

ЛАПАРДИН Н.И., канд. техн. наук, доцент

Одесская национальная академия пищевых технологий

ИСПОЛЬЗОВАНИЕ УРАВНЕНИЯ СОСТОЯНИЯ РКС ДЛЯ РАСЧЕТА ФАЗОВЫХ РАВНОВЕСИЙ И ПАРАМЕТРОВ ЦИКЛА ДМКС

Получено модифицированное уравнение состояния Редлиха-Квонга-Соаве, использованное для оптимизации параметров дроссельного цикла с температурой охлаждения 120К на многокомпонентном криоагенте Ar-R14-R218, на основе экспериментальных данных по равновесию жидкость-кристалл и жидкость-пар в системах Ar-R14, Ar-R218 и R14-R218.

Ключевые слова: уравнение состояния, равновесие жидкость-кристалл, равновесие жидкость-пар, смеси.

Modified Soave-Redlich-Kwong equation of state has been developed on the basis of experimental data of solid-fluid and vapour-liquid equilibria for the systems Ar-R14, Ar-R218, and R14-R218 systems. This equation of state was used for optimization throttle cycle parameters at low temperature able to cool down to 120K with using mixed working fluid consisted of Ar, R14, and R218.

Keywords: equation of condition, equilibrium fluid-crystal, an equilibrium is fluid-steam, blends.

Перспективными рабочими телами дроссельных микрокриогенных систем (ДМКС) охлаждения до уровня криостатирования 120К являются трехкомпонентные смеси аргона (Ar) с хладагентами (R14 и R218). Термодинамическая эффективность цикла на смесях по сравнению с чистым аргоном может быть повышена в разы вследствие уменьшения температуры перед дросселем и выравнивания тепловых эквивалентов прямого и обратного потоков.

Определение оптимальных параметров дроссельной системы для заданного уровня криостатирования и выбранного качественного состава смеси сводится к определению количественного состава смеси и давления обратного потока с учетом всех ограничений. Для выполнения одного из основных ограничений по температуре криостатирования, которая должна быть выше температуры кристаллизации растворов, особо важное значение имеют экспериментальные данные по фазовому равновесию жидкость-кристалл. Обеспечение минимальной разности температур прямого и обратного потока во всех сечениях регенеративного теплообменника связано с фазовыми переходами, а данные о равновесии жидкость-пар должны отличаться точностью и надежностью. Проведение расчета цикла и оптимизации его параметров требует построения модели термодинамических свойств смеси. В этом качестве может быть использовано кубическое единое уравнение состояния, полученное на основе опытных данных и позволяющее описать термодинамические свойства жидкой и газобразной фаз смеси. Построение уравнения состояния Редлиха-Квонга в модификации Соаве (РКС) и является целью настоящей работы. В связи с этим ранее нами [1] было проведено экспериментальное исследование фазового равновесия жидкость-кристалл и жидкость-пар бинарных смесей Ar-R14, Ar-R218, R14-R218.

РАВНОВЕСИЕ ЖИДКОСТЬ-ПАР В БИНАРНЫХ СМЕСЯХ

Для описания фазового равновесия в широком диапазоне температур и давлений хорошо себя зарекомендовало уравнение состояния РКС [2]

$$P = RT/(v - b) - a/v(v + b), \quad (1)$$

где P – давление, МПа;

T – температура, К;

v – мольный объем; м³/кмоль;

$R=0,008314$ – универсальная газовая постоянная, МПа·м³/(кмоль·К).

В соответствии с требованиями к уравнениям состояния параметры a и b должны удовлетворять критическим условиям

$$\left(\frac{\partial P}{\partial v}\right)_T = 0 \text{ и } \left(\frac{\partial^2 P}{\partial v^2}\right)_T = 0, \quad (2)$$

отображающим перегиб изотермы в P - v диаграмме в критической точке. Выбранная форма уравнения (1) дает удовлетворяющие критическим условиям значения параметров

$$a=R^2 T_c^2 / (P_c (2^{1/3} - 1) 9) F; \quad b=(RT_c / P_c) (2^{1/3} - 1) / 3, \quad (3)$$

где T_c , P_c – критические температура и давление.

Модификация Соаве основана на введении обобщенной температурной зависимости в терминах приведенной температуры $T_r = T/T_c$ для параметра a , причем таким образом, что при $T_r = 1$ функция $F = 1$. Для рассматриваемой системы нами вместо обобщенной зависимости F для повышения точности описания фазовых равновесий, с учетом уровня криостатирования 120К, была предложена для чистых веществ зависимость параметра, a от температуры в форме

$$a = a_0 + a_1 T^{1/3}, \quad (4)$$

Константы a_0 и a_1 определялись по данным о фазовом равновесии жидкость-пар чистых компонентов на линии насыщения, удовлетворяя правилу Максвелла

$$\int_{v'}^{v''} P_S dv = P_S (v'' - v'), \quad (5)$$

Так как уравнение (1) является кубическим уравнением относительно v , то из трех корней только два имеют физический смысл мольных объемов: v' – кипящей жидкости и v'' – сухого насыщенного пара. Поиск параметра a для каждой изотермы в этом случае сводился к удовлетворению правила Максвелла (5), а также условий фазового равновесия

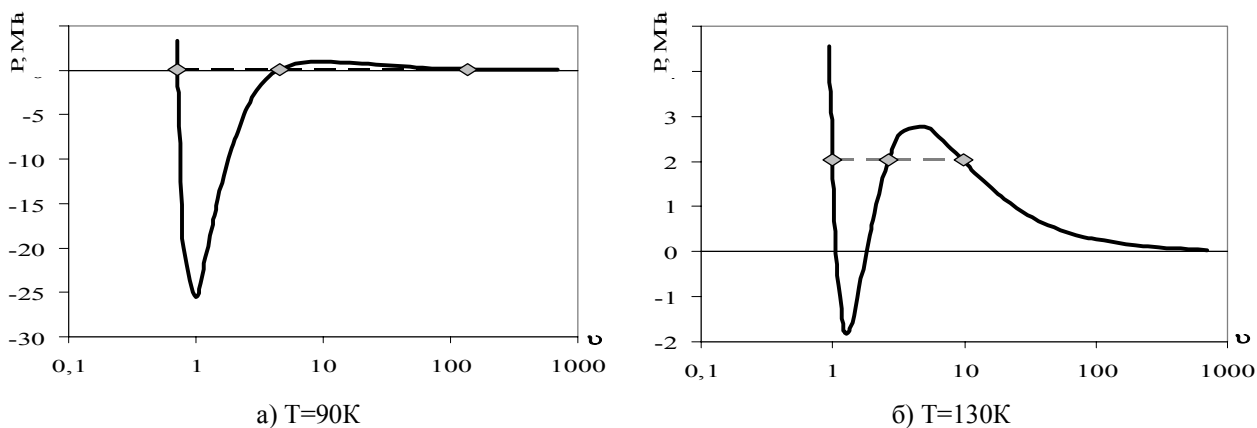
$$T^L = T^V; \quad P^L = P^V; \quad \ln f^L = \ln f^V, \quad (6)$$

где f – фугитивность, а верхние индексы относятся к жидкой и газовой фазам, соответственно.

Для уравнения РКС (1) была получена аналитическая форма расчета фугитивности

$$\ln f = \ln(RT/(v-b) + b/(v-b) - a[\ln(v+b/v) - v-b/((v+b))]/(RTb)) \quad (7)$$

Вычисления проводились методом итерации до выполнения неравенства $|f^L - f^V| < 0,001$. В качестве примера на двух изотермах показан поиск взаимосогласованных значений a , v' , v'' , P_S , T и графическая иллюстрация (рис.1) правила Максвелла для Ar. Температурная зависимость (4), найденных таким образом значений параметра a , была аппроксимирована методом наименьших квадратов с учетом критичес-



а) T=90K б) T=130K
 Рис. 1. Диаграмма P-v (давление насыщения P_S – пунктирная линия)

ких условий (3).

В качестве иллюстрации в табл. 1, на примере одного из компонентов – Ag, приведено сравнение литературных данных [3] при заданной температуре T, давлении насыщения P_S и удельных объемах жидкой и паровой фаз с расчетом по уравнению РКС (1). Для других компонентов сведения о линии насыщения почерпнуты из источников [4, 5]. Как видно из таблицы, давление насыщения отображается вполне удовлетворительно P^L, особенно хорошо по паровой фазе P^V. Отклонения по удельному объему паровой фазы не превышают -1,5%, и только в окрестности критической точки (T_r = 0,996) доходят до -3%. Значительно хуже описывается плотность жидкой фазы, отклонения растут с приближением к критической температуре до 10%, и в её окрестности (T_r = 0,996) достигают -22%. Это характерная особенность кубических уравнений состояния, с которой следует считаться.

где a_i и b_i – параметры a и b для i-го компонента смеси;

k_{ij} – параметр перекрестного взаимодействия между i и j компонентами.

Принятые правила комбинирования определяют энергию Гельмгольца смеси и дают после дифференцирования уравнения (1) по составу аналитическую форму для расчета фугитивности i-го компонента смеси

$$\ln f_i^L = \ln(RT x_i / (v-b) + b_i / (v-b) - 2 \ln((v+b)/v)) / (RTb) \sum_j (a_i a_j)^{1/2} \times (1 - k_{ij}) x_j + a b_i [\ln(v+b/v) - v-b / ((v+b))] / [RT(b^2)] \quad (9)$$

Отметим, что выражение (9) справедливо как для фугитивности f_i^L так и f_i^V с заменой мольного состава жидкости x_i на состав паровой фазы y_i и подстановки соответствующего мольного объема v.

По полученным экспериментальным данным о фазовом равновесии жидкость-пар в бинарных смесях

Таблица 1

Термодинамические свойства Ag на линии насыщения

T	P _s , МПа	Данные [3]		Расчет по уравнению РКС (1) *					T _r
		v ^L , 10 ⁻³ м ³ /кг	v ^V , 10 ⁻³ м ³ /кг	v ^L , 10 ⁻³ м ³ /кг	v ^V , 10 ⁻³ м ³ /кг	P ^L , МПа	P ^V , МПа	T _r	
90	0,1338	0,72690	132,70	0,72196 0,68	134,73 -1,53	0,1399 -4,56	0,1338 0	0,60	
100	0,3247	0,76281	58,751	0,76327 -0,06	59,460 -1,21	0,3289 -1,31	0,3247 0	0,66	
110	0,6665	0,80635	29,860	0,81647 -1,26	30,169 -1,03	0,6697 -0,48	0,6665 0	0,73	
120	1,2131	0,86178	16,566	0,88838 -3,09	16,734 -1,01	1,2152 -0,17	1,2131 0	0,80	
130	2,0233	0,93822	9,6197	0,99402 -5,95	9,7318 -1,17	2,0247 -0,07	2,0233 0	0,86	
140	3,1675	1,0614	5,5706	1,1773 -10,92	5,6372 -1,20	3,1682 -0,02	3,1675 0	0,93	
150	4,7388	1,4687	2,5500	1,7949 -22,21	2,6299 -3,13	4,7391 -0,01	4,7389 0	0,99	

* - в знаменателе приведены отклонения в % расчетных значений от литературных данных

Следующая задача состояла в построении уравнения состояния для описания свойств системы на основе индивидуальных уравнений состояния. При распространении той же формы единого уравнения (1) на смеси нами использованы эмпирические правила комбинирования [6]

$$a = \sum_i \sum_j x_i x_j a_{ij}; \quad a_{ij} = (1 - k_{ij})(a_i a_j)^{1/2};$$

$$b = \sum_i x_i b_i, \quad (8)$$

Ag-R14, Ag-R218 и R14-R218 с использованием условий фазового равновесия

$$T^L = T^V; \quad P^L(T^L, v^L, x, k_{ij}) = P^V(T^V, v^V, x, k_{ij});$$

$$\ln f^L(T^L, v^L, x, k_{ij}) = \ln f^V(T^V, v^V, x, k_{ij}) \quad (10)$$

были выделены параметры перекрестного взаимодействия k_{ij}, наилучшим образом описывающие эксперимент минимизацией функционала

$$\Phi = \sum_{i=1}^N [(x_i - x_i^P)^2 + (y_i - y_i^P)^2], \quad (11)$$

где x_i , y_i , x_i^P , y_i^P – экспериментальные и расчетные мольные доли первого компонента в жидкой и газовой фазах;

N – число опытных точек.

данных по фазовому равновесию жидкость-пар и указаны отклонения по составам жидкой δx и паровой δy фаз в мольных долях.

Среднеквадратические отклонения по составу

Фазовое равновесие жидкость-пар в бинарных системах

Таблица 2

Ar-R14 ($k_{ij} = 0,0483$)						
p , МПа	x^P	x	δx	y^P	y	δy
T=181,80K						
2,959	0,2741	0,2708	0,0033	0,6951	0,7017	-0,0066
3,648	0,3585	0,3532	0,0053	0,7387	0,7413	-0,0026
4,299	0,4384	0,4385	-0,0001	0,7650	0,7667	-0,0017
4,874	0,5095	0,4988	0,0107	0,7799	0,7811	-0,0012
5,401	0,5761	0,5652	0,0109	0,7875	0,7832	0,0043
5,761	0,6236	0,6191	0,0045	0,7887	0,7862	0,0025
5,959	0,6500	0,6487	0,0013	0,7881	0,7895	-0,0014
T=203,68K						
2,092	0,0334	0,0298	0,0036	0,1267	0,1255	0,0012
3,640	0,1916	0,1789	0,0127	0,4217	0,4314	-0,0097
5,202	0,3606	0,3376	0,0230	0,5221	0,5736	-0,0515
T=220,47K						
3,497	0,0426	0,0391	0,0035	0,0777	0,0827	-0,0050
4,302	0,1370	0,1140	0,0230	0,1835	0,1696	0,0139
Ar-R218 ($k_{ij} = 0,0475$)						
T=186,57K						
0,359	0,0342	0,0308	0,0034	0,9858	0,9885	-0,0027
0,720	0,0681	0,0584	0,0097	0,9922	0,9928	-0,0006
1,716	0,1576	0,1870	-0,0294	0,9957	0,9988	-0,0031
4,630	0,3884	0,3808	0,0076	0,9960	0,9990	-0,0030
5,896	0,4765	0,4773	-0,0008	0,9951	0,9970	-0,0019
T=241,08K						
0,249	0,0080	0,0102	-0,0022	0,5148	0,4795	0,0353
0,764	0,0386	0,0339	0,0047	0,8275	0,8200	0,0075
2,510	0,1377	0,1267	0,0110	0,9319	0,9476	-0,0157
4,431	0,2392	0,2370	0,0022	0,9484	0,9726	-0,0242
T=270,15K						
0,438	0,0042	0,0033	0,0009	0,1565	0,1252	0,0313
1,259	0,0490	0,0401	0,0089	0,6645	0,6498	0,0147
2,698	0,1246	0,1108	0,0138	0,8131	0,8057	0,0074
3,404	0,1606	0,1447	0,0159	0,8388	0,8357	0,0031
3,979	0,1893	0,1557	0,0336	0,8522	0,8508	0,0014
R14-R218 ($k_{ij} = 0,0151$)						
T=196,32K						
0,068	0,0445	0,0201	0,0244	0,8605	0,9088	-0,0483
0,344	0,2546	0,2545	0,0001	0,9746	0,9795	-0,0049
0,557	0,4178	0,4189	-0,0011	0,9857	0,9891	-0,0034
0,718	0,5424	0,5423	0,0001	0,9901	0,9928	-0,0027
1,115	0,8472	0,8436	0,0036	0,9966	0,9995	-0,0029
1,260	0,9456	0,9379	0,0077	0,9986	0,9999	-0,0013
T=220,85K						
0,134	0,0356	0,0174	0,0182	0,6726	0,6424	0,0302
0,673	0,2434	0,2465	-0,0031	0,9765	0,9452	0,0313
2,185	0,8040	0,7952	0,0088	0,9883	0,9882	0,0001
2,746	0,9389	0,9435	-0,0046	0,9925	0,9958	-0,0033
T=233,60K						
0,153	0,0211	0,0171	0,0040	0,4523	0,4026	0,0497
0,376	0,0876	0,0804	0,0072	0,7732	0,7524	0,0208
0,967	0,2453	0,2607	-0,0154	0,9149	0,9055	0,0094
2,309	0,6512	0,6377	0,0135	0,9626	0,9635	-0,0009
2,929	0,7653	0,7751	-0,0098	0,9687	0,9775	-0,0088
3,195	0,8249	0,8404	-0,0155	0,9719	0,9791	-0,0072
3,430	0,8738	0,8911	-0,0173	0,9746	0,9795	-0,0049

Оптимальные значения параметра перекрестного взаимодействия k_{ij} для рассматриваемых бинарных систем приведены в табл. 2. Там же проведено сравнение расчетных и экспериментальных p , T , x , y -

данных по фазовому равновесию жидкость-пар и указаны отклонения по составам жидкой δx и паровой δy фаз в мольных долях.

Среднеквадратические отклонения по составу жидкой и паровой фаз для всех систем лежат в диапазоне 1-2%. Как видно из табл. 2 максимальные отклонения в паровой фазе для смеси AR-R14 в окрестностях критической кривой и для смеси R14-R218 при минимальном давлении и максимальной температуре составляют около 5% в обоих случаях.

РАВНОВЕСИЕ ЖИДКОСТЬ-КРИСТАЛЛ В БИНАРНЫХ СМЕСЯХ

Методически верным и логически оправданным шагом было привлечение данных о фазовом равновесии жидкость-кристалл рассматриваемых бинарных смесей для уточнения параметра перекрестного взаимодействия k_{ij} и диапазона его применения. С этой целью использовались экспериментальные данные [1], полученные термическим методом.

Применительно к бинарным системам Ar-R14 и Ar-R218 активность i -го компонента в жидкой фазе \tilde{A}_i может быть найдена по уравнению Шредера-ван-Лаара

$$\tilde{A}_i = \exp[\Delta h_{плi}(1/T_{плi} - 1/T)/R + \Delta h_{фпi}(1/T_{фпi} - 1/T)/R] \quad (12)$$

где $\Delta h_{плi}$ – теплота плавления; $T_{плi}$ – нормальная температура плавления;

$\Delta h_{фпi}$ – теплота фазового перехода в кристалле;

$T_{фпi}$ – температура фазового перехода.

При расчетах принимались значения $\Delta h_{плi}$, $T_{плi}$, $\Delta h_{фпi}$, $T_{фпi}$ приведенные в [1, 7].

С другой стороны, активность равна

$$A_i = f_i^L / f_i^{OL} \quad (13)$$

При использовании уравнения РКС (1) фугитивность рассчитывалась по формулам (9) и (7), соответственно. Наилучшие значения k_{ij} , полученные минимизацией функционала

$$F(k_{ij}) = \sum_{n=1}^N [A_2(k_{ij}) - \tilde{A}_2]_n^2 \quad (14)$$

состоят: 0,0483 и 0,0525 для систем Ar-R14 и Ar-R218, соответственно.

В табл. 3, 4 представлены полученные экспериментальные данные о фазовом равновесии жидкость-кристалл для бинарных смесей Ar-R14 и Ar-R218. Там

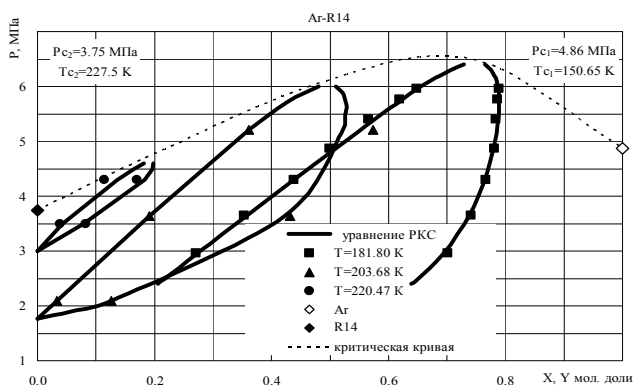


Рис. 2. Равновесие жидкость-пар в бинарной смеси Ag-R14

же показаны результаты расчета активности второго компонента, рассчитанные по уравнению (12) \hat{A}_2 и с использованием уравнения состояния РКС (13) A_2 . Совместное использование этих уравнений позволило определить температуру и состав жидкой фазы (линия ликвидус), а также коэффициент активности γ_2 . Следует отметить, что для системы Ag-R14 в расчетах

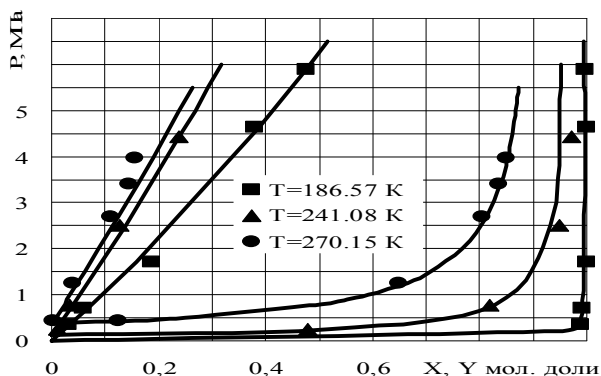


Рис. 3. Равновесие жидкость-пар в бинарной смеси Ag-R218

было использовано значение $k_{ij} = 0,0483$, полученное по данным равновесия жидкость-пар и позволившее получить успешный результат. Для системы Ag-R218 для изучаемого диапазона температур 84 – 108К было выделено оптимальное значение $k_{ij} = 0,0525$, отлича-

Равновесие жидкость-кристалл для системы Ag-R14 (линия ликвидус)

Эксперимент [1]		Расчет по уравнениям (12) и (13)				
T, K	x_2	A_2	\hat{A}_2	T, K	x_2	γ_2
Правая ветвь						
87,65	0,979	0,9792	0,9799	87,58	0,978	1,001
83,84	0,934	0,9358	0,9384	83,61	0,931	1,005
78,70	0,876	0,8827	0,8793	78,99	0,879	1,004
75,40	0,822	0,8365	0,8291	75,59	0,829	1,009
73,25	0,711	0,7500	0,7492	73,27	0,712	1,054
71,65	0,612	0,6834	0,6920	71,40	0,604	1,131
71,01	0,558	0,6509	0,6698	70,46	0,542	1,200
Левая ветвь						
71,48	0,474	0,7541	0,7473	71,83	0,469	1,421
73,93	0,344	0,8122	0,7981	74,63	0,322	1,217
75,67	0,260	0,8446	0,8341	76,19	0,251	1,127
78,32	0,151	0,8922	0,8887	78,40	0,148	1,047
81,61	0,050	0,9557	0,9560	81,60	0,050	1,006

ющееся от полученной ранее величины 0,0475. Кроме того, обращают на себя внимание расчетные значения температур для мольной доли $x_2 < 0,49$, которые со-

ставляют 87,5К. Проведенный расчет и построение диаграммы активность-состав подтвердил наличие области не смешимости компонентов в жидкой фазе (рис. 5) и положительное отклонение от идеальной смеси (пунктирные линии). Поэтому при мольной доле R218 $x_2 < 0,3$ происходит кристаллизация при указанной выше температуре. Поведение этой системы показано на диаграмме T-x (рис. 6), где отмечен также переход из α в β -модификацию R218 при $x_2 > 0,88$ и температуре T=99,4К. Для бинарной смеси Ag-R14 (рис. 7) также наблюдается α - β переход при температуре 75,8К и $x_2 > 0,84$. Характерной особенностью указанной смеси является наличие точки эвтектики (T=70,9К и $x_2 = 0,53$) и, соответственно, левой и правой ветви линии ликвидус.

Как видно, для системы Ag-R14 наибольшие отклонения по температуре и составу наблюдаются вблизи эвтектики, а для системы Ag-R218 вблизи точки плавления чистого хладона, где производная dT/dx имеет наибольшее значение.

Следующим шагом исследования этих бинарных систем было использование экспериментальных дан-

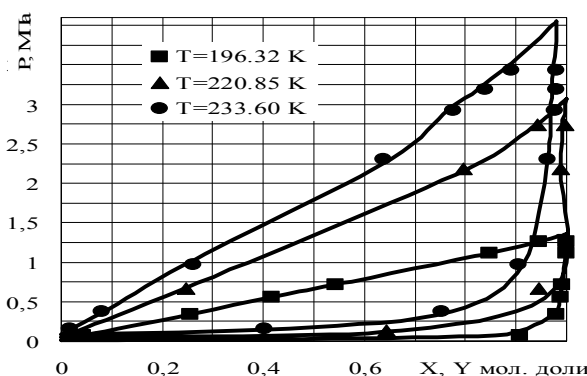


Рис. 4. Равновесие жидкость-пар в бинарной смеси R14-R218

ных по давлению кипения при температуре раствора T=90,5К. Как видно из диаграммы давление-состав (рис. 8, а) и в этом случае для системы Ag-R14 успешно работает параметр перекрестного взаимодействия $k_{ij} = 0,0483$. Для системы Ag-R218 зона ограниченной взаимной растворимости (рис. 8, б) наблюдается при $x_1 < 0,51$. Характерно, что полученные для этого случая значения $k_{ij} = 0,0520$ вполне согласуются с найденной ранее величиной 0,0525 из данных по равновесию жидкость-кристалл.

Многокомпонентный криоагент дроссельных систем.

В качестве рабочего тела дроссельных микрокриогенных систем с температурой охлаждения 120К выбрана тройная смесь Ag-R14-R218. С использованием термодинамических соотношений получены аналитические выражения для энтальпии, энтропии, изобарной теплоемкости

$$H = \sum_i x_i H_i^0 + RT \{ b/(v-b) -$$

$$a/(RT(v+b)) - [a/RTb - (1/Rb)(da/dT)] \ln((v+b)/v) \}; (15)$$

Таблиця 4

Равновесие жидкость-кристалл для системы Ar-R218 (линия ликвидус)

Эксперимент [1]		Расчет по уравнениям (12) и (13)				
T, K	x ₂	A ₂	Â ₂	T, K	x ₂	γ ₂
108,40	0,918	0,9193	0,9305	105,98	0,907	1,014
90,50	0,490	0,5620	0,5495	90,89	0,501	1,121
86,95	0,204	0,4496	0,4415	87,24	0,208	2,164
86,17	0,132	0,4580	0,4197	87,53	0,144	3,179
86,00	0,125	0,4602	0,4150	87,61	0,139	3,320
85,02	0,079	0,4683	0,3889	87,88	0,095	4,923
84,02	0,058	0,4627	0,3634	87,69	0,074	6,265

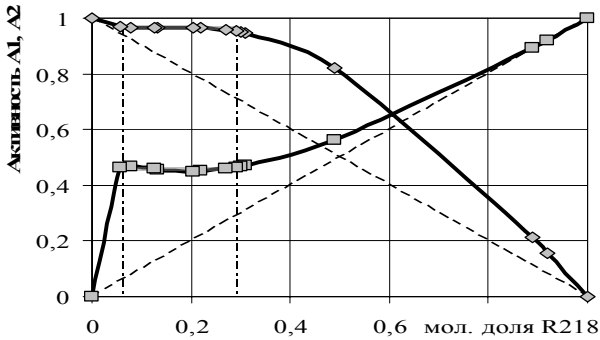


Рис. 5. Зависимость активностей компонентов от состава бинарной смеси Ar-R218

$$S = \sum_i x_i S_i^0 - R \ln x_i + R [\ln(v-b)/v^0 + (1/Rb)(da/dT) \ln((v+b)/v)];$$

$$\ln((v+b)/v);$$

$$C_p = \sum_i (x_i C_{p,i}^0 -$$

$$x_i R) + T(d^2 a/dT^2) \ln((v+b)/(v+bv/v^0))/b + R[v/(v-b) - (da/dT)/R/(v+b)]^2 / [(v/(v-b))^2 - a(2v+b)/RT/(v+b)^2],$$

где первая и вторая производная параметра *a* по температуре определялась в соответствии с зависимостью (4) и принятыми правилами комбинирования (8)

$$(da/dT) = \sum_i \sum_j x_i x_j (1-k_{ij})(a_i a_j)^{1/2} [(da_i/dT)/a_i + (da_j/dT)/a_j];$$

$$(d^2 a/dT^2) = (1-k_{ij})(a_i a_j)^{1/2} [(d^2 a_i/dT^2)/a_i + (d^2 a_j/dT^2)/a_j - [(da_i/dT)/a_i + (da_j/dT)/a_j]^2 / 2];$$

$$(da_i/dT) = (a_i/3) T^{-2/3};$$

$$(d^2 a_i/dT^2) = (-2a_i/9) T^{-5/3}.$$

В табл. 5 приведены критические параметры индивидуальных веществ, и сведения о константах уравнения состояния РКС. В уравнении (4) размерность параметра [a] = МПа (м³/кмоль)².

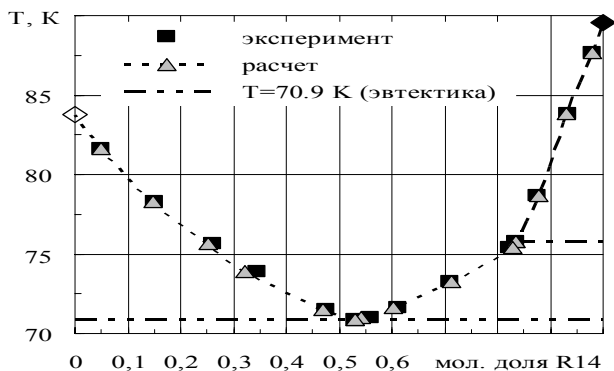


Рис. 7. Равновесие жидкость-кристалл в бинарной смеси Ar-R14

Идеально-газовые составляющие энтальпии H^0 , теплоемкости $C_p^0 = dH/dT$ и энтропии $S^0 = \int (C_p^0/T) dT$ определялись по следующим зависимостям (коэффициенты c_i приведены в табл. 6)

$$H^0 = \sum_1^5 c_i (T/100)^i;$$

$$S^0 = [c_1 \ln (T/100) + \sum_2^5 (i/(i+1)) c_i (T/100)^{i-1}] / 100 + 320;$$

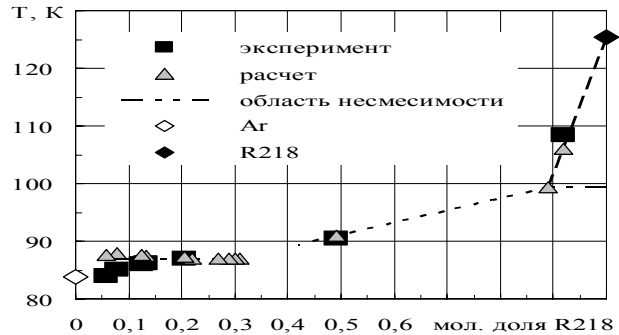


Рис. 6. Равновесие жидкость-кристалл в бинарной смеси Ar-R218

$$C_p^0 = [\sum_1^5 i c_i (T/100)^{i-1}] / 100.$$

Проверка для чистых компонентов $x_i = 1$ показала, что для аргона в диапазоне приведенных давлений $P_r = P/P_c < 4$ и интервале приведенных температур $T_r = T/T_c$ от 0,8 до 2 среднее квадратическое отклонение от рекомендуемых справочных данных для массива из 40 точек для плотности составляла 1,6%, энтальпии 0,7 кДж/кг, энтропии 8,6%, изобарной теплоемкости 4,7%. В диапазоне $T_r < 1,7$ соответствующие отклонения для R14 составили: 2,5%, 0,7 кДж/кг, 5,4%; для R218 составили: 3,0%, 1,4 кДж/кг, 3,9%. Таким образом, расчетные значения энтальпии количественно, а энтропии и теплоемкости качественно согласуются с литературными данными. Отметим особо, что отклонения около 1 кДж/кг по энтальпии вполне приемлемы при расчете цикла дроссельных микрокриогенных систем.

Таблиця 5

Основные сведения о компонентах криоагента

Вещество	Значения критических параметров (3) и коэффициентов уравнения (4)				
	T _c , K	P _c , МПа	a ₀	a ₁	b, м ³ /кмоль
Ar	150,65	4,864	0,333630	0,036719	0,223103
R14	227,50	3,745	1,370275	0,157402	0,437582
R218	345,05	2,662	5,503035	0,597416	0,933693

Проведены оптимизационные расчеты состава криоагента с использованием разработанного уравнения состояния РКС (1) в дроссельных системах с одноступенчатым несмазываемым электродинамическим компрессором с возвратно-поступательным приводом [8]. В расчетах принимались величины степени сжатия 5, температура окружающей среды 300К, недорекуперация 5К, отношение распределенных теплопритоков к холодопроизводительности на

Таблиця 6

Коефіцієнти поліномів (22-24) для чистих компонентів

Значення коефіцієнтів c_i					
	c_1	c_2	c_3	c_4	c_5
Ar	2069,26	3,92	1,02	-0,42	0
R14	2711,85	134,88	195,75	-30,239	1,438
R218	5354,49	1886,02	-64,851	0	0

уровне криостатирования 0,3. В результате определен оптимальный состав криоагента (в мольных долях $x_1=0,577$; $x_2=0,082$; $x_3=0,341$), давление прямого потока 3,07 МПа и обратного потока 0.61 МПа, КПД цикла 29,2% и холодопроизводительность на уровне криостатирования 714 кДж/кмоль.

использованы для трехкомпонентной системы Ar-R14-R218.

Следует соблюдать осторожность при использовании различных значений параметра k_{ij} , полученных из различных серий эксперимента. И если для системы Ar-R14 одно и тоже значение k_{ij} может быть использовано в широком диапазоне температур и фазового поведения, то для системы Ar-R218 следует каждый раз использовать рекомендованное для этого случая значение. Отметим в целом успешное применение уравнения состояния РКС (1) в построении термодинамической модели для системы Ar-R14-R218.

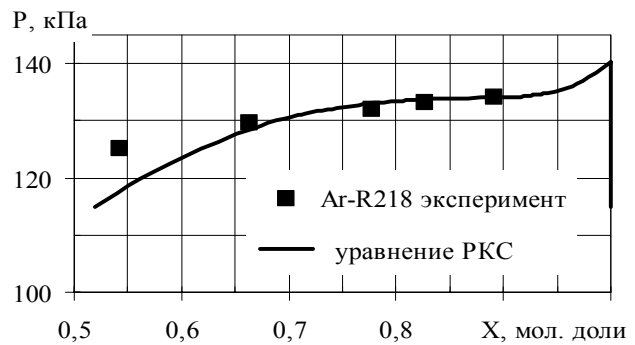
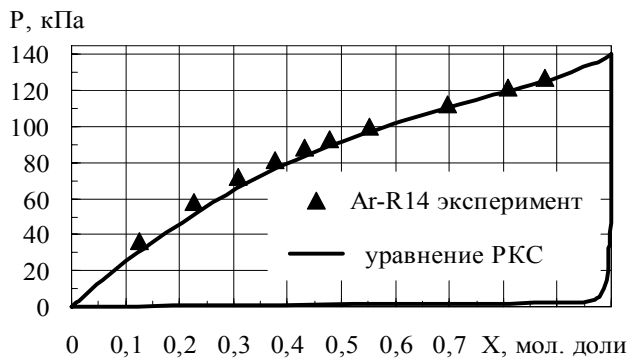


Рис. 8. Диаграмма P-x при температуре $T=90,5K$ в бинарной смеси: а) Ar-R14; б) Ar-R218

ВЫВОДЫ

Единое уравнение состояния РКС (1) вполне успешно может быть использовано для описания фазового равновесия жидкость-пар чистых компонентов, бинарных смесей, а также многокомпонентных смесей. Удовлетворительно описывая мольный объем паровой фазы, оно дает значительно худшие результаты для плотности жидкой фазы. Предложенные правила смешения позволяют проводить расчеты для бинарных смесей, а полученные на основе эксперимента параметры перекрестного взаимодействия могут быть

Показано с помощью моделирования термодинамических свойств многокомпонентного криоагента Ar-R14-R218 на базе уравнения состояния РКС и оптимизации цикла возможность создания экономичной дроссельной микрокриогенной системы с температурой криостатирования 120K на базе одноступенчатого компрессора. Как показало сравнение эсергетический КПД цикла на смесях намного превышает КПД цикла на чистом Ar, величина которого при равных условиях составляет 6,3%.

Поступила 11.2011

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Афанасьев, В.В. Термодинамические свойства смесей аргона с хладагентами R14 и R218 [Текст] / В.В. Афанасьев, В.А. Багинский, Н.Д. Захаров, Н.И. Лапардин // Холодильная техника и технология. - 2006. - №2 (100). - С. 73-80.
2. Soave, G. Equilibrium constants from a modified Redlich-Kwong equation of state [Текст] // Chem. Eng. Science. -1972, vol. 27, 6, p. 1197 – 1203.
3. Рабинович, В.А. Теплофизические свойства неона, аргона, криптона и ксенона [Текст] / В.А. Рабинович, А.А. Вассерман, В.И. Недоступ, Л.С. Векслер – М.: Изд-во стандартов, 1976. - 636 с.
4. Алтуниин, В.В. Теплофизические свойства фреонов. Т. 2. Фреоны метанового ряда. Справочные данные [Текст] / В.В. Алтуниин, В.З. Геллер, Е.А. Кремневская, И.И. Перельштейн, Е.К. Петров – Под ред. С.Л. Ривкина. – М.: Изд-во стандартов, 1985. - 264 с.
5. Рябушева, Т.И. Термодинамические свойства хладагента R218 [Текст] / Т.И. Рябушева, С.И. Гуйго, Е.Б. Петрунина // Холодильная техника. -1979.- №6.- С.30-33.
6. Рид, Р. Свойства газов и жидкостей: Справочное пособие [Текст] / Р. Рид, Дж. Праусниц, Т. Шервуд– Л.: Химия, 1982. – 592 с.
7. Варгафтик, Н.Б. Справочник по теплофизическим свойствам газов и жидкостей [Текст]. – М.: Наука, 1972. - 720 с.
8. Захаров Н.Д. Многокомпонентные рабочие тела дроссельных микрокриогенных систем. – Одесса: Полиграф, 2008.- 82 с.

УДК 663.938-027.332:664.047

БУРДО О.Г., д-р техн. наук, профессор, ТЕРЗІЄВ С.Г., канд. техн. наук, асистент,

РУЖИЦЬКА Н.В., аспірант, БОРЩ А.А., аспірант

Одеська національна академія харчових технологій

КІНЕТИКА ІЧ-СУШІННЯ ШЛАМУ КАВИ

Описано кінетику процесу сушіння шламу під дією ІЧ-випромінювання у залежності від товщини шару продукту і кількості підведеної енергії.

Ключові слова: шлам кави, інфрачервоне випромінювання, сушіння.

Kinetics of waste process of drying of product is described under the action of ІЧ-випромінювання in dependence on the thickness of layer of waste product and amount of the brought energy.

Keywords: waste product of coffee, infrared, drying.

Вирішення задач комплексної переробки і утилізації промислових відходів дозволить суттєво збільшити ефективність харчоконцентратного виробництва, зменшити витрати енергії, знизити навантаження на навколишнє середовище і отримати нову гаму продуктів і матеріалів, в тому числі і для комбікормового виробництва.