *раб* - рабочий; *р* - реальный; *S* - изоэнтропный;  $S_M$  - трехфазное равновесие; *ст* - стенка; *v* - изохорный;  $x$  - уровень охлаждения; ( $^I$ ) - первая жидкая фаза; ( $^Z$ ) - вторая жидкая фаза; ( $^y$ ) - паровая фаза; ( $'$ ), ( $''$ ) - различные модели истечения.

xv 951  
 ИНСТИТУТ ХОЛОДА  
 ОНАХТ  
 Библиотека

*Ванн*

Подл. к печати 20.05.85 г. Формат 60 x 84 1/16.  
 Объем 0,75 уч.изд.л., 1,0 п. л. Заказ № 035, Тираж 100 экз.  
 Гортипография Одесского облполиграфиздата, цех № 3,  
 Ленина, 49.