

# Исследование давления насыщенных паров, плотности, поверхностного натяжения и критических параметров хладагента R245fa

Канд. техн. наук Ю.В. СЕМЕНЮК, С.Н. АНЧЕРБАК, д-р техн. наук В.П. ЖЕЛЕЗНЫЙ

Одесская государственная академия холода,

канд. техн. наук А.Ж. ГРЕБЕНЬКОВ, канд. техн. наук О.В. БЕЛЯЕВА

Объединенный институт энергетических и ядерных исследований, Сосны, Минск

*The results of the experimental investigation of saturated vapor pressure, density, capillary constant and critical parameters of R245fa are presented in the article. On the basis of the obtained experimental information on capillary constant a coefficient of surface tension of R245fa was calculated. The investigations were carried out with the use of static methods of measurements in the temperature range from 290,69 K to critical temperature and with pressures from 2,608 bars to critical pressure. The temperature dependence of the saturated vapor pressure, density, capillary constant and surface tension of R245fa has been studied in the work. The agreement of the obtained experimental data with the results of other authors was carried out. The values of critical parameters of the refrigerant R245fa were determined.*

В последнее время ряд авторов рекомендуют применять в высокотемпературных тепловых насосах озононеразрушающий хладагент R245fa ( $C_3H_3F_5$ ) [11, 19, 24], который предлагается рассматривать в качестве альтернативы запрещенному в рамках Монреальского протокола R11. Это вещество имеет нулевой потенциал разрушения озонаового слоя (ODP) и достаточно низкий потенциал глобального потепления (GWP = 1020). Благодаря сравнительно высокой температуре нормального кипения и низкой удельной электропроводности R245fa также может использоваться в качестве вспенивателя для полиуретана.

Хладагент R245fa еще не нашел широкого применения в промышленности, поскольку одно из основных условий эффективного использования рабочих веществ – наличие полной базы достоверных данных об их термодинамических свойствах – на данный момент нельзя считать выполненным.

Анализ доступной информации по термодинамическим свойствам R245fa [13, 16, 18, 21, 23, 26, 29] указывает на некоторые противоречия в данных по давлению насыщенных паров в локальных интервалах температур. Кроме того, требуется дополнение и уточнение данных по давлению насыщенных паров, плотности и поверхностному натяжению в широкой окрестности критической точки.

## Экспериментальные исследования

Экспериментальное исследование давления насыщенных паров, плотности и капиллярной постоянной хладагента R245fa было проведено на экс-

perimentальной установке, схема которой представлена на рис. 1.

Измерительная ячейка 11 с внутренним объемом  $191,34 \pm 0,02 \text{ см}^3$  изготовлена из нержавеющей стали и имеет смотровые окна 3 и 27 с кварцевыми стеклами.

Внутри ячейки в кассете 12 установлены пять калиброванных капилляров различных радиусов:  $r_1 = 0,1169 \text{ мм}$ ,  $r_2 = 0,0798 \text{ мм}$ ,  $r_3 = 0,0466 \text{ мм}$ ,  $r_4 = 0,0965 \text{ мм}$ ,  $r_5 = 0,3163 \text{ мм}$ . Разности высот менисков жидкости в капиллярах и высота уровня жидкой фазы измерялись катетометром КМ-8 5 с погрешностью 0,015 мм. В верхней части измерительной ячейки установлен «горячий» вентиль B1, находящийся в зоне термостатирования.

Ячейка приводилась в строго горизонтальное положение (а капилляры соответственно – в вертикальное положение) путем совмещения специально нанесенных на поверхность стекол в средней их части меток в виде тонких полосок, перпендикулярных капиллярам.

Измерительная ячейка размещалась в жидкостном термостате 7, имевшем разгонный 32 и регулируемый 1 нагреватели. Последний подключен к системе регулирования температуры, включающей высокоточный регулятор температуры ВРТ-2, мост МО-62 и технический платиновый термометр со-противления 30. Колебания температуры в термостате не превышали 0,002 К. Для поддержания температур, близких к комнатной, использовалась вода, прокачивавшаяся через водоохладитель 9 и теплообменник 6.

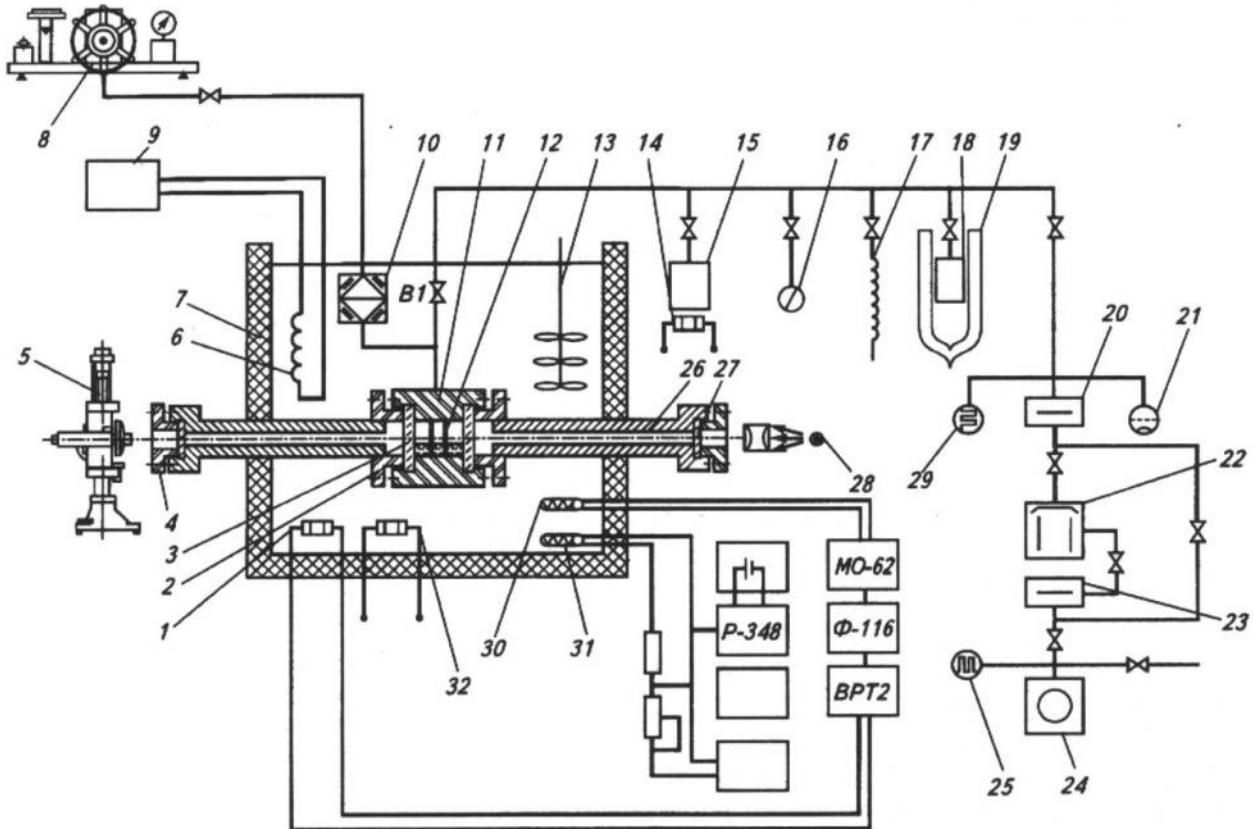


Рис. 1. Схема экспериментальной установки:

1 – регулируемый нагреватель; 2, 4 – фланцы; 3, 27 – кварцевые окна; 5 – катетометр; 6 – теплообменник; 7 – термостат; 8 – грузопоршневой манометр (МП-60 и МП-6); 9 – водоохладитель; 10 – мембранный нуль-индикатор; 11 – измерительная ячейка; 12 – кассета с капиллярами; 13 – мешалка; 14 – нагреватель; 15, 18 – баллончики для заправки и выпуска; 16 – образцовый манометр; 19 – сосуд Дьюара; 20, 23 – криогенные ловушки; 21 – ионизационный манометр; 22 – диффузионный насос; 24 – форвакуумный насос; 25, 29 – термопарный манометрический преобразователь; 26 – смотровые тубусы; 28 – источник света; 30 – термометр системы регулирования температуры; 31 – образцовый платиновый термометр сопротивления; 32 – разгонный нагреватель

Для удаления воздуха из измерительной ячейки и очистки исследуемого вещества от неконденсирующихся газов применялась вакуумная система, позволяющая создавать и поддерживать давление вплоть до  $5 \cdot 10^{-1}$  Па. Система состоит из диффузионного 22 и форвакуумного 24 насосов, криогенных ловушек 20, 23, а также термопарных манометрических преобразователей 25, 29 и ионизационного манометра 21.

Температура в эксперименте определялась при помощи платинового термометра сопротивления 31 типа ПТС-10. Термометр устанавливался вблизи средней части измерительной ячейки. Сопротивление термометра измерялось по компенсационной схеме с использованием потенциометра Р-348 класса 0,002 и образцовой катушки сопротивления класса 0,01. Выполненный анализ показывает, что погрешность измерения температуры в термостате не превышала  $\pm 0,015$  К.

Давление в измерительной ячейке измерялось грузопоршневыми манометрами МП-60 и МП-6 8 класса точности 0,05. В качестве разделителя использовался мембранный нуль-индикатор 10.

Количество заправленного в измерительную ячейку вещества определяли по изменению массы заправочного баллончика 15. Взвешивание баллончика осуществлялось на аналитических весах АДВ-200М с погрешностью  $5 \cdot 10^{-7}$  кг.

Хладагент R245fa был приобретен у фирмы Honeywell Fluorine Products Europe B.V. Проведенный хроматографический анализ показал, что после предварительной очистки от неконденсирующихся газов методом многократной кристаллизации под вакуумом содержание R245fa в исследованных образцах составляло 99,9 % (по массе).

Плотность хладагента R245fa на линии кипения рассчитывали по формуле

$$\rho' = \frac{m_l}{V_l} = \frac{m_R - m_{v,R}}{V_l}, \quad (1)$$

где  $m_l$  – масса жидкой фазы хладагента;  $m_R$  – масса заправленного в ячейку хладагента;  $m_{v,R}$  – масса паровой фазы хладагента;  $V_l$  – объем жидкой фазы в ячейке (определялся по результатам тарировочного эксперимента, в котором в качестве эталонного вещества ис-

пользовался R134a с привлечением данных по его плотности [21]).

Масса  $m_{v,R}$  рассчитывалась из полученных в эксперименте данных об объеме паровой фазы и информации о плотности насыщенных паров R245fa [21] при температуре опыта. Выполненный анализ погрешности полученных экспериментальных данных показал, что неисключенная относительная систематическая погрешность определения плотности хладагента R245fa не превышает 0,19 %.

В настоящей работе для измерения капиллярной постоянной использовался модифицированный дифференциальный метод [5], в рамках которого производятся измерения разности высот поднятия менисков жидкости в нескольких парах капилляров

с последующей статистической обработкой опытных данных и нахождением средневзвешенного значения капиллярной постоянной по формуле

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

Статистический вес  $p_{ik}$  рассчитывался как величина, обратная максимальной относительной погрешности измерения капиллярной постоянной. Такая методика расчета позволила значительно уменьшить влияние случайных погрешностей на измеренную величину  $a^2$ . Проведенный анализ показывает, что неисключенная систематическая погрешность определения капиллярной постоянной

*Экспериментальные данные по давлению насыщенных паров, плотности, капиллярной постоянной  $a^2$  и поверхностному натяжению хладагента R245fa*

T, K	$p_s$ , бар	$\rho'$ , кг/м <sup>3</sup>	$a^2$ , мм <sup>2</sup>	$\sigma_p$ , мН/м	T, K	$p_s$ , бар	$\rho'$ , кг/м <sup>3</sup>	$a^2$ , мм <sup>2</sup>	$\sigma_p$ , мН/м
290,69	—	1354,87	2,233	14,768	384,73	16,186	1043,8	0,718	3,34
291,76	—	1349,43	2,215	14,587	388,47	17,528	1020,05	0,658	2,954
314,3	2,608	1287,99	1,845	11,524	393,16	19,241	998,76	0,582	2,515
333,46	4,668	1234,29	1,537	9,111	395,82	20,31	986,68	0,543	2,292
333,53	—	1229,43	1,538	9,08	399,4	21,784	958,92	0,482	1,941
333,55	4,683	1227,82	1,536	9,056	401,47	22,681	950,98	0,448	1,769
338,15	5,325	1221,29	1,465	8,566	404,84	24,212	925,47	0,395	1,484
343,51	6,165	1201,89	1,38	7,906	407,73	25,537	906,65	0,345	1,241
348,73	7,057	1185,31	1,3	7,31	411,37	27,394	874,29	0,284	0,95
353,6	8,016	1168,16	1,218	6,716	411,47	27,409	878,54	0,285	0,958
353,67	7,993	1164,08	1,217	6,685	414,11	28,792	852,56	0,238	0,751
353,68	7,966	1164,06	1,213	6,663	414,2	28,863	851,22	0,238	0,748
359,63	9,246	1147,57	1,124	6,043	416,14	29,882	835,04	0,206	0,617
363,81	10,202	1128,49	1,058	5,56	417,86	30,751	817,54	0,18	0,512
363,85	10,199	1131,78	1,058	5,577	417,88	30,805	814,33	0,176	0,497
369,17	11,542	1109,94	0,968	4,961	418,82	31,352	804,19	0,161	0,44
373,8	12,808	1088,27	0,893	4,447	420,25	32,27	794,24	—	—
378,53	14,204	1069,73	0,819	3,968	424,05	34,504	724,04	—	—
384,69	16,203	1038,18	0,719	3,325	—	—	—	—	—

R245fa в проведенных экспериментах не превышает 0,012 мм<sup>2</sup>.

Коэффициент поверхностного натяжения определялся по известному соотношению:

$$\sigma = \frac{(\rho' - \rho'')}{2} \bar{a}^2 g, \quad (3)$$

где  $\rho'$  и  $\rho''$  – плотности жидкой и паровой фаз R245fa;

$g$  – ускорение свободного падения (9,8073 м/с<sup>2</sup> на широте Одессы).

Опубликованная информация о таких весьма важных термодинамических величинах, как критические параметры хладагента R245fa, крайне ограничена [16, 21, 25].

Конструкция экспериментальной установки позволяет определять критические параметры чистых веществ и растворов посредством визуальных наблюдений за состоянием исследуемого образца. Применявшаяся авторами методика экспериментального исследования критических параметров подробно изложена в [12, 20]. В качестве критических параметров принимались те значения температуры, давления и плотности, при которых достигалась максимальная интенсивность опалесценции по всему объему измерительной ячейки. При этом межфазная граница должна была, во-первых, с повышением температуры оставаться (в пределах допустимой вариации) на неизменном уровне и, во-вторых, исчезать при нагревании и появляться при охлаждении на одной и той же высоте. Последнее условие основывается на хорошо известном положении [4, 10], что вблизи критической точки высота исчезновения межфазной границы при нагревании вдоль изохоры и высота возникновения такой границы при охлаждении различны, если плотность вещества не равна критической. В случае критической плотности следует ожидать совпадения этих высот.

### Результаты экспериментальных исследований

Полученные экспериментальные данные по давлению насыщенных паров  $p_s$ , плотности  $\rho'$  и капил-

лярной постоянной, а также рассчитанные по формуле (3) значения коэффициента поверхностного натяжения R245fa приведены в табл. 1.

Измеренные авторами статьи и приведенные в литературе критические параметры R245fa представлены в табл. 2.

Накопленный опыт исследования критических параметров показывает, что погрешность их измерения методом пьезометра постоянного объема зависит от целого ряда трудно устранимых факторов [1, 2, 9]. Более того, по мере приближения к критическому состоянию шумовые эффекты оказывают все более значительное влияние как на абсолютное значение критических параметров, так и на величину критических индексов [9]. Поэтому два взаимосвязанных вопроса – «универсальность» значений критических показателей и погрешности экспериментального определения критических параметров – широко обсуждаются в литературе вплоть до настоящего времени [1, 2, 6, 9].

Разработчикам уравнений состояния при ограниченном объеме экспериментальных данных о критических параметрах (как это имеет место для R245fa) очень часто приходится решать задачу выбора «оптимальных» значений критических параметров, при которых достигается минимальная погрешность описания термических свойств в широкой окрестности критической точки [14, 27].

В настоящей работе «оптимальное» значение критической температуры хладагента R245fa определено методом минимизации среднеквадратических отклонений литературных [17, 25] и полученных авторами экспериментальных данных по капиллярной постоянной от аппроксимационной зависимости вида [7, 27]:

$$a^2 = a_0 t^n \psi(t), \quad (4)$$

где  $a_0$  – числовой коэффициент;

$t = 1 - T_k/T$  – приведенная температура;

$n$  – критический показатель степени;

$\psi(t)$  – универсальная для нормальных жидкостей кроссоверная функция [6],

Таблица 2

Значения критических параметров R245fa у различных авторов

Автор	T <sub>k</sub> , К	p <sub>k</sub> , бар	ρ <sub>k</sub> , кг/м <sup>3</sup>
Schmidt J.W. [25]	427,2 ± 0,02	–	517 ± 8
McLinden M.O. [21]	427,2	36,4	517
Grebennikov A.J. [16]	427,158 ± 0,1	36,47 ± 0,02	516,68 ± 0,5
ОГАХ	427,3 ± 0,015	36,6 ± 0,05	523,3 ± 10,4

$$\psi(t) = 1 - 0,04762 t^{1.5} / \ln t. \quad (5)$$

На первом этапе нахождения «оптимального» значения критической температуры подвергалась анализу достоверность привлеченных к обработке данных путем проверки их соответствия линейной в логарифмических координатах температурной зависимости  $\ln(a^2) = f(\ln(t^\psi(t)))$  с показателем степени  $n$ , равным значению критического индекса, полученному в масштабной теории [3, 7] ( $n = 0,9341$ ). При этом весь массив данных описывался указанной зависимостью, после чего из дальнейшей обработки исключались значения капиллярной постоянной, отклонения которых от указанной аппроксимационной прямой были соизмеримы с грубыми погрешностями, т.е. такими, которые существенно (в 3 и более раза) превышали характерную для данной температуры экспериментальную погрешность. Следующий этап заключался в варьировании значения критической температуры с целью достижения минимального значения среднего квадратичного отклонения  $S$  экспериментальных данных от рассчитанных по уравнению (4). Эту процедуру демонстрирует рис. 2. В рамках описанного подхода в качестве «оптимального» было получено значение критической температуры  $T_{\text{Конт}} = 427,32 \text{ K}$  при  $n = 0,9523$ .

Отклонения экспериментальных значений капиллярной постоянной от рассчитанных по степенной зависимости (4) приведены на рис. 3. Характер и величина отклонений экспериментальных данных от рассчитанных при  $t \leq 0,02$ , по нашему мнению, являются закономерными и обусловлены методическими ограничениями возможности применения капиллярного метода исследования капиллярной постоянной в окрестности критической точки [7].

Аналитическое описание экспериментальных данных по давлению насыщенных паров  $p_s$  и плотности  $\rho'$  хладагента R245fa, полученных авторами и приведенных в [13, 15, 16, 18, 21, 23, 26, 29], выполнено в рамках методики, основные положения которой изложены в работах [8, 22]. Предложенные в этих работах зависимости для аппроксимации экспериментальных данных имеют вид:

$$\ln p_s = \ln p_{\text{Конт}} - \alpha_R \tau - b \tau^{2.64}; \quad (6)$$

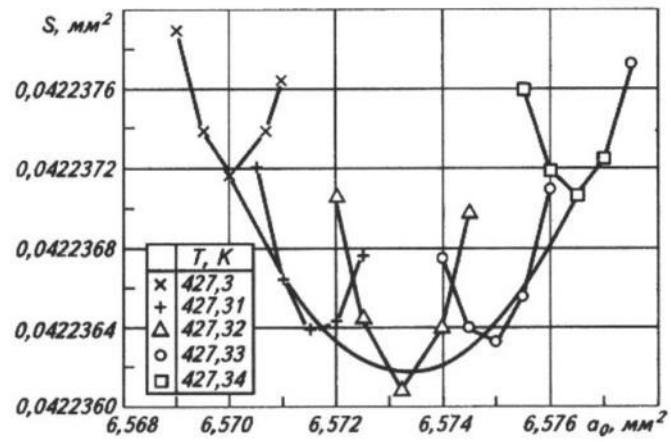


Рис. 2. К процедуре определения оптимального значения критической температуры R245fa из данных по капиллярной постоянной

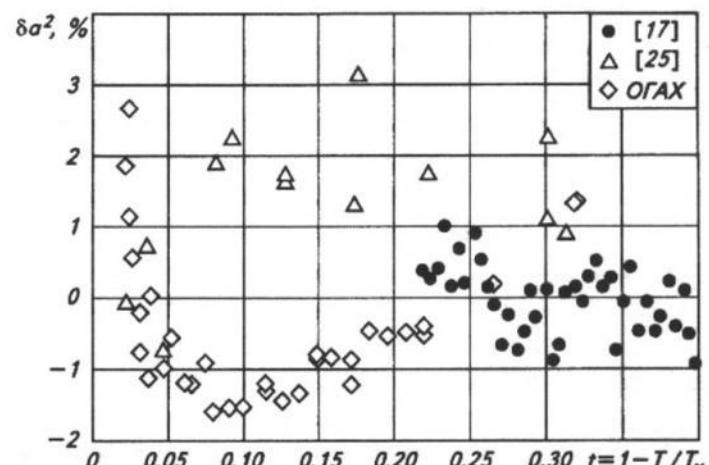


Рис. 3. Отклонения экспериментальных данных различных авторов от рассчитанных по уравнению (4)

$$\ln \rho' = \ln \tilde{\rho}_{\text{Конт}} + B \tau^{F(\tau)}; \quad (7)$$

$$F(\tau) = 1 - 1,113 \tau^{0.4} / \ln t, \quad (8)$$

где  $\alpha_R$  – критерий Риделя;

$b$  и  $B$  – числовые коэффициенты;

$\tau = \ln(T_{\text{Конт}}/T)$  – приведенная температура;

$\beta$  – показатель степени;

$F(\tau)$  – универсальная для нормальных жидкостей кроссоверная функция [22, 27].

Оптимальные значения критического давления и плотности определены на основе зависимостей (6) и (7) по методике, аналогичной описанной выше для критической температуры.

Таблица 3

Значения оптимальных критических параметров и коэффициентов уравнений (4), (6) и (7)

Уравнение	$T_{\text{Конт}}, \text{K}$	$P_{\text{Конт}}, \text{бар}$	$\rho_{\text{Конт}}, \text{кг}/\text{м}^3$	$\beta$	$\alpha_R$	$b$	$B$	$a_0, \text{мм}^2$	$n$
(6)	427,32	36,58	–	–	7,571	7,081	–	–	–
(7)	427,32	–	523,5	0,33	-	–	1,683	–	–
(4)	427,327	–	–	–	–	–	–	6,573	0,9523

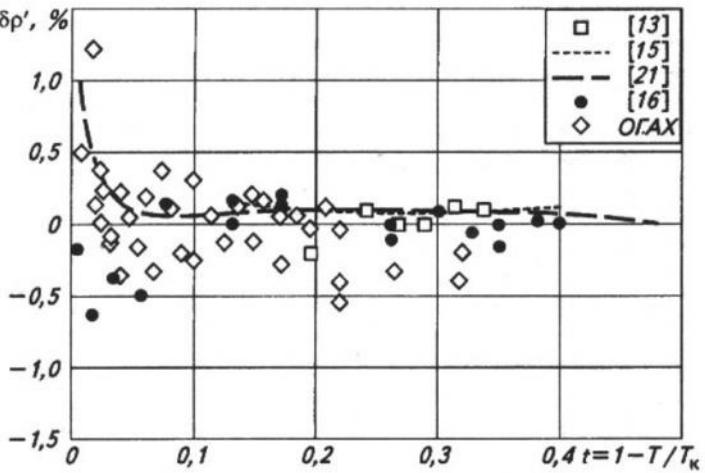


Рис. 4. Отклонения экспериментальных и литературных данных по плотности R245fa на линии кипения от рассчитанных по уравнению (7)

Рассчитанные значения давления насыщенных паров  $p_s$ , плотности на линии кипения  $\rho'$ , капиллярной постоянной  $a^2$  и поверхностного натяжения  $\sigma$  хладагента R245fa

T, K	$p_s$ , бар	$\rho'$ , кг/м <sup>3</sup>	$a^2$ , мм <sup>2</sup>	$\sigma_p$ , мН/м	T, K	$p_s$ , бар	$\rho'$ , кг/м <sup>3</sup>	$a^2$ , мм <sup>2</sup>	$\sigma_p$ , мН/м
240	0,088	1484,03	2,958	21,521	335	4,883	1229,94	1,521	8,974
245	0,12	1472,14	2,884	20,813	340	5,606	1213,84	1,443	8,372
250	0,161	1460,15	2,81	20,111	345	6,407	1197,28	1,364	7,777
255	0,213	1448,05	2,736	19,414	350	7,291	1180,19	1,286	7,19
260	0,278	1435,84	2,662	18,722	355	8,263	1162,53	1,207	6,612
265	0,358	1423,5	2,587	18,035	360	9,329	1144,22	1,128	6,042
270	0,456	1411,02	2,512	17,353	365	10,495	1125,18	1,048	5,482
275	0,575	1398,4	2,437	16,677	370	11,768	1105,3	0,968	4,933
280	0,718	1385,61	2,362	16,005	375	13,153	1084,47	0,888	4,395
285	0,887	1372,65	2,287	15,339	380	14,659	1062,52	0,807	3,869
290	1,087	1359,51	2,211	14,677	385	16,291	1039,26	0,726	3,358
295	1,32	1346,17	2,136	14,021	390	18,059	1014,4	0,644	2,861
300	1,591	1332,61	2,06	13,37	395	19,971	987,6	0,562	2,381
305	1,903	1318,82	1,983	12,725	400	22,036	958,33	0,479	1,921
310	2,261	1304,78	1,907	12,085	405	24,265	925,79	0,395	1,483
315	2,668	1290,46	1,83	11,45	410	26,669	888,68	0,31	1,071
320	3,13	1275,85	1,753	10,822	415	29,259	844,59	0,224	0,692
325	3,65	1260,91	1,676	10,199	420	32,052	787,96	0,137	0,355
330	4,232	1245,62	1,598	9,583	425	35,061	697,46	0,046	0,082

Рекомендуемые оптимальные значения критических параметров R245fa и коэффициенты аппроксимационных уравнений (4), (6) и (7), полученные в результате обработки измеренных авторами экспериментальных данных и содержащейся в литературе информации, приведены в табл. 3.

Следует отметить, что соотношения (4), (6) и (7) хорошо зарекомендовали себя при решении задач прогнозирования термодинамических свойств как чистых веществ, так и растворов [22, 27, 28] и могут быть рекомендованы для проведения экстраполяционных расчетов.

Отклонения полученных авторами и приведенных в литературе значений плотности R245fa от значений, рассчитанных по уравнениям (6) и (7), представлены на рис. 4. Величины отклонений свидетельствуют

Таблица 4

ют о достаточной степени адекватности описания опытных данных. Также приемлемы и отклонения по давлению насыщенных паров.

Полные относительные погрешности полученных данных (с учетом случайной составляющей, неисключенной систематической погрешности и погрешности отнесения по температуре) для измеренных термодинамических свойств R245fa оцениваются авторами в следующих пределах:  $0,15 \leq \delta_p \leq 1,31\%$ ,  $0,19 \leq \delta \rho' \leq 0,22\%$ ;  $\delta a^2$  изменяется от 0,69 до 5,28 % при  $t = 0,03$ , а полная абсолютная погрешность не превышает  $\Delta a^2 = 0,013 \text{ мм}^2$ ;  $\delta \sigma$  изменяется от 0,41 до 6,03 % при  $t = 0,03$ , полная абсолютная погрешность не превышает  $\Delta \sigma = 0,045 \text{ мН/м}$ .

Рассчитанные по уравнениям (6), (7), (4) и (3) значения давления насыщенных паров, плотности на линии кипения, капиллярной постоянной и поверхностного натяжения хладагента R245fa приведены в табл. 4.

Представленная работа была выполнена благодаря финансовой поддержке Государственного фонда фундаментальных исследований Министерства образования и науки Украины и Белорусского республиканского фонда фундаментальных исследований в рамках проекта БРФФИ-ГФФИУ № 10.02/003 Т05К-001.

## Список литературы

1. Анисимов М.А. Исследование критических явлений в жидкостях // УФН. – 1974. Т. 114.
2. Анисимов М.А., Рабинович В.А., Сычев В.В. Термодинамика критического состояния индивидуальных веществ и материалов – М.: Энергоатомиздат, 1990.
3. Анисимов М.А. Критические явления в жидкостях и жидкых кристаллах. – М.: Наука, 1987.
4. Гиршфельдер Д., Кертис Ч., Берд Р. Молекулярная теория газов и жидкостей. – М.: Изд-во иностр. лит., 1961.
5. Железный В.П. Исследование поверхностного натяжения хладильных агентов в широком диапазоне температур, включая окрестность критической точки // Теплофизические свойства веществ и материалов (ГСССД. Сер. Физические константы и свойства веществ). 1985. Вып. 20.
6. Железный В.П. Термодинамічні властивості озононеруйнівних холодаагентів та їх розчинів з мастилами (Експеримент, методи прогнозування, проблеми екології): Дис. д-ра техн. наук: 05.14.06. – Одесса, 2002.
7. Железный В.П. Температурная зависимость капиллярной постоянной и коэффициента поверхностного натяжения неассоциированных жидкостей // Теплофизические свойства веществ и материалов (ГСССД. Сер. Физические константы и свойства веществ). 1991. Вып. 31.
8. Железный В.П., Анчебак С.Н., Проценко Д.А. Методы прогнозирования свойств веществ на линии насыщения, включая окрестность критической точки // Холодильная техника и технология. 2004. № 5.
9. Иванов Д.Ю. Критическое поведение неидеализированных систем. – М.: Физматлит, 2003.
10. Кириллин В.А., Шейндин А.Е. Исследование термодинамических свойств веществ. – М.: Госэнергоиздат, 1963.
11. Сухольская А.Б., Железный В.П., Хлиева О.Я. Эколого-энергетический анализ перспектив применения альтернативных хладагентов в тепловых насосах. Ч.1 // Холодильная техника и технология. 2005. № 2.
12. Шильяков А.А. Экспериментальное исследование термических свойств и критических параметров фреонов Ф21 и Ф114B2: Автореф. дис. канд. техн. наук: 01.04.14. – Новосибирск, 1971.
13. Bobbo S., Fedele L., Scattolini M., Camporese R. Isothermal VLE measurements for binary mixture HFC-134a+HFC-245fa and HC-600a+ HFC-245fa. Fluid Phase Equilibria. 2001; 185; 244-264.
14. Chernyak Y., Zhelezny P., Scherbakov B. Critical parameters of alternative refrigerants and their mixtures // High Temps. – High Press. – 1997. – V.29. – № 6.
15. Defibaugh, D.R. and Moldover, M.R. (1997). Compressed and saturated liquid densities for 18 halogenated organic compounds. J. Chem. Eng. Data 42: 160-168.
16. Grebenkov A.J., Beliayeva O.V., Tsurbelev V.P., Timofeyev B.D. Vapor Pressure and PVT Parameters for Refrigerant 245fa. 1256-RP, ASHRAE Transactions, Volume 111, Part 2, 2005.
17. Hong Lin, Yuan-Yuan Duan, Zhong-Wei Wang. Surface tension measurements of 1,1,1,3,3-pentafluoropropane (R245fa) and 1,1,1,3,3,3-hexafluoropropane (R236fa) from 254 to 333 K. Fluid Phase Equilibria. 2003; 214; 79-86.
18. Jiang Pan, Jiangtao Wu, Zhigang Liu. Vapor Pressure of Dimethoxymethane and 1,1,1,3,3-Pentafluoropropane. J. Chem. Eng. Data 2006, 51, 186-189.
19. Kuipers L. The Impact of the Montreal and Kyoto Protocol on New Developments in Refrigeration and A/C. // Proc. IIR conference «Emerging Trends in Refrigeration & Air-conditioning. – New Delhi, India. – March 18-20, 1998.
20. Masahiko Yasumoto, Yasufu Yamada, Jyunji Murata, Shingo Urata, Katsuto Otake. Critical Parameters and Vapor Pressure Measurements of Hydrofluoroethers at High Temperatures. J. Chem. Eng. Data 2003, 48, 1368-1379.
21. McLinden M. O., Klein S. A., Lemmon E. W., Peskin A. P. G., 2003, NIST Standard Reference Database 23, NIST Thermodynamic Properties of Refrigerants and Refrigerants Mixtures Database (REFPROP), Version 7.1 (Gaithersburg: National Institute of Standard and Technology).
22. Medvedev OO, Zhelezny PV, Zhelezny VP. Prediction of Phase Equilibria and Thermodynamic Properties of Refrigerant/Oil solutions. Fluid Phase Equilibria 2004; 215; 29-38.
23. Nicola G.J. Vapor pressure and gas phase PVT data for 1,1,1,3,3-pentafluoropropane (R245fa). Chem. and Eng. Data. 2001, 46, № 6.
24. Pearson F. Refrigerants past, present and future. // International Congress of Refrigeration. – 2003. – Washington, D.C.
25. Schmidt J.W., Carrillo-Nava E., Moldover M.R. Partially halogenated hydrocarbons CHFCl-CF<sub>3</sub>, CF<sub>3</sub>-CH<sub>3</sub>, CF<sub>3</sub>-CHF-CHF<sub>2</sub>, CF<sub>3</sub>-CH<sub>2</sub>-CF<sub>3</sub>, CHF<sub>2</sub>-CF<sub>2</sub>-CH<sub>2</sub>F, CF<sub>3</sub>-CH<sub>2</sub>-CHF<sub>2</sub>, CF<sub>3</sub>-O-CHF<sub>2</sub>: Critical temperature, refractive indices, surface tension and estimates of liquid, vapor and critical densities. Fluid Phase Equilibria. 1996; 122; 187-206.
26. Sotani T., Kubota H. Vapor pressures and PVT properties of 1,1,1,3,3-pentafluoropropane (HFC-245fa). Fluid Phase Equilibria. 1999; 161; 325-335.
27. Zhelezny V.P. The Methods of Prediction of the Properties for Substances on the Coexistence Curve Including Vicinity of the Critical Point // Proceedings of the NATO Advanced Research Workshop on Nonlinear Dielectric Phenomena in Complex Liquids. Jaszowiec-Ustron, Poland, – 10-14 May 2003, edited by S.J. Rzoska, V.P. Zhelezny.
28. Zhelezny P.V., Zhelezny P.V., Skripov P.V. Determination of the pseudocritical parameters for refrigerant /oil solutions // Fluid Phase Equilibria. 2003; 212; 285-302.
29. Zhong-Wei Wang, Yuan-Yuan Duan. Vapor Pressures of 1,1,1,3,3-Pentafluoropropane (R245fa) and 1,1,1,2,3,3,3-Heptafluoropropane (HFC-227ea). J. Chem. Eng. Data 2004, 49, 1581-1585.