

Автореферат
р 82

проф. Рувинский Г.Я.
ОДЕССКИЙ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЙ ИНСТИТУТ ХОЛОДИЛЬНОЙ ПРОМЫШЛЕННОСТИ

На правах рукописи

РУВИНСКИЙ Генрих Яковлевич

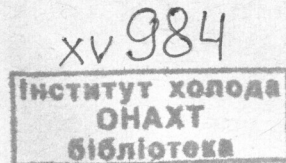
УДК 532.77:621.564.2

МЕТОДЫ РАСЧЕТА ФАЗОВЫХ РАВНОВЕСИЙ И ТЕРМОДИНАМИЧЕСКИХ
ПАРАМЕТРОВ СОСТОЯНИЯ МНОГОКОМПОНЕНТНЫХ РАБОЧИХ ТЕЛ
СИСТЕМ ОХЛАЖДЕНИЯ

Специальность 05.14.05 - Теоретические основы теплотехники
(включая техническую термодинамику и тепло- и массообмен)

А В Т О Р Е Ф Е Р А Т

диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук



Одесса - 1984

Работа выполнена в Одесском технологическом институте
холодильной промышленности.

Научный руководитель – к.т.н., доцент Г.К.Лавренченко

Официальные оппоненты : доктор технических наук, профессор
В.А. Загорученко;
кандидат технических наук, ст.н.с.
В.И. Недоступ.

Ведущая организация: ФТИИТ АН УССР, г.Харьков.

Защита состоится "13" января 1984г. в 11 часов
на заседании специализированного совета К.068.27.01 при Одесском
технологическом институте холодильной промышленности по адресу:
2700057, г.Одесса, ул.Петра Великого,1/3, ОТИИП.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке института.

Ученый секретарь

специализированного совета

к.т.н., доцент

Р.К. Никульшин

Исх. № 20-03-1983

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы. Системы охлаждения, создаваемые на многокомпонентных рабочих телах (МРТ), обладают, по сравнению с аналогичными системами на чистых веществах, более высокими значениями эксергетического КПД и удельной холодопроизводительности. Для формирования МРТ систем охлаждения на уровне криогенных температур, а также температур из диапазона 120-200К используются десятки различных веществ. Экспериментально определить термодинамические свойства всех МРТ, особенно в состоянии фазового равновесия, практически невозможно.

Определение оптимальных состава смеси и параметров цикла, отвечающих экстремальным значениям характеристик систем охлаждения, требуют создания эффективных методов расчета термодинамических свойств МРТ в однофазной области и состоянии фазового равновесия типа жидкость-пар, жидкость-жидкость и жидкость-жидкость-пар.

Исследования по данной теме связаны с реализацией заданий комплексной проблемы "Теплофизика", а также других важнейших научно-исследовательских работ.

Целью данной работы является разработка методов расчета фазовых равновесий и термодинамических параметров МРТ на основе единых уравнений состояния (ЕУС) произвольной формы.

Научная новизна. Впервые предложен способ прямого расчета термодинамических параметров состояния чистых веществ и смесей постоянного состава при использовании температуры в качестве одной из независимых переменных. Для бинарных смесей разработан независимый от формы ЕУС метод предсказания и расчета фазовых равновесий жидкость-пар, жидкость-жидкость и жидкость-жидкость-пар. Созданы методы расчета двухфазных равновесий жидкость-пар и жидкость-жидкость многокомпонентных смесей и трехфазных равновесий жидкость-жидкость-пар трехкомпонентных расслаивающихся МРТ.

Основные научные положения, новизна которых защищается в работе.

1. Применение к ЕУС произвольной формы метода обращения степенных рядов позволяет прямым расчетом определять термодинамические параметры состояния чистых веществ и смесей постоянного состава при использовании температуры как одной из независимых переменных.

К 0,04м
37,9 Вт
ВИДОМ ИЗОЛТА

2. Для гетерогенных состояний жидкость-пар, жидкость-жидкость, жидкость-жидкость-пар, газ-газ бинарных смесей существует соответствие между указанными типами фазовых равновесий и конкретным видом диаграммы летучести.

3. Расслоение в бинарной паре, образованной промежуточным и высококипящим компонентами тройной смеси, определяет необходимость учета области равновесий жидкость-жидкость-пар при расчетах энергетических характеристик циклов систем охлаждения.

Основные результаты работы:

1. Предложен основанный на обращении степенных рядов метод прямого расчета термодинамических параметров состояния чистых веществ и смесей постоянного состава при использовании температуры в качестве одной из независимых переменных.

2. Разработан метод определения типа фазовых равновесий и расчета составов сосуществующих фаз бинарных смесей, свойства которых описываются ЕУС произвольной формы.

3. Создан метод расчета равновесий жидкость-пар и жидкость-жидкость многокомпонентных смесей в любой точке гетерогенного состояния МРТ.

4. Предложен метод определения интервалов существования и расчета составов фаз при равновесии жидкость-жидкость-пар в трехкомпонентных расслаивающихся смесях.

Практическая ценность работы.

Предложенные в работе методы расчета ряда термодинамических свойств многокомпонентных смесей предназначены для формирования эффективных рабочих тел и выбора оптимальных параметров холодильных и криогенных установок.

Разработанные методы широко применялись в опытно-конструкторских разработках систем охлаждения на предприятиях: ФТИНТ АН УССР, г. Харьков; НПО "Криогенмаш", г. Балашиха.

Апробация работы. Основные положения диссертации доложены на 3-х Всесоюзных научно-технических конференциях, а также на ежегодных научных конференциях ОТИХП 1980-1984 гг. По теме диссертации опубликовано 9 работ.

Структура и объем работы. Диссертация состоит из введения, 4-х глав, заключения и выводов. Объем работы 129 стр. основного текста (включая 29 рисунков, 22 таблицы и 2 страницы приложения). Библиография содержит 67 наименований.

СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении обоснована актуальность работы, сформулированы цели и задачи исследования, изложены научные положения, основные результаты работы, практическая ценность.

I. Задачи настоящего исследования и требования, предъявляемые к методам их решения

Данная работа посвящена методам расчета термодинамических параметров МРТ, определяемых представленными в табл. I функциями состояния.

Таблица I

Функции состояния МРТ, необходимые при расчетах и оптимизации циклов систем охлаждения

№	Заданные параметры	Функции состояния	Задачи и процессы, анализ которых основан на расчете указанных функций
I.	P, T, \bar{z}	$\rho, H, S,$ f_i, \bar{x}, \bar{y}	Охлаждение (конденсация) или нагрев (испарение) при заданной температуре конца процессов. Расчет составов равновесных фаз
2.	P, T, \bar{z}	ρ, H, S	Расчет состояния гомогенной фазы
3.	S, T, \bar{z}	ρ, H, P	
4.	H, T, \bar{z}	ρ, S, P	Дросселирование, сжатие, расширение, смещение потоков
5.	S, P, \bar{z}	ρ, T, H	
6.	H, P, \bar{z}	ρ, T, S	

Эти параметры необходимы для выбора компонентов и оптимального состава МРТ, оптимизации характеристик циклов холодильных (ХУ) и криогенных (КУ) установок.

Методы решения представленных задач должны быть пригодны для использования в широких диапазонах изменения температур и давлений, характерных для современных систем охлаждения. Эффективность применения расслаивающихся смесей в качестве рабочих тел предопределяет необходимость расчета фазовых равновесий жидкость-жидкость и жидкость-жидкость-пар. Жесткие требования предъявляются к быстродействию и надежности предлагаемых алгоритмов.

Существующие методы расчета термодинамических свойств МРТ имеют ряд существенных недостатков. Как правило, эти методы требуют дополнительной информации и больших затрат машинного времени. Они в основном рассчитаны на применение конкретного ЕУС и к тому же в ограниченной области изменения термических параметров или ориентированы на последовательный расчет таблиц.

Поэтому для решения перечисленных в табл. I задач необходимо создание новых методов, не зависящих от формы ЕУС, пригодных для расчета свойств в произвольной точке цикла и не требующих иной информации, за исключением собственно ЕУС и идеально-газовых свойств.

2. Метод прямого расчета термодинамических параметров состояния МРТ

Рассмотрим вначале метод расчета плотности как функции температуры и давления. Он основан на разложении любого исходного ЕУС

$$\pi = \pi(\omega, \tau) \quad (1)$$

в окрестности некоторой точки ω_0 в ряд

$$\pi = \pi_0(\omega_0, \tau) + \sum_{i=1}^{\infty} B_i(\tau)(\omega - \omega_0)^i \quad (2)$$

Тогда, в соответствии с теоремой об обращении степенных рядов, для обратной функции $\omega(\tau, \pi)$ в некоторой окрестности точки π_0 имеет место разложение в ряд Бюрмана-Лагранжа:

$$\omega = \omega_0(\tau, \pi) + \sum_{i=1}^{\infty} A_i(\tau)(\pi - \pi_0)^i \quad (3)$$

Такое разложение справедливо во всей области применения ЕУС (I), за исключением критической точки. Коэффициенты $A_i(\tau)$ связаны с $B_i(\tau)$ соотношением:

$$A_i(\tau) = \frac{A}{i!} \left[\frac{1}{B_i(\tau)} \right]^i d_i(\tau), \quad (4)$$

где

$$d_0(\tau) = 1, \\ d_e(\tau) = \frac{1}{e} \sum_{j=1}^e (j \cdot i - \ell + j) d_{e-j}(\tau) C_j(\tau), \quad i = 1, 2, \dots,$$

$$C_0(\tau) = 1, \quad C_1(\tau) = B_2(\tau)/B_1(\tau),$$

$$C_\kappa(\tau) = - \sum_{j=1}^{\kappa} C_{\kappa-j}(\tau) B_{j+1}(\tau)/B_1(\tau), \quad \kappa \geq 2.$$

В качестве точки ω_0 выбрано значение приведенной плотности, вычисляемое по аналитически разрешимому относительно ω модельному ЕУС

$$\pi = \frac{\delta \tau \omega_0}{3 - \omega_0} - \frac{3 \omega_0^2}{\tau^{0.5}} \quad (5)$$

Введение температурного множителя $\tau^{-0.5}$ в ЕУС (5), представляющем модификацию уравнения состояния Ван-дер-Ваальса, обеспечивает на линии насыщения выполнение условия

$$\pi_{min} \leq \pi_s \leq \pi_{max} \quad (6)$$

Здесь π_s - давление насыщения, рассчитываемое по исходному ЕУС (I); π_{max} и π_{min} - максимальное и минимальное давления, ограничивающие участок механической неустойчивости изотермы модельного ЕУС. Неравенство (6) является необходимым условием существования двух решений по плотности (жидкость, пар) для (5) при изменении π и τ вдоль линии насыщения.

Кроме того, при таком выборе точки ω_0 выполняется условие

$$|\Delta \omega| = |\omega - \omega_0| \leq 0,5, \quad (7)$$

что обеспечивает, как показывает анализ расчетных результатов, сходимость ряда (3) во всей области применения ЕУС (I).

Использование в обоих уравнениях приведенных координат

$$\pi = P/P_m, \quad \tau = T/T_m, \quad \omega = \rho/\rho_m \quad (8)$$

позволило доопределить функцию $\omega(\pi, \tau)$ в критической точке. Параметры приведения P_m , T_m , ρ_m определялись для исходного и модельного ЕУС из системы уравнений, совпадающих с критическими условиями для чистых веществ.

Исследования показали, что относительная погрешность определения давления $\Delta \pi$ связана с относительной погрешностью в вычислении плотности $\Delta \omega$ примерным соотношением $\Delta \pi \leq 30 \Delta \omega$. Задаваясь (на основе анализа опытных данных) максимальной погрешностью $\Delta \pi_m =$

$=0,1\%$, получаем значение максимальной погрешности $\Delta \omega_m = 0,003\%$. Указанная погрешность по плотности во всех исследованных случаях достигалась при использовании не более 10 членов ряда (3).

Изложенный выше метод распространен на расчет термодинамических параметров состояния с независимыми переменными (T, S) и (T, H) . Произведено сравнение различных модельных ЕУС. В итоге для определения $\omega_0(\tau, S)$ было выбрано уравнение Ван-дер-Ваальса, как единственное, аналитически разрешимое относительно плотности и обеспечивающее выполнение условия (7) во всей области применения исходного ЕУС.

Показано, что для расчета $\omega_0(\tau, h)$ могут быть применены различные кубические относительно плотности ЕУС, но в приведенных координатах. В качестве параметров приведения необходимо использовать на изотерме координаты точек инверсии исходного и модельного ЕУС. Такой выбор ω_0 позволяет разделить участки неоднозначности функции $\omega(\tau, h)$ на изотерме. Кроме того, поскольку в точке инверсии

$$\frac{\partial \omega(\tau, h)}{\partial h} = 0,$$

разложение в ряд (3) в окрестности этой точки не существует. Использование же приведенных таким образом координат доопределяет функцию $\omega(\tau, h)$ в точках инверсии.

Расчеты, выполненные для N_2 , O_2 , $He4$, а также ряда азот-углеводородных и фреоновых смесей постоянного состава, свойства которых описывались полиномиальными ЕУС и различными модификациями БВР, подтвердили независимость метода от формы ЕУС. Быстрое действие программы для ЭВМ, реализующей этот метод, позволяет широко использовать его в оптимизационных задачах, включая расчеты в реальном масштабе времени.

3. Метод расчета фазовых равновесий в бинарных смесях

Вначале обоснована необходимость разработки и описано содержание метода расчета фазовых равновесий жидкость-жидкость, жидкость-пар, жидкость-жидкость-пар в бинарных смесях на основе ЕУС произвольной формы. Главная задача, решению которой посвящен раздел, формулируется следующим образом: при заданных значениях давления и температуры определить возможность существования фазового равновесия и его тип, а также составы равновесных фаз.

Равновесные составы фаз определяются решением системы уравнений:

$$f_i^L(P, T, x) = f_i^V(P, T, y), \quad i=1,2. \quad (9)$$

Основу алгоритма, разработанного для решения поставленной задачи, составляет анализ зависимостей летучестей компонентов смеси от состава каждой из фаз при фиксированных P и T . На рис. 1 представлены основные виды диаграмм летучести, соответствие которых рассматриваемым типам фазовых равновесий было установлено в процессе сравнения с опытными данными. Диаграммы I(1)–I(6) характерны для парожидкостного равновесия нераслаивающихся смесей либо раслаивающихся смесей при температурах, больших критической температуры расслоения T_{cl} . Диаграммы I(7)–I(10) соответствуют различным типам фазовых равновесий в раслаивающихся смесях при $T < T_{cl}$.

Выяснение вида диаграммы летучести включает в себя поиск составов, разделяющих области однозначности и неоднозначности функции $f_i(x)$, определение знаков разностей $\delta_i(x) = f_i^L(x) - f_i^V(y)$ для этих составов и чистых веществ, образующих смесь; расчет стационарных точек. Такая процедура полностью поддается алгоритмизации и не зависит от формы ЕУС.

В процессе определения вида диаграммы летучести выделяются интервалы изоляции независимых переменных $x \in (x_{N1}, x_2)$ и $y \in (y_{N1}, y_2)$, как максимальные отрезки на оси составов, внутри которых выполняется условие термодинамической стабильности. Знание интервалов изоляции дает возможность контролировать значения независимых переменных на каждом этапе итерационного процесса, исключает тождественные и термодинамически нестабильные решения. Способ построения начальных приближений x_0 и y_0 для решения системы (9) в предлагаемом методе основан на аппроксимации летучестей компонентов в жидкой и паровой фазах в пределах соответствующих интервалов изоляции зависимостями:

$$f_i^L(x) = a_{ii} + a_{2i}x + a_{3i}x^2, \quad i=1,2; \quad (10)$$

$$f_i^V(y) = a_{4i} + a_{5i}y, \quad i=1,2. \quad (11)$$

Подставляя (10) и (11) в (9), получаем систему уравнений, решение которой используется в качестве начальных приближений.

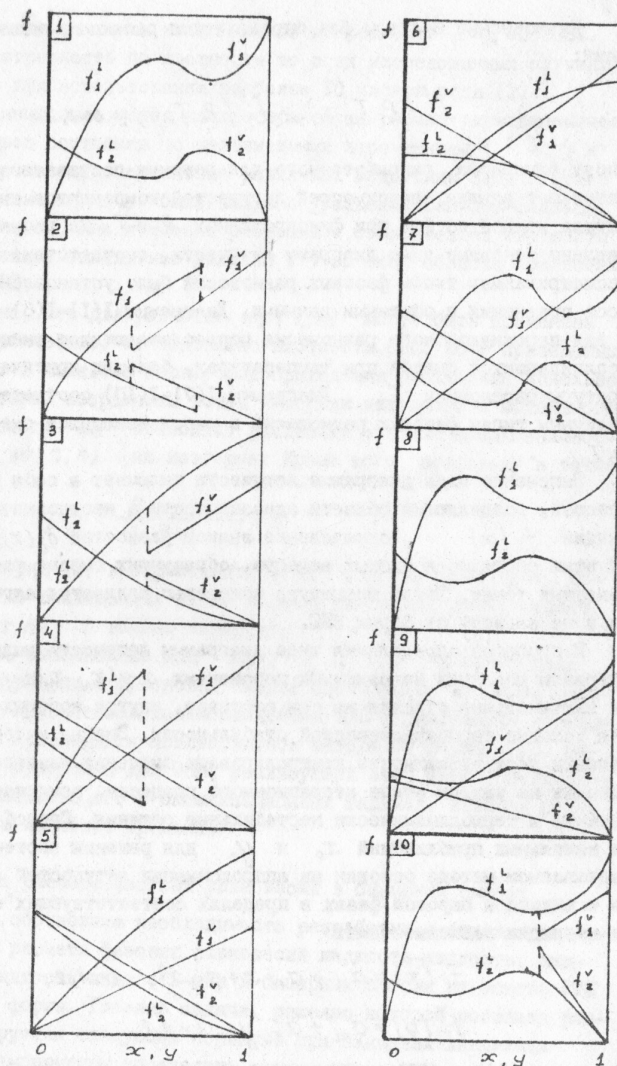


Рис. I. Основные виды зависимости летучести компонентов бинарной смеси от составов для каждой из фаз

Типичное соответствие начальных приближений и расчетных равновесных составов иллюстрируется табл. 2 на примере смеси N_2-CH_4 . Расчет выполнен на изотерме $T=130K$ по уравнению Редлиха-Квонга в модификации Соава.

Таблица 2
Начальные приближения и расчетные равновесные составы смеси N_2-CH_4 на изотерме 130K

$P, \text{ МПа}$	Начальные значения		Равновесные составы	
	x_0	y_0	x	y
0,4101	0,0077	0,0778	0,0075	0,0779
0,4492	0,0171	0,1574	0,0167	0,1577
0,6508	0,0659	0,4155	0,0655	0,4181
0,7695	0,0952	0,5041	0,0953	0,5083
1,4841	0,2919	0,7332	0,2936	0,7505
2,2550	0,5204	0,8251	0,5421	0,8477
3,4360	0,8911	0,9329	0,8966	0,9381

Такой способ построения начальных приближений не зависит от типа фазовых равновесий и согласован с конкретным ЕУС.

При разработке метода в качестве ЕУС смеси применялись уравнения БЕР и Редлиха-Квонга в модификации Вильсона (РКВ) и Соава (РКС). Анализ результатов расчетов показал, что уравнения РКВ и РКС обеспечивают (по сравнению с БЕР) существенно лучшее описание парожидкостного равновесия. Объясняется это прежде всего использованием в РКВ и РКС интерполяционных констант, определяемых из опытных данных по смеси и её компонентам.

Для часто применяемого уравнения РКВ проанализировано влияние константы перекрестного взаимодействия θ на составы равновесных фаз на примере расслаивающихся смесей RI4- C_3H_8 и RI4-R22. Наиболее чувствительными к изменению θ оказались параметры равновесия жидкость-жидкость. Так, для смеси RI4-R22 изменение величины θ от 0,711 до 0,720 приводит к повышению расчетной критической температуры расслоения на 10K. Поэтому для надежного описания фазовых равновесий криоагентов с помощью ЕУС РКВ необходимо использовать для поиска θ опытные данные по равновесию жидкость-жидкость и жидкость-жидкость-пар.

При определении составов равновесных фаз максимально допустимая погрешность варьировалась в интервале $5 \cdot 10^{-5} - 1 \cdot 10^{-3}$ в зависи-

мости от компонентов смеси, давления и температуры.

В процессе разработки и применения предлагаемого метода были выполнены расчеты фазовых равновесий жидкость-пар, жидкость-жидкость, газ-газ и жидкость-жидкость-пар для более чем 50 бинарных смесей, в том числе для азеотропной смеси R22-RI2, гетероазеотропной - R23-C₃H₈, а также для смесей, компоненты которых резко отличаются по критическим температурам (He⁴-RI3, He⁴-RI4, H₂-RI3, H₂-RI4). Во всех случаях наблюдалась устойчивая работа алгоритма, а время расчета одной точки не превышало 0,5-1,0 сек. машинного времени для ЕС-1022.

4. Методы расчета равновесий жидкость-пар и жидкость-жидкость в МРТ и трехфазных равновесий в тройных расслаивающихся смесях

Основная задача, которая наиболее часто встречается в расчетах систем охлаждения, формулируется следующим образом: определить составы двух сосуществующих фаз МРТ заданного валового состава при фиксированных значениях температуры и давления. Система уравнений, описывающих фазовые равновесия для такой постановки задачи, имеет вид:

$$f_i^L(P, T, \bar{x}) = f_i^V(P, T, \bar{y}), \quad (I2)$$

$$x_i m + y_i (1 - m) = z_i, \quad i = 1, \dots, N.$$

Начальные приближения, необходимые для решения системы (I2), на первом этапе определяются с помощью полученной из модели идеального раствора константы равновесия:

$$K_i = P_{ki} / P \{ \exp [5,9 (1 - T_{ki} / T)] \}, \quad i = 1, \dots, N. \quad (I3)$$

Анализ расчетных результатов для смесей, образованных фреонами, углеводородами, N₂ и CO₂, показал, что модель (I3) обеспечивает значительно лучшее описание паровой фазы по сравнению с жидкой. Улучшение начальных значений составов жидкой фазы достигается согласованием значений летучести низкокипящего компонента в паровой и жидкой фазах:

$$x_i = \frac{f_{i0}^V}{f_{i0}^L} x_{i0}, \quad m = \frac{z_i - y_{i0}}{x_i - y_{i0}}. \quad (I4)$$

Здесь индексом "0" обозначены летучести низкокипящего компонента, рассчитанные для составов \bar{x}_0 и \bar{y}_0 , полученных по соотношению (I3).

В качестве иллюстрации типичного результата такого подхода в табл. 3 для смеси N₂-CH₄-C₃H₈ представлены начальные приближения - I, рассчитанные по соотношению (I3), их модификация - II по паровой фазе и равновесные составы - III, вычисленные по уравнению РКВ при P = 0,492 МПа и T = II4, IK.

Таблица 3
Сравнение различных начальных приближений с рассчитанными по уравнению РКВ равновесными составами для смеси N₂-CH₄-C₃H₈

Компоненты	I		II		III	
	x ₀	y ₀	x ₀	y ₀	x	y
N ₂	0,2502	0,9955	0,0810	0,9955	0,0528	0,9913
CH ₄	0,0211	0,0044	0,0250	0,0044	0,0195	0,0086
C ₃ H ₈	0,7287	0,0001	0,8940	0,0001	0,9277	0,0001
m	0,5268		0,4293		0,4138	

Во всех исследованных смесях такое согласование существенно улучшало начальные значения составов жидкой фазы и доли жидкости.

В процессе решения системы (I2) обеспечивалось выполнение разработанной системы ограничений:

$$\begin{aligned} 0 < x_i < z_i, \quad z_i < y_i < 1, \quad \text{при } \kappa_i > 1; \\ 0 < y_i < z_i, \quad z_i < x_i < 1, \quad \text{при } \kappa_i < 1; \\ m \leq \min \left\{ \frac{z_i}{x_i}, \frac{1 - z_i}{1 - x_i} \right\}, \quad i = 1, \dots, N. \end{aligned} \quad (I5)$$

Максимальная погрешность определения составов сосуществующих фаз и доли жидкости в относительных мольных долях варьировалась в интервале 10⁻⁴-10⁻³ в зависимости от смеси, давления и температуры.

Время расчета равновесных составов N-компонентной смеси не превышает (0,5-1,0) · N сек. на ЭВМ ЕС-1022.

Далее изложен расчет трехфазных равновесий жидкость-жидкость-пар трехкомпонентных расслаивающихся систем. Такое состояние смеси

описывается системой уравнений:

$$\begin{aligned} f_i^{L_1}(P, T, \bar{z}_1) &= f_i^V(P, T, \bar{z}_3), \\ f_i^{L_2}(P, T, \bar{z}_2) &= f_i^V(P, T, \bar{z}_3), \quad i = 1, 2, 3. \end{aligned} \quad (16)$$

которое при наличии двух степеней свободы полностью определяется заданием температуры и давления. Решением (16) являются составы двух жидких - \bar{z}_1 , \bar{z}_2 и паровой - \bar{z}_3 фаз, соответствующих вершинам треугольника трехфазных равновесий. Изменение валового состава смеси внутри треугольника меняет лишь доли фаз, но не координаты вершин.

Анализ конфигурации трехфазных областей ряда расслаивающихся смесей ($N_2-CH_4-C_2H_6$, $N_2-CH_4-C_3H_8$, $N_2-C_2H_6-C_3H_8$, R14-R23-R600, CH_4 -R14-R600A, Ar- CH_4 -R22 и др.) показал, что они могут быть разделены на две группы по отсутствию или наличию расслоения в бинарной паре, образованной промежуточным и высококипящим компонентами тройной системы. Для смесей первой группы ($N_2-CH_4-C_2H_6$, $N_2-CH_4-C_3H_8$) трехфазные равновесия существуют в узком температурном интервале $T \leq 3+5K$, а угол L_1VL_2 не превышает 3 градусов (рис. 2, а). Во втором случае трехфазная область существует (на изобаре) в температурном интервале $T_{13} < T < T_{23}$, составляющем несколько десятков градусов, и занимает на фазовой диаграмме смеси (рис. 2, б) значительную часть гетерогенной области.

Как следствие, при расчете энергетических характеристик цикла системы охлаждения на смесях второй группы существенно необходимо учитывать трехфазные равновесия.

Границы T_{13} и T_{23} температурного интервала рассчитываются с помощью изложенного во второй главе метода расчета параметров трехфазных равновесий в бинарных смесях.

Начальные приближения, необходимые для решения системы (16), определяются соотношениями:

$$z_{1j}^j = x_1^j \frac{T - T_{23}}{T_{13} - T_{23}}; \quad z_{2j}^j = x_2^j \frac{T - T_{13}}{T_{23} - T_{13}}, \quad j = 1, 2, 3. \quad (17)$$

Время решения системы (16) на ЭВМ ЕС-1022 во всех случаях не превышало 2-3с.

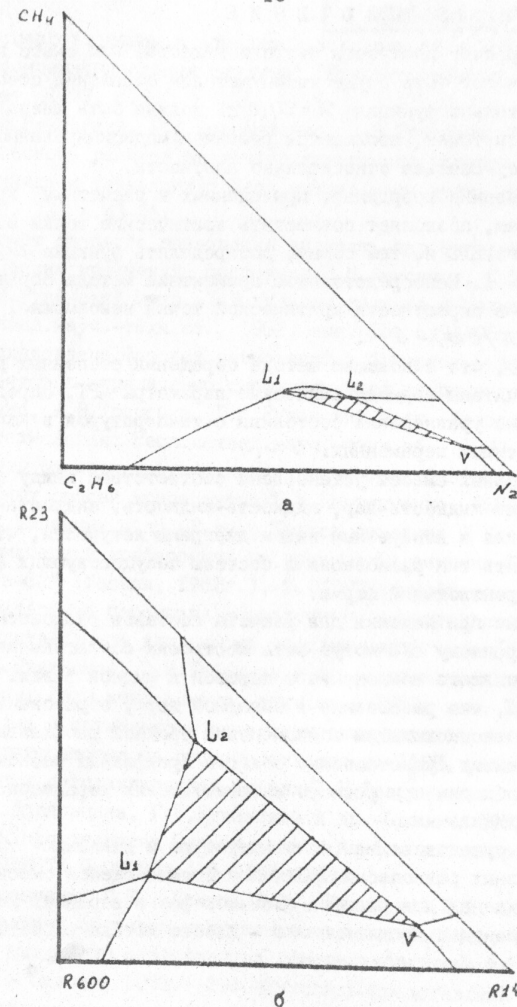


Рис.2. Фазовые диаграммы расслаивающихся смесей $N_2-CH_4-C_2H_6$ (а) и R14-R23-R600 (б). Заштрихованы треугольники трехфазного равновесия

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

1. Прямой расчет плотности чистого вещества или смеси постоянного состава может быть осуществлен методом обращения степенных рядов. Предварительно функция $\mathcal{P} = \mathcal{P}(w, \tau)$ должна быть разложена в ряд окрестности точки, являющейся решением модифицированного уравнения Ван-дер-Ваальса относительно плотности.

2. Использование координат, приведенных к расчетным критическим параметрам, позволяет совместить критические точки исходного и модельного ЕУС и, тем самым, доопределить функцию $w(\mathcal{P}, \tau)$ при $\mathcal{P} = 1$ и $\tau = 1$. Непосредственное применение метода обращения степенных рядов в окрестности критической точки невозможно, так как для неё $(\partial \mathcal{P} / \partial w) = 0$.

3. Показано, что с помощью метода обращения степенных рядов могут быть рассчитаны термодинамические параметры МРТ, определяемые каноническими уравнениями состояния с температурой в качестве одной из независимых переменных.

4. Для бинарных смесей установлено соответствие между фазовыми равновесиями жидкость-пар, жидкость-жидкость, жидкость-жидкость-пар, газ-газ и конкретным видом диаграмм летучести, что позволяет определить тип равновесия и составы сосуществующих фаз на основе ЕУС произвольной формы.

5. Начальные приближения для расчета составов равновесных фаз МРТ по конкретному ЕУС могут быть построены согласованием летучестей низкокипящего компонента в паровой и жидкой фазах.

6. Показано, что расслоение в бинарной паре, образованной промежуточным и высококипящим компонентами тройной расслаивающейся смеси, определяет существование области трехфазных равновесий, учет которой необходим при расчете энергетических характеристик цикла системы охлаждения.

7. Границы существования (по температуре и давлению) треугольника трехфазных равновесий тройной расслаивающейся смеси и начальные приближения для расчета составов фаз в вершинах могут быть найдены с помощью предложенного в работе метода расчета фазовых равновесий в бинарных смесях.

Основное содержание диссертации изложено в работах:

1. Исследование ступени предварительного охлаждения гелиевых рефрижераторов, использующих гелий-фреоновые смеси/Г.К.Лавренченко, В.Ф.Романишин, В.В.Реутов, Г.Я.Рувинский.-В кн.:Тезисы докладов Всесоюзной конференции по холоду "Совершенствование

- процессов, машин и аппаратов холодильной и криогенной техники и кондиционирования воздуха" (Ташкент, октябрь 1977г.).-Ташкент, 1977, с.9.
2. Г.Я.Рувинский, Г.К.Лавренченко, А.В.Троценко. Метод термодинамического расчета элементов криогенных установок.-Холодильная техника и технология: Респ.межвед.науч.-техн.сб., 1981, вып. 33, с.43-46.
3. Расчет фазового равновесия жидкость-пар бинарных смесей по кубическим уравнениям состояния/В.Н.Анисимов, Г.К.Лавренченко, Г.Я.Рувинский и др.-Холодильная техника и технология: Респ.межвед.науч.-техн.сб., 1982, вып. 35, с.94-96.
4. Исследование фазовых равновесий в бинарных смесях холодильных агентов с ограниченно смешивающимися компонентами/Г.К.Лавренченко, А.В.Троценко, Г.Я.Рувинский и др.-Холодильная техника и технология: Респ.межвед.науч.-техн.сб., 1983, вып. 37, с.38-44.
5. Метод расчета критических параметров и фазовых равновесий бинарных смесей криоагентов/Г.К.Лавренченко, Г.Я.Рувинский, Э.И.Табачник и др.-В кн.: Тезисы докладов III Всесоюзной научно-технической конференции по криогенной технике "Криогенная техника-82" (Москва, 1982г.).-М.:ЦИНТИхимнефтемаш, 1982, с.203.
6. Определение параметра разнородного взаимодействия уравнения Редлиха-Квонга для смесей холодильных агентов/Г.К.Лавренченко, Г.Я.Рувинский, Э.И.Табачник и др.-Холодильная техника и технология: Респ.межвед.науч.-техн.сб., 1983, вып. 37, с.44-47.
7. Анализ и оптимизация энергетических характеристик дроссельных рефрижераторов на уровень охлаждения 150К, работающих на бинарных расслаивающихся смесях/Г.К.Лавренченко, А.В.Троценко, Н.И.Додельцева, Г.Я.Рувинский и др.-Одесса, 1983.-26с.-Рукопись представлена Одесск.технол.ин-том холод.пром. Деп. в УкрНИИНТИ 9.08.83г., № 914Ук-ДВЗ.
8. Лавренченко Г.К., Канаев В.В., Рувинский Г.Я. Определение оптимальных составов многокомпонентного рабочего тела и параметров цикла для производства холода на двух температурных уровнях - Одесса, 1983.- 29с.-Рукопись представлена Одесск. технол. ин-том холод.пром. Деп. в УкрНИИНТИ 14 окт. 1983, №1147Ук-ДВЗ.
9. Обобщенные алгоритмы расчета дроссельных циклов/Н.И.Додельцева, Г.Я.Рувинский, Э.И.Табачник и др.- В кн.: Тезисы докладов Всесоюзной научно-технической конференции "Микрокриогенная техника-84" (Омск, 1984г.).-М.:ЦИНТИхимнефтемаш, 1984, с.33.

18
УСЛОВНЫЕ ОБОЗНАЧЕНИЯ

T - температура; p - давление; ρ - плотность; S - энтропия; H - энтальпия; \bar{z} - валовой (заправочный) состав МРТ; N - число компонентов смеси; \bar{x} и \bar{y} - равновесные составы жидкой и паровой фаз, соответственно; m - доля жидкости; f_i^L и f_i^V - летучести i -го компонента смеси в жидкой и паровой фазах; p_c - критическое давление; T_c - критическая температура; T_{ij} - температура трехфазного равновесия (на изобаре) бинарной пары, образованной i -м и j -м компонентами тройной смеси.

С. Г. Гусев

БР 04703. Подл-к печати 20.10.84 г. Формат 60 x 84 1/16.
Об'ем 1,0 п. л. 0,75 уч.изд. л. Заказ № 5265. Тираж 100.
Гортипография Одесского облполиграфиздата, пех № 3,
Ленина, 49.