

Раздел 1. ХОЛОД

УДК 536.2:661.7

Термодинамические свойства растворов R600a/компрессорное масло «ХМИ Азмол»

Канд. техн. наук Ю.В. СЕМЕНЮК, Д.А. ПРОЦЕНКО, С.В. НИЧЕНКО, д-р техн. наук В.П. ЖЕЛЕЗНЫЙ
Одесская государственная академия холода

The experimental data about the pressure of saturated vapors, the capillary constant and density of solutions of isobutane (R600a) with the commercial oil XMH Azmol are obtained in the wide range of the parameters of state. The temperature and concentration relationships of the mentioned thermodynamical properties are studied. The enthalpy of the liquid phase of the solutions of isobutane with oil is calculated. The analysis of behavior of the redundant thermodynamic functions of the liquid solution R600a/XMU Azmol is performed. The isotherms of the redundant adsorption of isobutane in the surface layer of the solution have been calculated.

Научно обоснованное повышение эффективности холодильного оборудования на этапе его проектирования невозможно без информации о свойствах растворов хладагент/масло (РХМ). Наличие примесей компрессорного смазочного масла в хладагенте существенным образом изменяет термодинамические свойства рабочего тела. Поэтому энергетическая эффективность холодильного цикла, интенсивность теплообмена в испарителе и конденсаторе будут определяться как применяемым хладагентом, так и выбранным компрессорным маслом [1, 6, 9, 16, 18, 19, 22, 23].

Из анализа опубликованной информации [10] следует, что большинство работ посвящено исследованию фазовых равновесий и вязкости РХМ. Вместе с тем данные по плотности, капиллярной постоянной, поверхностному натяжению, псевдокритическим параметрам и калорическим свойствам РХМ в литературе практически отсутствуют. До сих пор малоизученным остается вопрос о разности концентрации жидкой фазы раствора во всем ее объеме и концентрации поверхностного слоя. Ответ на этот вопрос, по существу, определяет справедливость предположения об изотропности жидкой фазы, которое используется в расчетных моделях, описывающих свойства РХМ.

С учетом приведенных обстоятельств целью настоящей работы являлось комплексное экспериментальное исследование давления насыщенных паров, плотности и капиллярной постоянной с последующим расчетным изучением закономерностей изменения термодинамических свойств растворов R600a/«ХМИ Азмол».

Результаты экспериментального исследования

Экспериментальные исследования растворов R600a/«ХМИ Азмол» выполнены на установке, реализующей

статический метод для измерения давления насыщенных паров, метод пикнометра для измерения плотности жидкости и дифференциальный метод капиллярного поднятия для измерения капиллярной постоянной. Подробное описание установки и методики проведения опытов приведены в [2].

Во время опытов образцы исследуемых растворов находились в толстостенной стеклянной ампуле, объем которой составлял 14,03 см³. Внутри ампулы были установлены три капилляра с различными радиусами (0,16; 0,342 и 0,515 мм). Внутренний объем ампулы и объем жидкой фазы РХМ определяли по результатам многократных тарировочных экспериментов, в которых в качестве эталонной жидкости использовали дистиллированную воду.

Измерительная ячейка располагалась в жидкостном термостате (стеклянном сосуде Дьюара), температуру которого измеряли платиновым термометром сопротивления типа ПТС-10 с погрешностью, не превышавшей 0,02 К.

Давление в ячейке измеряли с помощью преобразователя давления, установленного в термостате (по оценке авторов, абсолютная погрешность измерения не превышала 2,07 кПа). До эксперимента и по его окончании проводили градуировку преобразователя давления во всем исследованном температурном диапазоне с использованием справочных данных по давлению насыщенных паров изобутана и бутана [8].

Разности высот менисков жидкости в капиллярах и высоту границы раздела фаз РХМ измеряли катетометром КМ-8 с погрешностью 0,015 мм.

Использовавшийся в исследованиях изобутан имел чистоту 99,8 мас. %. С целью удаления неконденсирующихся примесей образец подвергали многократному вакуумированию после его кристаллизации.

Таблица 1
Теплофизические свойства компрессорного масла «ХМИ Азмол»

T, K	n	a ² , mm ²	ρ, кг/m ³	σ, мН/м	v·10 ⁶ , м ² /с	μ·10 ⁴ , Па·с
290	1,4788	7,233	869,7	30,712	26,11	226,8
300	1,475	7,073	863,05	29,849	16,86	145,34
310	1,4712	6,914	856,41	28,987	11,62	99,47
320	1,4674	6,754	849,76	28,124	8,45	71,81
330	1,4636	6,594	843,12	27,261	6,43	54,16
340	1,4598	6,435	836,47	26,398	5,06	42,36
350	1,4560	6,275	829,83	25,535	4,11	34,14
360	1,4522	6,116	823,18	24,672	3,43	28,23

Компрессорное масло марки «ХМИ Азмол» было приобретено у ОАО «Азмол» (Украина). Удаление примесей воды и газов из масла осуществляли вакуумированием образца при температуре 388 К. Степень чистоты масла контролировали по значениям показателя преломления, измерявшимся универсальным лабораторным рефрактометром ИРФ-23. В проведенных исследованиях использовали два образца масла из разных партий. На первом образце масла были проведены комплексные исследования давления насыщенных паров, плотности и капиллярной постоянной РХМ, а на втором – только измерения давления насыщенных паров.

Полученные в лаборатории кафедры инженерной теплофизики ОГАХ данные по теплофизическим свойствам масла «ХМИ Азмол» в зависимости от температуры T приведены в табл. 1 (n – показатель преломления; a^2 – капиллярная постоянная; ρ – плотность; σ – поверхностное натяжение; v – кинематическая вязкость; μ – динамическая вязкость).

Массовая концентрация жидкой фазы раствора рассчитывалась по формуле

$$w_R = \frac{m_R - m_{v,R}}{m_R + m_{OIL} - m_{v,R}}, \quad (1)$$

где m_{OIL} , m_R – массы заправленных в ячейку масла и хладагента соответственно;

$m_{v,R}$ – масса хладагента, находящегося в паровой фазе.

Массы m_{OIL} и m_R определяли как разности масс измерительной ячейки до и после заправки. Взвешивание проводили на аналитических весах АДВ-200М с погрешностью $5 \cdot 10^{-7}$ кг. Масса паровой фазы хладагента

$$m_{v,R} = \rho_{v,R} V_v,$$

где $\rho_{v,R}$ – плотность перегретого пара изобутана при параметрах опыта [8];

V_v – объем паровой фазы.

Относительная погрешность определения массовой концентрации лежит в интервале 0,11 – 1,02 %.

Плотность жидкой фазы раствора рассчитывали по формуле

$$\rho_{l,s} = \frac{m_R + m_{OIL} - m_{v,R}}{V_l}, \quad (2)$$

где V_l – объем жидкого раствора в ячейке.

Значения объемов V_v и V_l определяли по измеренным высотам границы раздела фаз и результатам тарировки объема измерительной ячейки.

В рамках использованного в настоящей работе модифицированного дифференциального метода капиллярного поднятия [3] определение значений капиллярной постоянной производится путем статистической обработки опытных данных с нахождением средневзвешенного значения капиллярной постоянной (параметра Сагдена) \bar{a}^2 .

Капиллярная постоянная для каждой пары капилляров вычислялась по соотношению

$$a_{ik}^2 = \frac{\Delta h_{ik}}{\left(\frac{1}{b_i} - \frac{1}{b_k} \right)}, \quad (3)$$

где Δh_{ik} – разность уровней менисков жидкости в i -м и k -м капиллярах;

b_i и b_k – радиусы кривизны менисков жидкости.

Средневзвешенное значение капиллярной постоянной

$$\bar{a}^2 = \frac{\sum_{i=1}^k a_{ik}^2 p_{ik}}{\sum_{i=1}^k p_{ik}}, \quad (4)$$

где p_{ik} – статистический вес, рассчитываемый как величина, обратная максимальной относительной погрешности измерения соответствующего значения капиллярной постоянной a_{ik}^2 на определенной паре капилляров.

Такая методика расчета позволила значительно уменьшить влияние случайных погрешностей на результат из-

Таблица 2
Экспериментальные значения давления насыщенных паров, плотности, капиллярной постоянной и
поверхностного натяжения растворов R600a/«ХМИ Азмол»

T, K	w _R , кг/кг	p _s , кПа	ρ _{IS} , кг/м ³	a ² , мм ²	σ, мН/м	T, K	w _R , кг/кг	p _s , кПа	ρ _{IS} , кг/м ³	a ² , мм ²	σ, мН/м
303,51	0,9168	395,6	559	3,639	9,79	333,11	0,5512	744,4*	—	—	—
	0,8367	400,7*	—	—	—		0,485	751	642,5	3,165	9,68
	0,7982	390,1	584,1	3,639	10,24		0,3667	670,4*	—	—	—
	0,7162	380,9*	—	—	—		0,2206	573,1	742,8	4,413	15,78
	0,6698	376	622,5	3,665	11,02	348,27	0,9032	1188	499,4	2,166	4,98
	0,589	359,9*	—	—	—		0,8306	1172,1*	—	—	—
	0,5159	362,3	665,3	3,753	12,08		0,7586	1149,7	537,2	2,446	6,09
	0,3758	324,1*	—	—	—		0,6873	1104,8*	—	—	—
	0,2464	289	758,7	4,543	16,74		0,6319	1073,6	575,2	2,499	6,72
318,24	0,9141	591,1	540,8	3,156	8,14	363,22	0,5156	1011,8*	—	—	—
	0,8353	595,9*	—	—	—		0,4594	1028,6	633	3,039	9,05
	0,7898	579,8	569,6	3,156	8,59		0,3593	915,6*	—	—	—
	0,7099	566,1*	—	—	—		0,2035	758,2	735,5	4,326	15,23
	0,662	538,4	607,3	3,219	9,37		0,8925	1594,5	476,5	1,781	3,79
	0,5738	531,6*	—	—	—		0,8266	1574,6*	—	—	—
	0,503	532,8	657	3,466	10,94		0,7284	1533,5	522,2	2,153	5,09
	0,372	478,4*	—	—	—		0,6662	1471,1*	—	—	—
	0,2349	416,2	750,8	4,471	16,24		0,6063	1430,8	561,4	2,34	6,02
333,11	0,9099	846,5	522,5	2,7	6,63		0,4553	1313,5*	—	—	—
	0,8334	845,7*	—	—	—		0,4265	1339,6	625	2,955	8,58
	0,7788	823,5	555,2	2,827	7,41		0,3486	1207,4*	—	—	—
	0,7008	799,7*	—	—	—		0,1846	960,1	729,6	4,232	14,69
	0,6494	778	591,3	2,847	7,98	* Значения давления насыщенных паров РХМ получены в опытах со вторым образцом масла.					

мерения. Выполненный анализ показывает, что неисключенная систематическая погрешность определения капиллярной постоянной растворов не превышает $2 \cdot 10^{-3}$ мм².

Коэффициент поверхностного натяжения рассчитываются по известному соотношению

$$\sigma = \frac{(\rho_{l,S} - \rho_{v,R})}{2} \bar{a}^2 g, \quad (5)$$

где g – ускорение свободного падения (на широте Одессы $g = 9,8073$ м/с²).

Полученные экспериментальные данные по давлению насыщенных паров p_s , плотности и капиллярной постоянной, а также рассчитанные по формуле (5) значения поверхностного натяжения растворов R600a/«ХМИ Азмол» приведены в табл. 2. Полные относительные погрешности приведенных в табл. 2 параметров (с учетом случайной составляющей и погрешности отнесения по параметрам состояния) оцениваются авторами в пределах: $0,5 \leq \delta p_s \leq 2,3\%$; $0,7 \leq \delta \rho_s \leq 0,8\%$; $0,3 \leq \delta a^2 \leq 1,2\%$; $\leq \delta \sigma \leq 2\%$.

Концентрационные зависимости давления насыщенных паров, плотности, капиллярной постоянной и по-

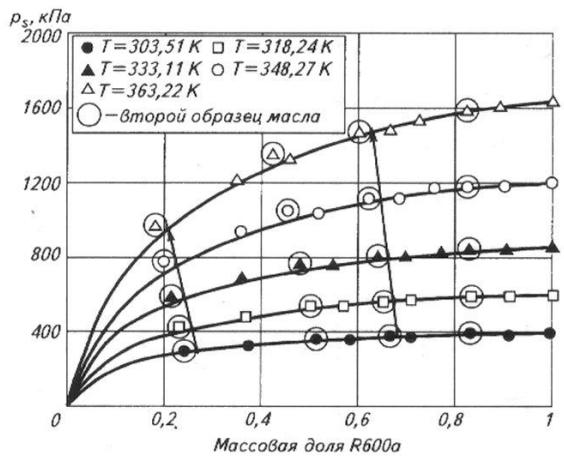


Рис. 1. Концентрационная зависимость давления насыщенных паров растворов R600a/«ХМИ Азмол»

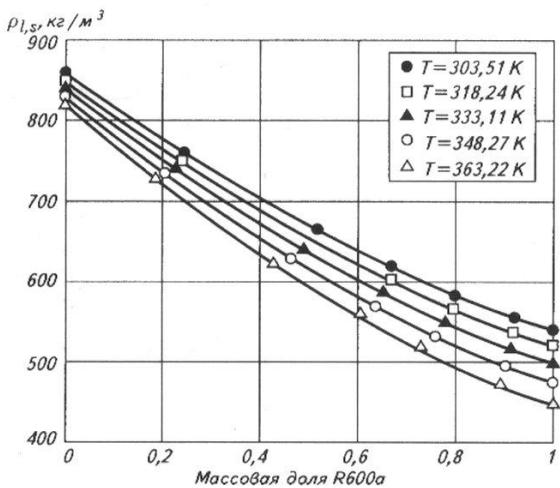


Рис. 2. Концентрационная зависимость плотности растворов R600a/«ХМИ Азмол»

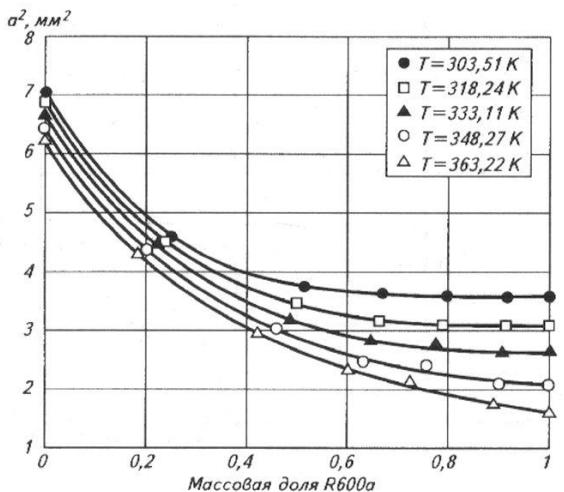


Рис. 3. Концентрационная зависимость капиллярной постоянной растворов R600a/«ХМИ Азмол»

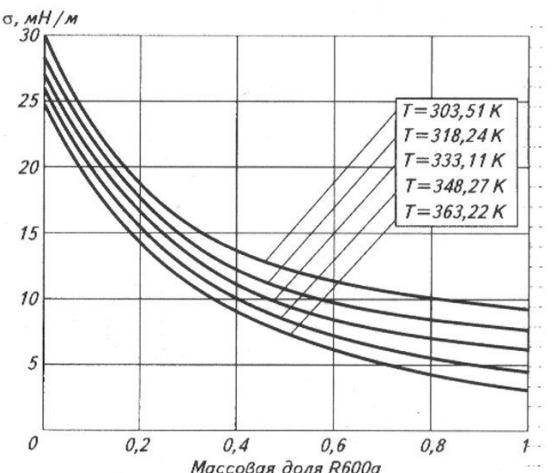


Рис. 4. Концентрационная зависимость поверхностного натяжения растворов R600a/«ХМИ Азмол»

верхностного натяжения для растворов R600a/«ХМИ Азмол» демонстрируют рис. 1 – 4. На рис. 1 стрелками указано изменение концентрации жидкой фазы раствора с ростом температуры. Как видно, концентрация РХМ значительно изменяется вследствие перехода низкокипящего компонента (хладагента) из жидкой фазы в паровую при изохорном процессе нагревания образца в измерительной ячейке. Причем уменьшение массовой доли хладагента в растворе тем существенное, чем больше концентрация высококипящего компонента и чем больше объем паровой фазы в измерительной ячейке.

Отмеченная закономерность в изменении концентрации РХМ очевидна и не требует дополнительных подтверждений. Однако эффект изменения концентрации жидкой фазы следует учитывать при планировании экспериментальных исследований и анализе имеющейся в литературе информации о термических свойствах РХМ. Не-

обходимо подчеркнуть, что далеко не все авторы уделяют должное внимание этой особенности поведения РХМ в измерительной ячейке. Поэтому результаты подобных исследований должны подвергаться соответствующему критическому анализу с целью оценки корректности определения концентрации раствора хладагент/масло.

Проведенное исследование показывает, что давление насыщенных паров, капиллярная постоянная и поверхностное натяжение РХМ определяются не только концентрацией во всем объеме жидкой фазы раствора, но и составом его поверхностного слоя, на который существенное влияние оказывают процессы адсорбции на межфазной границе. Поверхностный слой раствора обогащается компонентом, прибавление которого уменьшает поверхностное натяжение. Адсорбция низкокипящего компонента может быть столь интенсивной, что поверхностный слой жидкой фазы РХМ бу-

дет в основном состоять из молекул изобутана. В этом случае концентрационные зависимости насыщенных паров, капиллярной постоянной и поверхностного натяжения должны иметь очень пологий характер. Именно это наблюдается в интервале концентраций 0,4 ... 1 (см. рис. 1, 3 и 4).

Моделирование термодинамических свойств растворов R600a/«ХМИ Азмол»

Аналитическое описание полученных экспериментальных данных по давлению насыщенных паров и плотности жидкой фазы растворов R600a/«ХМИ Азмол» выполнено в рамках методики, основные положения которой изложены в работах [12,20]. Предложенные в этих работах выражения для аппроксимации температурных зависимостей плотности и давления насыщенных паров РХМ имеют вид:

$$\ln p_S = \ln \bar{p}_C(w_R) - \alpha_R(w_R) \tau - b_d \tau^{2,64}; \quad (6)$$

$$\ln \rho_{l,S} = \ln \bar{\rho}_C(w_R) + B_l(w_R) \tau^{\beta F(\tau)}; \quad (7)$$

$$F(\tau) = 1 - 1,113 \tau^{0,4} / \ln \tau, \quad (8)$$

где α_R , B_l и b_d – коэффициенты, определяемые из экспериментальных данных;

$\tau = \ln(\bar{T}_C/T)$ – приведенная температура;

\bar{T}_C и $\bar{\rho}_C$ – псевдокритические параметры раствора; β – показатель степени, значение которого получено для соответствующего индекса в рамках масштабной теории [14], $\beta = 0,3245$;

$F(\tau)$ – универсальная для нормальных жидкостей кросс-соверная функция [12, 14, 21].

Значения псевдокритических температуры $\bar{T} = 767$ К и давления $\bar{p} = 1200$ кПа чистого компрессорного масла «ХМИ Азмол» были измерены импульсным методом [15], а значения псевдокритических параметров растворов рассчитаны по методике, изложенной в работах [12,20], и аппроксимированы уравнениями:

$$\bar{T}_C(w_R) = \frac{767 + 105918,17w_R}{1 + 258,54761w_R + 2,052992w_R^2} \text{ (К);} \quad (9)$$

$$\bar{\rho}_C(w_R) = \frac{1200 + 6920,55w_R}{1 + 0,777449w_R + 0,453364w_R^2} \text{ (кПа);} \quad (10)$$

$$\ln \bar{p}_C(w_R) = \frac{5,6237 + 1464,3466w_R -}{1 + 224,8179w_R + 34,9054w_R^2 + 16,2158w_R^3} - \frac{46,2414w_R^2 + 72,7317w_R^3}{1 + 224,8179w_R + 34,9054w_R^2 + 16,2158w_R^3} \text{ (кг/м}^3\text{).} \quad (11)$$

Концентрационные зависимости коэффициентов уравнений (6) и (7) описаны уравнениями:

$$\bar{\alpha}_R(w_R) = \frac{5,01286 + 70,0061w_R}{1 + 10,11702w_R + 0,0553025w_R^2}; \quad (12)$$

$$b_d(w_R) = 2,32243 + 5,60419 w_R - 2,8593533 w_R^2; \quad (13)$$

$$B_l(w_R) = \left[\frac{1,2844 + 98,1447w_R + 192,1863w_R^2}{1 + 146,762w_R + 82,0646w_R^2 - 3,273w_R^3} \right]^2. \quad (14)$$

Отметим, что зависимости (6) и (7), хорошо зарекомендовавшие себя при решении задач прогнозирования термодинамических свойств чистых веществ и растворов [12,20,21], могут быть рекомендованы для экстраполяционных расчетов.

Экспериментальные данные по капиллярной постоянной растворов R600a/«ХМИ Азмол» аппроксимированы полиномом вида

$$a^2 = A(w_R) + B(w_R)T + C(w_R) T^2 \text{ (мм}^2\text{)}, \quad (15)$$

где $A(w_R)$, $B(w_R)$, $C(w_R)$ – коэффициенты, значения которых для различных концентраций РХМ аппроксимированы зависимостями:

$$A(w_R) = 13,812 - 180,6362w_R + 815,7756w_R^2 - 1054,996w_R^3 + 415,3264w_R^4; \quad (16)$$

$$B(w_R) = -0,027503 + 0,9702w_R - 4,6862w_R^2 + 6,2128w_R^3 - 2,4755w_R^4; \quad (17)$$

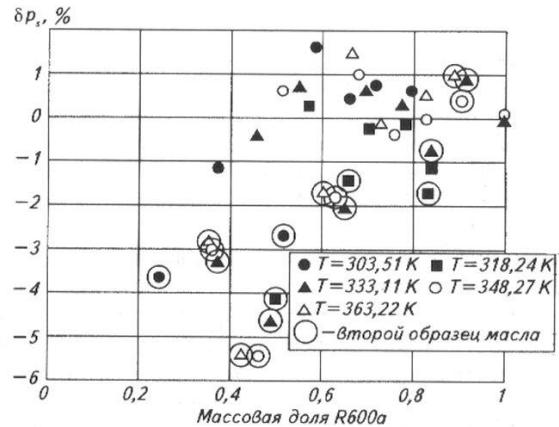


Рис. 5. Относительные отклонения экспериментальных данных по давлению насыщенных паров растворов R600a/«ХМИ Азмол» от рассчитанных по уравнению (6)

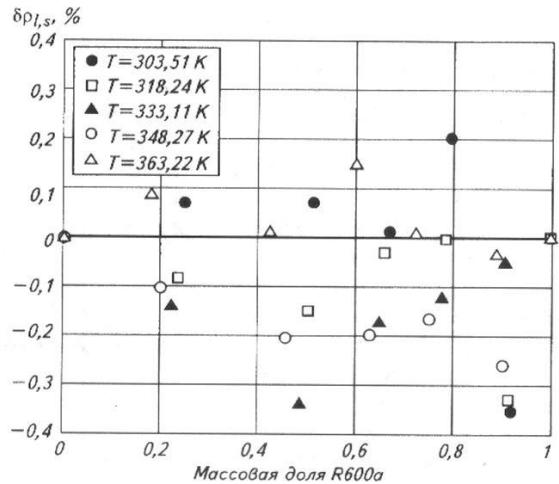


Рис. 6. Относительные отклонения экспериментальных данных по плотности жидкой фазы растворов R600a/«ХМИ Азмол» от рассчитанных по уравнению (7)

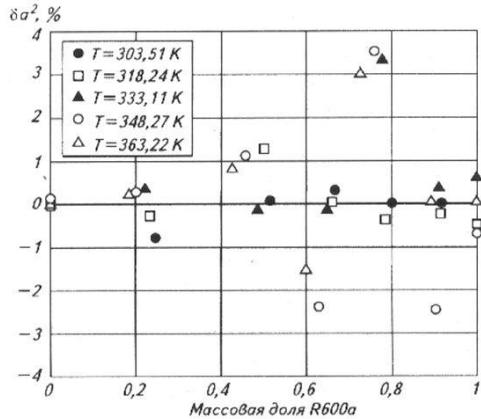


Рис. 7. Относительные отклонения экспериментальных данных по капиллярной постоянной растворов R600a/«ХМИ Азмол» от рассчитанных по уравнению (15)

$$C(w_R) = 1,6934 \cdot 10^{-5} - 1,399 \cdot 10^{-3} w_R + 6,859 \cdot 10^{-3} w_R^2 - 9,223 \cdot 10^{-3} w_R^3 + 3,705 \cdot 10^{-3} w_R^4. \quad (18)$$

Отклонения экспериментальных значений давления насыщенных паров, плотности и капиллярной постоянной растворов от значений, рассчитанных по уравнениям (6), (7) и (15), представлены на рис. 5 – 7. Значения отклонений свидетельствуют об удовлетворительной степени адекватности описания опытных данных.

На рис. 8 и 9 представлены концентрационные зависимости избыточных функций для плотности, капиллярной постоянной и поверхностного натяжения РХМ, вычисленные как разности между значениями термодинамических свойств реального раствора и значениями, рассчитанными по аддитивности с использованием массовых концентраций компонентов. С увеличением температуры избыточные функции $\Delta\sigma$ и $\Delta\alpha^2$ по абсолютной величине уменьшаются. Напротив, абсолютная величина $\Delta\rho$ с увеличени-

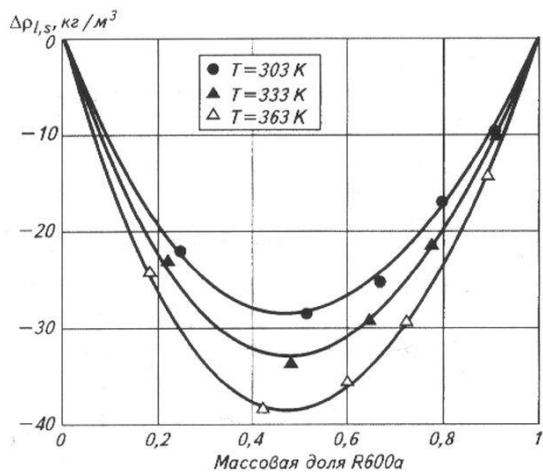


Рис. 8. Концентрационная зависимость избыточных функций для плотности жидкой фазы растворов R600a/«ХМИ Азмол»

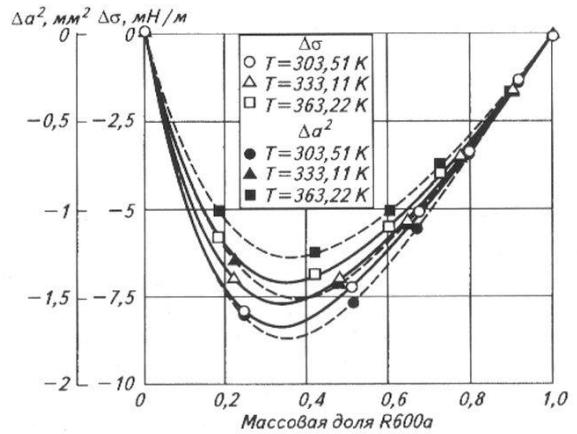


Рис. 9. Концентрационные зависимости избыточных функций для поверхностного натяжения и капиллярной постоянной растворов R600a/«ХМИ Азмол»

ем температуры возрастает. Из характера изменения избыточных функций и их значений следует, что хладагент с маслом образуют смеси с сильно выраженным зеотропным поведением. Потому указанные термодинамические свойства растворов не могут быть рассчитаны в рамках аддитивных моделей, как предлагается в некоторых работах [13].

Представляет интерес анализ поведения относительных избыточных функций (рис. 10). Обращает на себя внимание определенное подобие в характере изменения концентрационных зависимостей этих величин для давления насыщенных паров при различных температурах.

Полученная информация о поверхностном натяжении на границе жидкость – газ позволяет произвести количественную оценку адсорбции изобутана в поверхностном слое РХМ. Избыток изобутана в поверхностном слое G может быть рассчитан в соответствии с адсорбционным уравнением Гиббса [7]:

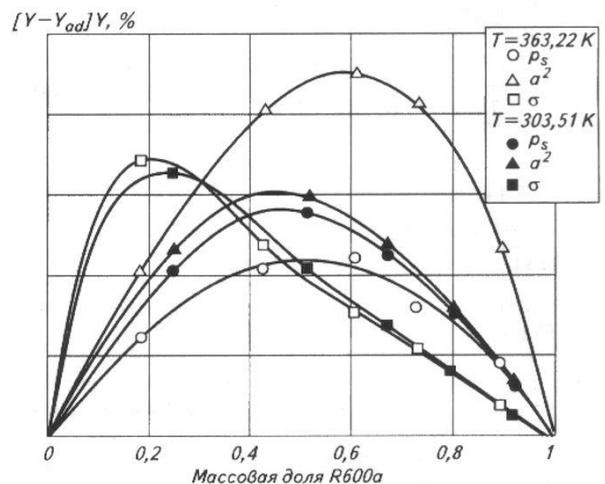


Рис. 10. Концентрационные зависимости относительных избыточных функций для давления насыщенных паров, поверхностного натяжения и капиллярной постоянной растворов R600a/«ХМИ Азмол»

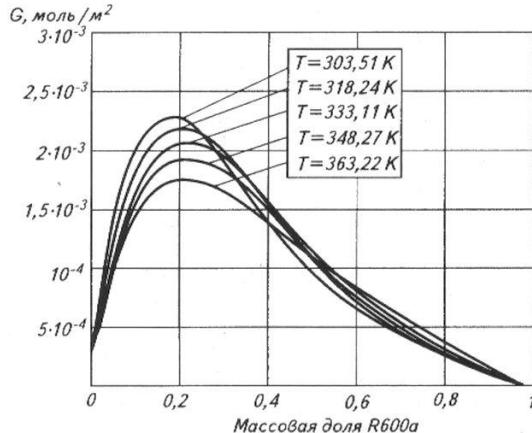


Рис. 11. Изотермы избыточной адсорбции изобутана в поверхностном слое жидкой фазы растворов R600a/«ХМИ Азмол»

$$G = -\frac{w_R}{RT} \left(\frac{\partial \sigma}{\partial w_R} \right)_T . \quad (19)$$

Рассчитанные изотермы адсорбции для раствора R600a/«ХМИ Азмол» приведены на рис. 11.

Избыточная адсорбция для данного раствора положительна и поверхностный слой обогащен изобутаном, что уменьшает поверхностное натяжение на межфазной границе [производная $(\partial \sigma / \partial w_R)_T \leq 0$]. Обратившись еще раз к рис. 1, 3 и 4, можно констатировать, что при концентрациях $w_R > 0,4$ абсолютные значения производных $(\partial \sigma / \partial w_R)_T$ малы и состав поверхностного слоя изменяется весьма незначительно. Таким образом, полученные результаты указывают на то, что при разработке расчетных моделей, описывающих термодинамические свойства РХМ, необходимо учитывать отличие состава поверхностного слоя раствора от состава в объеме жидкой фазы.

Поскольку термодинамические свойства РХМ существенно отличаются от свойств идеальных жидкых растворов, при определении энталпии жидкой фазы РХМ необходимо учитывать теплоту смешения. В этом случае энталпия жидкого раствора

$$H_{l,S} = H_{l,R} w_R + H_{OIL}(1 - w_R) + \Delta H_{l,S}, \quad (19)$$

где $H_{l,R}$ – энталпия жидкой фазы хладагента;

H_{OIL} – энталпия масла;

$\Delta H_{l,S}$ – теплота смешения.

Информация об энталпии жидкой фазы изобутана была взята из [8]. Энталпия масла «ХМИ Азмол» определялась из экспериментальных данных по теплоемкости, полученных в секторе калориметрических исследований НИИ физики Санкт-Петербургского государственного университета на дифференциальном сканирующем микрокалориметре DSC-111 фирмы SETARAM (Франция). Чувствительность калориметра составляет $3 \cdot 10^{-5}$ Дж/с. Ошибки в определении температуры и величины теплоемкости для использованной скорости нагревания 5 град/мин в интервале изме-

рения 283...393 К не превышают 0,2 К и 1,5% соответственно.

Температурная зависимость теплоемкости масла «ХМИ Азмол» в диапазоне температур 283...393 К, представляющем интерес для холодильной техники, аппроксимирована полиномом первой степени:

$$c_{p_{OIL}} = 0,441548 + 8,69 \cdot 10^{-4} T \text{ [кДж/(кг·К)]}. \quad (20)$$

Тогда энталпия чистого масла может быть рассчитана по формуле

$$H_{OIL} = \int_{273}^T (0,441548 + 8,69 \cdot 10^{-4} T) dT + 200 \text{ (кДж/кг)}. \quad (21)$$

Температура кипения масла обычно превышает 250 °C [5, 9]. Поэтому давление насыщенных паров масла при температурах рабочего тела в испарителе и конденсаторе холодильной установки незначительно. С учетом этого факта можно вполне обоснованно принять, что паровая фаза РХМ состоит только из чистого хладагента [1, 5, 11, 17, 18, 19]. В этих термодинамических условиях интегральная теплота смешения раствора хладагент/масло может быть определена по формуле [4]:

$$\Delta H_{l,S} = -w_R \frac{RT^2}{2M_R} \left[\partial \ln \frac{p_S}{p_R} / \partial T \right]_{w_R}, \quad (22)$$

где M_R и p_R – молекулярная масса и давление насыщенных паров хладагента.

При расчете производной в выражении (22) использовались аппроксимационная зависимость (6) и справочные данные по давлению насыщенных паров изобутана [8].

Температурную и концентрационную зависимости рассчитанных значений энталпии жидкой фазы РХМ демонстрируют рис. 12 и 13. Абсолютные величины интегральной теплоты смешения для исследованных растворов незначительны и при построении диаграмм давление – энталпия могут не учитываться. Вместе с тем этот вывод не является общим для других растворов хладагентов с маслами.

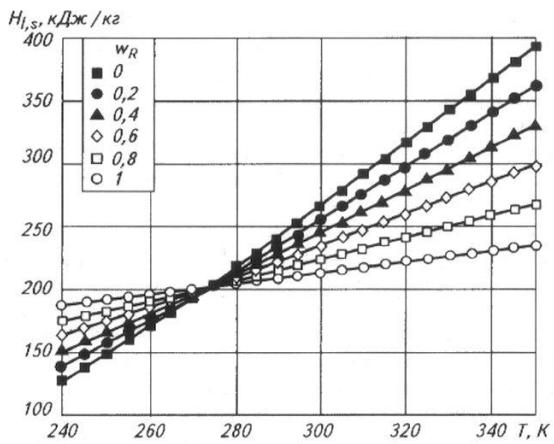


Рис. 12. Температурная зависимость энталпии жидкой фазы растворов R600a /«ХМИ Азмол»

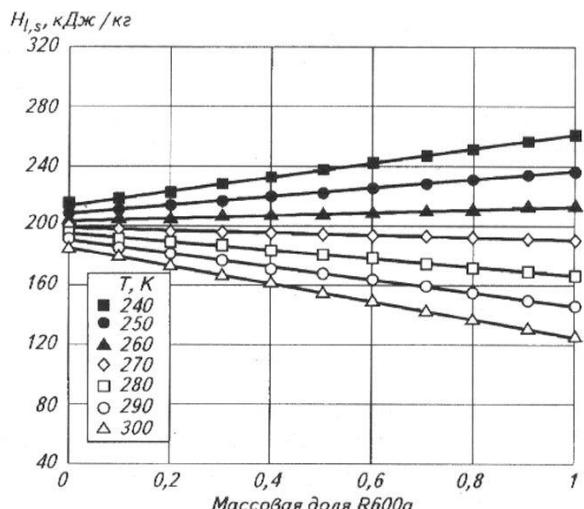


Рис. 13. Концентрационная зависимость энталпии жидкости растворов R600a/«ХМИ Азмол»

Предлагаемая информация по давлению насыщенных паров, плотности, поверхностному натяжению РХМ R600a/«ХМИ Азмол» рекомендуется к использованию при проектировании испарителей, компрессоров и теплообменников холодильного оборудования. Результаты расчета калорических свойств РХМ R600a/«ХМИ Азмол» могут быть применены для разработки диаграмм давление – энталпия для реальных рабочих тел с целью корректного учета влияния примесей масла на энергетическую эффективность компрессорной системы.

Авторы благодарят сотрудницу Института физики Санкт-Петербургского государственного университета Т.В. Белопольскую за предоставленную информацию по теплоемкости компрессорного масла «ХМИ Азмол» и проф. П.В. Скрипова (Институт теплофизики, Екатеринбург) за проведенные им измерения псевдокритических параметров данного масла.

Список литературы

- Железный В.П., Лысенко О.В. Фаиз Абед Реза. Влияние примесей растворимого в аммиаке компрессорного масла на калорические свойства рабочего тела и энергетическую эффективность холодильного цикла // Холодильная техника и технология. 1998. №2 (59).
- Железный В.П., Проценко Д.А., Анчебак С.Н., Сеченых В.В. Экспериментальное исследование термодинамических свойств растворов изобутана в компрессорном масле «ХМИ Азмол» // Холодильная техника и технология. 2005. №5 (97).
- Железный В.П. Исследование поверхностного натяжения холодильных агентов в широком диапазоне температур, включая окрестность критической точки // Теплофизические свойства веществ и материалов (ГСССД. Сер. Физические константы и свойства веществ). – 1985. – Вып. 20.
- Мельцер Л.З., Дремлюх Т.С., Чернышев С.К. и др. Теплофизические свойства холодильных масел и их растворов с фреоном 22 // Теплофизические свойства веществ и материалов (ГСССД. Сер. Физические константы и свойства веществ). 1977. Вып.11.
- ASHRAE Handbook for Refrigeration // Atlanta, GA. -1998.
- Corr S., Morrison J.D., Murphy F.T. An Evaluation of the Effects of Lubricants on the Thermodynamic Properties and Performance of Refrigerant Mixtures in Refrigeration and Air Conditioning Cycles. In Proceedings of the International Refrigeration Conference, Purdue University, 1996; Purdue, USA.
- Gibbs J.W. The Collected Works of J.W. Gibbs, Longmans, Green / New York, 1931. Vol.1.
- Lemmon E.W., McLinden M.O., Hubner M.L. «NIST Standard Reference Database 23, NIST thermodynamic and transport properties of refrigerants and refrigerant mixtures – REFPROP, version 7.0,» Standard Reference Data Program, National Institute of Standards and Technology. 2002.
- Lottin O., Guillemet P., Lebreton J.M.. Effects of synthetic oil in a compression refrigeration system using R410A. Part I: modelling of the whole system and analysis of its response to an increase in the amount of circulating oil // Int. J. Refrig. 2003 №26.
- Marsh K.N., Kandil M.E.. Review of thermodynamic properties of refrigerants+lubricant oils // Fluid Phase Equil. – 2002 – №199.
- Martz W.L., Burton C.M., Jacobi I.M. Local composition modelling of the thermodynamic properties of refrigerant and oil mixtures // Int. J. Refrig. 1996. №19.
- Medvedev O.O., Zhelezny P.V., Zhelezny V.P. Prediction of Phase Equilibria and Thermodynamic Properties of Refrigerant/Oil solutions // Fluid Phase Equil. 2004. №215.
- Mermond Y., Feidt M., Marville C. Propriétés thermodynamiques et physiques des mélanges de fluides frigorigènes et d'huiles // Int. J. Refrig. 1999. №22.
- Rabinovich V.A., Sheludyak Yu.E. Thermodynamics of Critical Phenomena: New Analysis of the Evaluation of Properties, New York, Begell House Inc. Publishers, 1999.
- Skripov P.V., Starostin A.A., Volosnikov D.V., Zhelezny V.P. Comparison of thermophysical properties for oil/refrigerant mixtures by use the pulse heating method // Int. J. Refrig. 2003. №26.
- Spauschus H.O. Thermodynamic Properties of Refrigerant-Oil Solutions. // ASHRAE J. 1963. № 2.
- Wahlström A., Vamling L. Development of models for prediction of solubility for HFC working fluids in pentaerythritol ester compressor oils // Int. J. Refrig. 2000. №23.
- Youbi-Idrissi M., Bonjour J., Marville C., Meunier F. Impact of Refrigerant-Oil Solubility on an Evaporator performances working with R-407C // Int. J. Refrig. 2003 №26.
- Youbi-Idrissi M., Bonjour J., Terrier M.F., Marville C., Meunier F. Oil presence in an evaporator: experimental validation of a refrigerant/oil mixture enthalpy calculation model // Int. J. Refrig. 2004 №27.
- Zhelezny P.V., Zhelezny V.P., Skripov P.V. Determination of the pseudocritical parameters for refrigerant/oil solutions // Fluid Phase Equil. 2003. №212.
- Zhelezny V.P. The Methods of Prediction of the Properties for Substances on the Coexistence Curve Including Vicinity of the Critical Point. In Proceedings of the NATO Advanced Research Workshop on Nonlinear Dielectric Phenomena in Complex Liquids, 2003 May 10-14; Jaszowiec-Ustron, Poland.
- Zürcher O., Thome J.R., Favrat D. In-Tube Flow Boiling of R-407C and R-407C/Oil Mixtures Part I: Microfin Tube // HVAC&R Research. 1998. №4.
- Zürcher O., Thome J.R., Favrat D. In-Tube Flow Boiling of R-407C and R-407C/Oil Mixtures Part II: Plain Tube Results and Predictions // HVAC&R Research. 1998. №4.