

второе
↓ 60

инж. Гурману М.В.

ОДЕССКИЙ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЙ ИНСТИТУТ ХОЛОДИЛЬНОЙ ПРОМЫШЛЕННОСТИ

На правах рукописи

Для служебного пользования

Экз. № 00070

ДОДЕЛЫЦЕВА Наталия Ивановна

УДК 536.7:621.564.2

ОПРЕДЕЛЕНИЕ ОПТИМАЛЬНЫХ СОСТАВОВ РАССЛАИВАЮЩИХСЯ БИНАРНЫХ И ТРЕХ-
КОМПОНЕНТНЫХ РАБОЧИХ ТЕЛ, ДАВЛЕНИЙ КОМПРЕССИОННЫХ ДРОСЕЛЬНЫХ
СИСТЕМ ОХЛАЖДЕНИЯ

Специальность 05.14.05 - Теоретические основы теплотехники

А В Т О Р Е Ф Е Р А Т

диссертации на соискание ученой степени

кандидата технических наук

xv 1096

ИНСТИТУТ ХОЛОДА
ОНАХТ
БІБЛІОТЕКА

Одесса - 1985

Работа выполнена в Одесском технологическом институте
холодильной промышленности

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

Официальные оппоненты: доктор технических наук, старший
научный сотрудник А.А.Вассерман;
кандидат технических наук
С.И.Храсноокий

Ведущая организация: ФТИИТ АН УССР, г.Харьков

Защита состоится "28" июня 1985г. 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, ОТИИП.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке института.

Автореферат разослан " " " 1985г.

Ученый секретарь
специализированного совета

И.Т.Н., доцент

Р.К.Никольшин

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темн. Термодинамические циклы, реализуемые на многокомпонентных рабочих телах (МРТ), используются для повышения эксергетического КПД, удельной холодопроизводительности компрессионных дроссельных систем охлаждения (КДСО) на уровень температур 65...80 К. Подобные циклы начинают применяться в КДСО для диапазона температур 120...200 К.

Широкое внедрение таких КДСО для термостабилизации объектов инфракрасной техники, оптической электроники, приборостроения сдерживается отсутствием информации об экстремальных значениях энергетических характеристик КДСО на эффективных МРТ оптимальных составов.

Цель исследования. Цель данной работы состоит в определении максимальных значений эксергетического КПД и холодопроизводительности КДСО с компрессорами одноступенчатого сжатия, работающими с оптимальными давлениями, прямого и обратного потоков и составами расслаивающихся МРТ.

Основными задачами при этом являются:

1. Разработка метода расчета и анализа $\eta - T$ -зависимостей для процессов в рекуперативном теплообменнике с учетом потерь от недорекуперации, теплопритоков из окружающей среды при использовании в качестве рабочих тел КДСО расслаивающихся бинарных и трехкомпонентных смесей.
2. Исследование влияния потерь от недорекуперации и теплопритоков из окружающей среды на энергетические характеристики КДСО и оптимальные составы бинарных и трехкомпонентных рабочих тел.
3. Установление в концентрационном треугольнике предпочтительных областей, в которых следует вести поиск оптимальных составов трехкомпонентных рабочих тел.

Научная новизна.

Поставлена и решена задача определения оптимальных составов бинарных и трехкомпонентных расслаивающихся рабочих тел, давлений прямого и обратного потоков дроссельных систем охлаждения на уровне температур 200, 150 и 120 К с компрессорами одноступенчатого сжатия.

Создан метод расчета и анализа $\eta - T$ -зависимостей для действительных процессов регенерации бинарных и трехкомпонентных расслаивающихся смесей. Получена информация об оптимальных составах МРТ и давлениях циклов КДСО, использующих компрессоры одноступенчатого сжатия.

Основные научные положения, новизна которых защищается в рабо-

те;

1. Смесь, оптимальный состав которой определен с учетом потерь от недоракуперации и теплопритоков из окружающей среды, оказывается обогащенной высококипящим компонентом. При использовании такого МРТ удается обеспечить повышение эксергетического КПД и холодопроизводительности действительной системы охлаждения.

2. Поиск оптимальных составов расслаивающихся трехкомпонентных рабочих тел КДСО следует вести в треугольнике трехфазного равновесия жидкость-жидкость-пар при давлении обратного потока и температуре охлаждения.

Основные результаты работы:

1. Определение состава расслаивающейся бинарной смеси, соответствующего максимуму эксергетического КПД, должно проводиться для цикла КДСО с давлением обратного потока, отвечающим условию трехфазного равновесия при температуре охлаждения.

2. Объемные и энергетические характеристики компрессоров одноступенчатого сжатия обуславливают существование оптимальных степеней повышения давления и составов, соответствующих максимальным значениям эксергетического КПД и холодопроизводительности.

Практическая ценность работы.

Расчетные значения оптимальных составов расслаивающихся МРТ и давлений позволяют проводить разработку КДСО с максимальными значениями η_e и Q_x на уровне температур 200, 150 и 120 К.

Результаты работы внедрены во ФТИИТ АН УССР (г. Харьков), а также на предприятии п/я А-3726.

Апробация работы. Основные положения работы докладывались на Всесоюзной научно-технической конференции "Микрокриогенная техника-84" (Омск, 1984 г.), на ежегодных научных конференциях ОМХП 1981-1984 гг. По теме диссертации опубликовано 3 работ.

Структура и объем работы. Диссертация состоит из введения, 4-х глав, заключения и выводов. Объем работы стр. основного текста (включая рис., табл. и стр. приложения). Выблорграфия содержит наименований.

СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

1. Постановка задачи определения оптимальных составов расслаивающихся МРТ, давлений прямого и обратного потоков КДСО

В работах Я.Э.Казавчинского, В.А.Мазура, В.И.Анисимова и др. сформулирована задача определения оптимальных параметров циклов КДСО и многокомпонентных рабочих тел как задача нелинейного программирования. В развитие данных исследований, позволяющих производить рас-

чет экстремальных характеристик холодной части КДСО, поставлена задача оптимизации давлений прямого и обратного потоков, а также составов смесей, отвечающих максимумам η_e или Q_x систем охлаждения в целом, т.е. с одновременным учетом потерь в холодной части КДСО и одноступенчатым компрессором:

$$\bar{Z}^*, P_1^*, P_2^* = \text{opt} \left\{ \bar{Z}, P_1, P_2 \right\} \rightarrow \text{Extr} F_2 \quad (1)$$

$$\bar{Z} \in D_z$$

$$P_1, P_2 \in D_p$$

$$l = 1, 2, F_1 = \eta_e, F_2 = Q_x$$

В качестве целевой функции F_2 КДСО, работающих на смесях веществ при температурах окружающей среды T_0 , охлаждения T_x , выбраны эксергетический КПД η_e либо холодопроизводительность Q_x :

$$\eta_e = \eta_e / \eta_{\text{max}}(\psi) \frac{q_x(P_1, P_2, \bar{Z}, q_H, q_T)}{l(P_1, P_2, \bar{Z})}; \quad (2)$$

$$Q_x = \lambda(\psi) \frac{V_H}{v_i(P_1, T_i, \bar{Z})} q_x(P_1, P_2, \bar{Z}, q_H, q_T), \quad (3)$$

где удельная холодопроизводительность цикла

$$q_x(P_1, P_2, \bar{Z}, q_H, q_T) = \Delta H_0 - q_H - q_T. \quad (4)$$

Удельная работа $l(P_1, P_2, \bar{Z})$, входящая в выражение (2), описывается по-разному, в зависимости от реализуемого цикла (см. рис. 1).

Необходимо учитывать условия (4) и ограничения:

$$T_3 - T_x > 0; \quad (5)$$

$$\sum_{i=1}^N Z_i - 1 = 0; \quad (6)$$

$$1 - Z_i \geq 0; \quad Z_i \geq 0, \quad i = 1, \dots, N; \quad (7)$$

$$P_{2, \text{max}} - P_2 \geq 0; \quad P_{1, \text{min}} \leq P_1 \leq P_{1, \text{max}}; \quad (8)$$

$$Z_i \geq y_i(P_2, T_0), \quad i = 1, \dots, N. \quad (9)$$

Неравенство (5) необходимо для контроля осуществимости теплообмена на холодном конце теплообменника. Ограничения (6) - (7) представляют собой стехиометрические соотношения. Неравенствами (8) устанавливаются максимальное давление нагнетания, минимальное и максимальное давления всасывания, определяемые характеристиками конкретного применяемого компрессора. Для цикла КДСО с изотермическим сжатием необходимо учитывать ограничение (9), обусловленное обеспечением "сухого" хода компрессора. При расчетах цикла КДСО с адиабатным

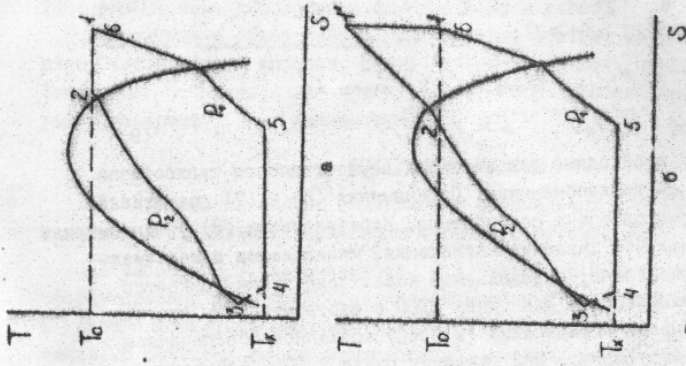


Рис. 1. Циклы КДСО с изотермическим (а) и адиабатным (б) сжатием МРТ в компрессоре.

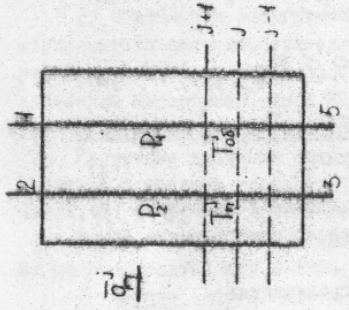


Рис. 2. Температурные сечения теплообменника

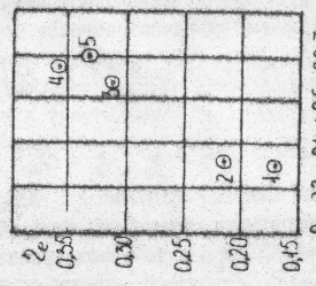
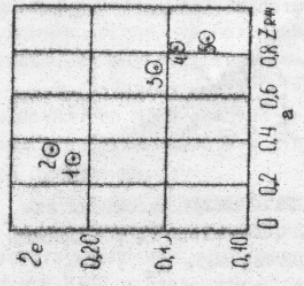


Рис. 3. Изменение среднего КПД циклов с изотермическим (а) и адиабатным (б) сжатием бинарных расслаивающихся смесей оптимальных составов на основе КИ: 1 - R1-R22; 2 - R1-R290; 3 - R14-R600A; 4 - R14-R600; 5 - R14-R21

сжатием это неравенство можно не принимать во внимание. Решение задачи (I) может быть сведено к поиску минимума целевых функций:

$$F'_1 = \frac{1}{F_1} + \varphi_1^2 + \varphi_2^2; \quad (10)$$

$$F'_2 = \frac{1}{F_2} + \varphi_1^2 + \varphi_2^2. \quad (11)$$

Функции штрафа в (10) и (11) введены для контроля за выполнением ограничений (5) и (9):

$$\varphi_1 = \begin{cases} 0, & \text{если } T_x \leq T_3; \\ T_x - T_3, & \text{если } T_x > T_3; \end{cases} \quad (12)$$

$$\varphi_2 = \begin{cases} 0, & \text{если } z_i \geq y_i(p_i, T_0); \\ y_i(p_i, T_0) - z_i, & \text{если } z_i < y_i(p_i, T_0). \end{cases} \quad (13)$$

Для определения оптимальных составов МРТ и параметров циклов КДСО необходимо располагать единым уравнением состояния (ЕУС), алгоритмами и методами расчета фазовых равновесий в расслаивающихся бинарных и трехкомпонентных рабочих телах, алгоритмами расчетов термодинамических свойств МРТ в узловых точках циклов КДСО, методом расчета энтальпии и энтропии трехкомпонентных расслаивающихся рабочих тел при трехфазных равновесиях.

В качестве ЕУС было выбрано уравнение Редлиха-Квонга в модификации Вильсона, обеспечивающее достаточную точность расчета термодинамических свойств смесей в однофазных областях и при фазовых равновесиях, а также допускающее возможность аналитического решения относительно объема.

Ориентация на ЕУС позволила использовать алгоритмы и методы расчета фазовых равновесий жидкость-пар, жидкость-жидкость, жидкость-жидкость-пар бинарных и трехкомпонентных расслаивающихся рабочих тел, разработанные Г.Я.Рувинским.

Расчет характеристик циклов КДСО на смесях веществ должен основываться на определении термодинамических свойств рабочих тел в широкой области составов, давлений и температур. В цикле состояние смеси изменяется от газообразного до жидкого, также может быть и гетерогенным. Это приводит к необходимости создания таких эффективных алгоритмов, с помощью которых возможно определение термодинамических свойств смесей в характерных точках цикла. При фиксированном \bar{z} необходимо рассчитывать:

$$H, S = f(P, T); \quad (14)$$

$$T, H = f(P, S); \quad (15)$$

$$T, S = f(P, H); \quad (16)$$

$$\bar{x}, \bar{y} = f(P, T, \bar{z}); \quad (17)$$

$$H, S = f(P, T, \bar{x}, \bar{y}); \quad (18)$$

$$T, S = f(P, H, \bar{x}, \bar{y}); \quad (19)$$

$$T, x_1^f, x_2^g, y_1^g = f(P); \quad (20)$$

$$\bar{x}', \bar{x}'', \bar{y} = f(P, T). \quad (21)$$

Зависимости (14) - (16) необходимы для определения термодинамических свойств смеси, находящейся в жидком или газообразном состояниях. Уравнения (17) - (19) предназначены для расчета свойств смеси в парожидкостном состоянии. Используя в качестве рабочих тел смеси вещества с ограниченно смешивающимися компонентами при определенных параметрах состояния, необходимо учитывать зависимости (20) для бинарной смеси и (21) - для трехкомпонентной.

Для трехкомпонентных расслаивающихся систем, находящихся в трехфазном равновесии жидкость-жидкость-пар при P, T, \bar{z} , необходимо определять значения энтальпии и энтропии как за пределами треугольника трехфазного равновесия, так и в самом треугольнике. Если точка находится внутри треугольника трехфазного равновесия $L'L''V$, где L', L'', V - первая и вторая жидкостные и паровая вершины треугольника, то значения энтальпии и энтропии в данной точке можно рассчитать по соотношениям:

$$H = H_1 m_1 + H_2 m_2 + H_3 m_3; \quad (22)$$

$$S = S_1 m_1 + S_2 m_2 + S_3 m_3. \quad (23)$$

Здесь m_1, m_2, m_3 - доли фаз, определяющиеся из уравнений материального баланса:

$$m_2 = \frac{(z_1 - y_1)(x_2' - y_2) - (z_2 - y_2)(x_1' - y_1)}{(x_1'' - y_1)(x_2' - y_2) - (x_2'' - y_2)(x_1' - y_1)}; \quad (24)$$

$$m_1 = \frac{z_1 - y_1 - m_2(x_1'' - y_1)}{x_1' - y_1}; \quad (25)$$

$$m_3 = 1 - m_1 - m_2. \quad (26)$$

Условие выполнимости теплообмена, сформулированное в виде (5) и (12), в целом не позволяет проконтролировать осуществимость теплообмена во всех сечениях теплообменника. Поэтому, для найденного \bar{z}^* необходимо проводить проверку реализуемости теплообмена. Предпочтителен вариант алгоритма, основанный на разбиении температурного диапазона обратного потока на N конечных интервалов, начиная с низких температур. Последнее обусловлено тем, что на изобаре обратного потока выше температуры, соответствующей фазовому равновесию при T_c , имеются лишь однородные состояния. Кроме этого, после первой же точки в однофазной области отпадает необходимость проверки наличия парожидкостного равновесия.

Уравнение теплового баланса на j -ом участке теплообменника имеет вид:

$$(H_2^j - H_3^j) + q_r \frac{q_2}{q} = H_{os}^j - H_s = q_j; \quad (27)$$

На каждом j -ом участке разбиения теплообменника (см. рис. 2) по заданной температуре обратного потока T_{os}^j , при известных давлении P и валовом составе \bar{z} вычисляется с помощью уравнения состояния энтальпия H_{os}^j а затем на основании (27) - значения q_j и H_2^j .

Расчет H_{os}^j сопровождается определением удельного объема как функции P, T, \bar{z} с проверкой гетерогенности состояния. Температура прямого потока T_1^j определяется с помощью итерационного метода половинного деления. В связи с тем, что энтальпия, как функция температуры на изобаре меняется монотонно, то процесс сходится к единственному решению.

При этом в качестве границ интервала, в котором находится искомая температура на первом участке разбиения теплообменника принимаются ее значения на теплом и холодном концах, а в дальнейшем с возрастанием T_{os}^j интервал ограничивается значением температуры на $(j-1)$ -ом участке и в точке 2. Поэтому с увеличением j число итераций уменьшается. Это существенно сказывается на времени счета, так как для каждого итерируемого значения при вычислении энтальпии необходимо до появления первого T_m^j , соответствующего однородному состоянию, проверять наличие парожидкостного равновесия, что и составляет основные затраты времени.

В однофазной области имеются точки с неоднозначностью удельного объема v , определяемого из уравнения:

$$v = v(P, H, \bar{z}). \quad (28)$$

Для однозначного выбора ν , необходимого для расчета температуры, использовалось значение H_k , определяемое из решения системы:

$$\begin{aligned} \frac{\partial P(\nu, T, \bar{z})}{\partial \nu} &= 0; \\ \frac{\partial^2 P(\nu, T, \bar{z})}{\partial \nu^2} &= 0. \end{aligned} \quad (29)$$

Заданная величина H сравнивается со значением H_k . При $H \leq H_k$ выбирается меньший из корней уравнения (28), а при $H > H_k$ - больший.

2. Определение энергетических характеристик циклов КДСО на бинарных расслаивающихся рабочих телах

В качестве рабочих тел для КДСО на уровни охлаждения 120, 150 и 200 К используются бинарные расслаивающиеся смеси R50, R14 и R23 с высокипящими компонентами.

Минимизация функций F_1' и F_2' производится по известным методам одномерной минимизации.

Давление обратного потока P_2' выбиралось равным давлению трехфазного равновесия $P_{sm}(T)$ при температуре охлаждения $T = T_c$. В табл. I указаны значения $P_{sm}(T)$ используемых расслаивающихся смесей.

Таблица I
Давления трехфазного равновесия для бинарных смесей на основе R50, R14 и R23

Смесь	Температура T , К	Давление $P_{sm}(T)$, МПа	Смесь	Температура T , К	Давление $P_{sm}(T)$, МПа
R50 - R23	120	0,173	R14 - R600	150	0,142
R50 - R22	120	0,171	R14 - R21	150	0,139
R50 - R21	120	0,175	R23 - R290	200	0,171
R14 - R22	150	0,130	R23 - R600A	200	0,162
R14 - R290	150	0,136	R23 - R600	200	0,161
R14 - R600A	150	0,142	R23 - R11	200	0,153

Вначале сравнивались оптимальные составы МРТ и соответствующие им энергетические характеристики циклов с изотермическим и адиабатным сжатием в компрессоре с учетом потерь только от внутренней необратимости. На рис. 3 приведены зависимости эксергетического КПД от оптимального состава МРТ при изотермическом (а) и адиабатном (б)

сжатия в компрессоре ($T_c = 150$ К, $T_0 = 300$ К, $P_2 = P_{sm}(T_c)$, $\psi = 12$). На рис. 3, а следует, что для условий реализации цикла с изотермическим сжатием в компрессоре существует оптимальное рабочее тело - смесь R14-R290. Этой смеси по эффективности незначительно уступает бинарное рабочее тело на основе R14 и R22. В том случае, когда рабочее тело сжимается адиабатно, эксергетический КПД цикла имеет наибольшее значение для смеси R14-R600. Эксергетический КПД цикла при использовании смеси R14-R600 значительно превышает η_e для цикла с изотермическим сжатием, реализуемом на смеси R14-R290 указанного оптимального состава. Наилучшая для изотермических условий смесь R14-R290 в КДСО, работающем по циклу с адиабатным сжатием, не дает увеличения η_e . Связано это с тем, что оптимальный состав R14-R290 остался прежним, а работа возросла. Увеличение η_e для смеси R14-R600 объясняется тем, что при отсутствии ограничений на сухой ход компрессора в рабочем теле можно повышать содержание R600, обладающего значительно большим, чем у R14, интегральным изотермическим дроссель-эффектом при давлениях P_1 и P_2 . Если сравнить составы по содержанию R600 для циклов с изотермическим и адиабатным сжатием, то они отличаются примерно в 1,5 раза.

Аналогичные сравнительные расчеты проводились и на уровни охлаждения 120 и 200 К.

Расчет энергетических характеристик цикла с фиксированным составом \bar{z} составлял на ЕС-1022 0,5...0,75 мин. машинного времени. На определение оптимального состава \bar{z}^* , отвечающего максимальному значению эксергетического КПД цикла при заданном $P_{sm}(T_c)$, затрачивается машинного времени 1...1,5 мин.

По описанному алгоритму проведены расчеты $q-T$ -зависимостей для МРТ на уровни охлаждения 120, 150 и 200 К. На рис. 4 представлены типичные кривые для прямого ($P_2 = 1,136$ МПа) и обратного ($P_2 = 0,142$ МПа) потоков теплообменника, рассчитанные для цикла (без учета надорекуперации) на смеси R14-R600A при $T_c = 150$ К, $T_0 = 300$ К. Добавление низкокипящего компонента необходимо в случае пересечения или касания кривых прямого и обратного потоков, построенных в координатах $q-T$. Расчет $q-T$ -зависимости теплообменника на бинарной смеси с числом разбиений равным 10 на ЕС-102 составляет 0,5...1 мин. машинного времени.

На рис. 5 показаны расчетные зависимости η_e и Q_x от степени повышения давления ψ для КДСО на чистых R14 и R23, а также на перечисленных ранее бинарных смесях оптимальных составов. Расчеты проведены с учетом данных для $\lambda(\psi)$ и $\eta_{sl}(\psi)$ герметичного компрессора марки К 0,63 с $V_h = 0,19 \cdot 10^{-3}$ м³/с. На этом этапе рас-

Рис. 4. q - T -зависимости для смеси R14-R600A при $P=0,142$ МПа, $P=1,136$ МПа (---) оптимального состава $Z_1 = 0,621$ моль/моль, (—) — для состава $Z_1 = 0,693$ моль/моль, при котором выполняется теплообмен

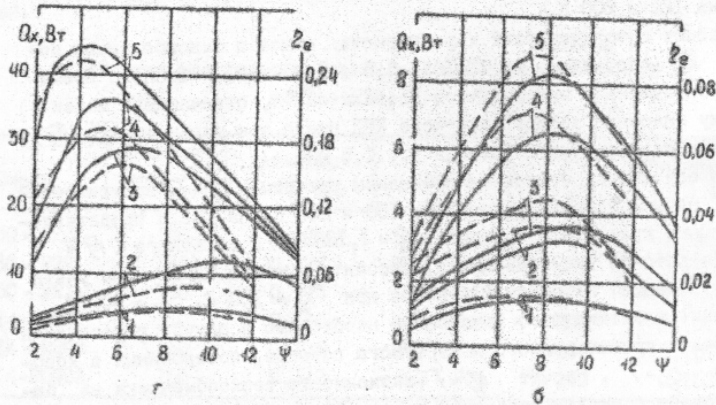
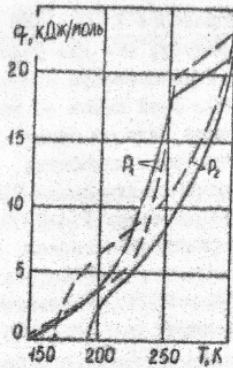


Рис. 5. Зависимости Z_e (пунктирные линии) и Q_x (сплошные) КДСО от степени повышения давления: а) $T_c=200$ К; R23-1; R23-R290-2; R23-R600A-3; R23-R600-4; R23-R21-5 и б) $T_c=150$ К; R14-1; R14-R22-2; R14-R22-2; R14-R290-3; R14-R600A-4; R14-R600-5

четов потери от недорекуперации q_n и теплопритоков из окружающей среды q_r не учитывались. Характерным для КДСО, создаваемых как на чистых веществах, так и на смесях, является существование давлений P_e , соответствующих максимумам q_e и Q_x . Причем, с ростом P_e состав изменяется в сторону увеличения содержания низкокипящих компонентов. Оптимальные значения ψ для смесей на основе R14, так же как и на основе R50, оказываются близкими и лежат в интервале 7...9. Смесям на основе R23 отвечают существенно разные $\psi = 4...11$.

Разработанная методика расчета экстремальных значений характеристик КДСО позволяет учитывать не только объемные и энергетические характеристики компрессора, но дает возможность принимать во внимание и потери от недорекуперации и теплопритоков из окружающей среды. Например, анализировалось изменение энергетических характеристик КДСО, работающей на смеси R14-R600, с учетом потерь в компрессоре и рекуперативном теплообменнике, при режиме с $P=0,142$ МПа, $\psi=8$, $T_c=300$ К, $T_x=150$ К. Из табл.2 видно, что при оптимизации с учетом данных потерь смесям отвечают составы, более обогащенные высококипящим компонентом. Это позволяет уменьшить снижение q_e и Q_x . Когда же Z^* рассчитывается только для цикла с потерями от внутренней необратимости, эксергетический КПД и холодильная производительность действительной КДСО, как следует из табл.2, уменьшаются более существенно, чем в предыдущих случаях.

Таблица 2
Энергетические характеристики КДСО с различными потерями от недорекуперации и теплопритоков

Z_1 , моль/моль	Z_2 , моль/моль	T_c , К	q_n , Дж/моль	α	q_r , Дж/моль	Q_x , Вт	q_e
0,694	0,306	300	0	0	0	8,13	0,088
0,662	0,338	280	1457,0	0	0	5,67	0,066
0,685	0,315	300	0	0,2	430,3	7,36	0,079
0,645	0,355	280	1469,4	0,2	650,4	4,84	0,056
0,694	0,306	280	1434,0	0	0	2,00	0,023
0,694	0,306	300	0	0,2	380,8	6,51	0,070
0,694	0,306	280	1434,0	0,2	380,8	0,38	0,004

3. Энергетические характеристики КДСО на трехкомпонентных расслаивающихся смесях оптимальных составов

С увеличением числа компонентов до трех существенно возрастает трудность, связанная с постановкой задачи определения оптимальных

составов рабочих тел КДСО. Необходимо, например, учитывать, в какой области фазового равновесия (жидкость-пар, жидкость-жидкость, жидкость-жидкость-пар) при заданных P, T_c, \bar{Z} находится смесь, так как расчет оптимальных составов в каждой области производится по-разному.

Если смесь при P, T_c, \bar{Z} находится в состоянии парожидкостного равновесия, то определение оптимальных составов, отвечающих максимальному значению эксергетического КПД необходимо проводить следующим образом. Обозначим через Z_1, Z_2, Z_3 мольный состав смеси, располагая компоненты в порядке возрастания их критической температур. В треугольнике составов, где $0 \leq Z_1 \leq 1, 0 \leq Z_2 \leq 1 - Z_1, Z_3 = 1 - Z_1 - Z_2$, выделяется область, ограниченная одной из возможных кривых, соответствующих достижению заданной температуры охлаждения в двухфазной (парожидкостной) области при условии осуществимости теплообмена согласно (5). Затем в треугольнике составов выделяется зона, являющаяся пересечением двух областей, одна из которых ограничена сторонами треугольника и двумя кривыми - кипения и конденсации, а другая - теми же сторонами треугольника и кривой, отвечающей условию (5). Алгоритм определения оптимального состава строится следующим образом. Полагая $Z_2 = 0$, находим Z_{3max} , т.е. наибольшее значение концентрации третьего компонента вдоль кривой, заданной ограничением (5). При $Z_3 = idem$ из неравенства $0 \leq Z_3 \leq Z_{3max}$ и с использованием одномерной минимизации по методу золотого сечения находят $0 \leq Z_2 \leq Z_{2max}$, а по этим значениям $Z_1 = 1 - Z_2 - Z_3$, при которых эксергетический КПД принимает максимальное значение. Аналогично определяется значение Z_{2max} при $Z_3 = 0$.

Расчет оптимальных составов, холодопроизводительности и эксергетического КПД при одном фиксированном значении Z_2 оставляет примерно 6 мин. машинного времени.

На сторонах и внутри треугольника трехфазного равновесия $\triangle L'LV$ оптимальные составы определяются по-другому. Зная концентрации в вершинах треугольника $\bar{x}', \bar{x}, \bar{y}$, по методу половинного деления определяем оптимальные составы на сторонах треугольника. Оптимальный состав внутри треугольника $\triangle L'LV$ лежит на прямой $Z_3 = const$, где Z_3 - концентрация высококипящего компонента, полученная на стороне $L'V$.

Расчет энергетических параметров цикла с фиксированным составом \bar{Z} , находящемся внутри треугольника трехфазного равновесия, составляет 1...1,5 мин машинного времени.

На рис.6 представлен треугольник трехфазного равновесия $\triangle L'LV$ для смеси R14-R23-R600 при $T_c = 200$ К, $P = 0,3$ МПа (а) и зависи-

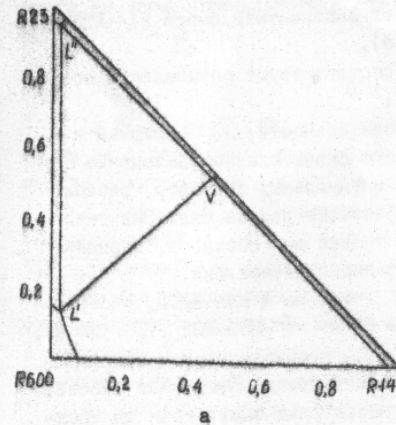


Рис.6. Треугольник трехфазного равновесия $\triangle L'LV$ смеси R14-R23-R600 при $T_c = 200$ К, $P = 0,3$ МПа (а). Зависимость значений η_c (---) и Q_c (—) от ψ (б) бинарной смеси R23-R600 (1) и смеси R14-R23-R600 при фазовых состояниях: 2-равновесие жидкость-пар; 3-на горне треугольника жидкость-пар; 4-на стороне треугольника жидкость-жидкость

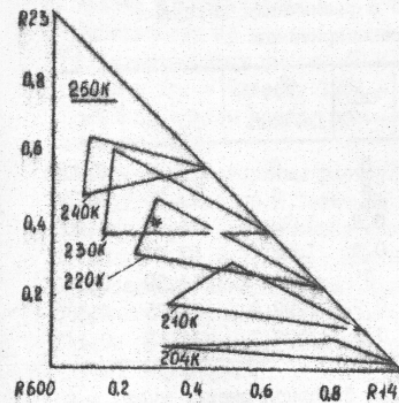


Рис.7. Треугольники трехфазного равновесия при давлении прямого потока $P = 1,5$ МПа в различных температурных сечениях для смеси R14-R23-R600

* - исследуемый состав

мость значений η_e и Q_x КДСО от степени повышения давлений для бинарной смеси R23-R600 (1) и для трехкомпонентной смеси RI4-R23-R600 при разных фазовых состояниях (6).

Наивысшие значения η_e и Q_x соответствуют оптимальным составам, определенным на стороне L_2'' .

Сравнивая значения холодопроизводительности Q_x бинарной и трехкомпонентной смесей, можно отметить значительное увеличение Q_x при введении третьего компонента для оптимальных составов, рассчитанных во всех характерных областях фазового равновесия. Значение же η_e трехкомпонентной смеси выше только для составов, определенных на сторонах треугольника трехфазного равновесия.

Аналогичные результаты получены так же и для КДСО, работающих на смесях R50-RI4-R600 ($T_x = 150$ К) и Ar-R50-R22 ($T_x = 120$ К).

Алгоритм расчета зависимости $q(T)$, необходимый для анализа выполнимости теплообмена при использовании трехкомпонентных смесей, аналогичен описанному ранее. Однако, необходимо знать границы трехфазного равновесия на каждом из потоков и в температурных сечениях определять фазовое состояние точки, для которой ведется расчет H . На рис. 7 приведено положение точки с концентрацией $Z_1 = 0,3$ моль/моль, $Z_2 = 0,4$ моль/моль, $Z_3 = 0,3$ моль/моль относительно треугольников трехфазного равновесия в температурных сечениях, характерных для прямого потока теплообменника ($P = 1,5$ МПа).

Анализировалось влияние потерь от недорегуляции и теплопритоков из окружающей среды на оптимальные параметры цикла КДСО для смеси RI4-R23-R600 в области фазового равновесия жидкость-жидкость при $P = 0,3$ МПа, $T_x = 200$ К, $P_2 = 1,5$ МПа.

Таблица 3
Энергетические характеристики КДСО с различными потерями от недорегуляции и теплопритоков

Z_1 , МОЛЬ МОЛЬ	Z_2 , МОЛЬ МОЛЬ	Z_3 , МОЛЬ МОЛЬ	T_6 , К	q_{in} , Дж/моль	α	q_{in} , Дж/моль	Q_x , Вт	η_e
0,027	0,568	0,405	300	0	0	0	79,81	0,232
0,027	0,540	0,433	280	1436,0	0	0	71,20	0,255
0,027	0,540	0,433	300	0	0,2	1436,4	71,17	0,207
0,027	0,524	0,49	280	1451,0	0,2	1522,0	57,43	0,182
0,027	0,568	0,405	280	1409,7	0	0	62,39	0,196
0,027	0,568	0,405	300	0	0,2	1292,0	63,85	0,185
0,027	0,568	0,405	280	1409,7	0,2	1292,0	46,43	0,143

Из табл. 3 видно, что так же, как и для бинарной смеси, учет потерь q_n и q_r позволяет увеличить содержание высококипящего компо-

нента в смеси оптимального состава, что значительно влияет на изменение Q_x и η_e .

В В О Д И

1. Разработку КДСО на уровне температур 200, 150 и 120 К следует вести на основе цикла с адиабатным сжатием бинарных и трехкомпонентных расслаивающихся смесей в компрессоре с одноступенчатым сжатием.

2. Расчет $q-T$ зависимости для теплообменника, например на бинарной смеси с $n = 10$ составляет на ЭЕМ ЕС-1022 примерно 0,5...1,0 мин. машинного времени.

3. Для расслаивающихся смесей на основе RI4, R50 с высококипящими компонентами оптимальные степени повышения давления ψ лежат в интервале 7...9. Для расслаивающихся смесей на основе R23 интервал изменения оказывается широким ($\psi = 4...11$).

4. Алгоритм определения оптимальных составов расслаивающихся бинарных смесей цикла КДСО не требует больших затрат машинного времени. На определение оптимального состава Z^* , отвечающего максимальному значению эксергетического КПД цикла при заданном $P_{em}(T)$, затрачивается машинного времени 1,5...2,0 мин.

5. Энергетические характеристики КДСО, работающей на бинарной расслаивающейся смеси, уступают характеристикам КДСО, использующих трехкомпонентные расслаивающиеся смеси, создаваемые на основе тех же компонентов бинарной смеси, но с добавлением более низкокипящего вещества.

Основное содержание диссертации изложено в работах:

1. Анализ и оптимизация энергетических характеристик дроссельных рефрижераторов на уровень охлаждения 150 К, работающих на бинарных расслаивающихся смесях / Г.К. Лавренченко, А.В. Троценко, Н.И. Додельцева и др. - Одесса, 1983 - 26 с. - Рукопись представлена Одесск. технол. ин-том холод, пром-сти. Деп. в УкрНИИТИ 9.08.83 г., № 9144к-Д83.
2. Обобщенные алгоритмы расчета дроссельных циклов / Н.И. Додельцева, Г.Я. Рувицкий, Э.И. Табачник и др. - В кн.: Тезисы докладов Всесоюзной научно-технической конференции "Микрокриогенная техника-84" (Омск, 1984 г.), - М.: ЦИТИХимнефтемап, 1984, с. 33.
3. Обобщенные алгоритмы расчета термодинамических свойств чистых фреонов и их смесей / Г.К. Лавренченко, В.Н. Анисимов, Н.И. Додельцева и др. - Теплофизические свойства веществ и материалов, 1985 г., вып. 20, с. 33-55.

xv 1096
ИНСТИТУТ ХОЛОДА
ОНАХТ
БИБЛИОТЕКА

4. Расчет и анализ φ - T -диаграммы двухточечного теплообменника на многокомпонентных рабочих телах А.И.Додельцева, Г.К.Лавренченко, Г.Я.Рувинский и др. - Холодил. техника и технология: Респ. межвед. науч.-техн. сб., 1985, вып.39, с.62-65.
5. О существовании оптимальных рабочих тел дроссельных рефрижераторов / Г.К.Лавренченко, Н.И.Додельцева, Э.И.Табачник и др. - Холодил. техника и технология: Респ. межвед. науч.-техн. сб., 1985, вып.40, с.38-46.

Условные обозначения

T - температура; P - давление; H - энтальпия; S - энтропия;
 Z - валовой (заправочный) состав МРТ; \bar{x} и \bar{y} - равновесные составы жидкой и паровой фаз, соответственно; q - тепловая нагрузка на теплообменник; q_i - тепловая нагрузка на i элементов теплообменника; λ , $\lambda_{эл}$ - коэффициент подачи и электрический КПД компрессора; $V_{\frac{1}{2}}$ - секундный объем, описываемый поршнем компрессора; $f(\theta)$ - энергетическая температурная функция; v - удельный объем; α - доля потери удельной холодопроизводительности от теплопритоков из окружающей среды.

Лавр

Подп. к печати 23.05.85 г. Формат 60 x 84 1/16,
 Объем 0,75 уч.изд. л., 1,0 л.л. Заказ № 036, Тираж 100 экз.,
 Гортипография Одесского облполиграфиздата, цех № 3,
 Ленина, 49.

