

Фазовое равновесие фреона R245fa от 242 К до критической точки

А. Ж. ГРЕБЕНЬКОВ, В. П. ЦУРБЕЛЕВ, О. В. БЕЛЯЕВА, Т. А. ЗАЯЦ, Б. Д. ТИМОФЕЕВ

Объединенный институт энергетических и ядерных исследований – Сосны

Национальной академии наук Беларусь

г. Минск, Республика Беларусь

Wide use of R245fa is restrained by the lack of consistent data on thermophysical properties. This paper reviews available different sources, and it is concluded that the most crucial inconsistency exist between measurements of the phase equilibrium parameters. In order to provide accurate data on properties of R245fa, the vapor-liquid equilibrium parameters over a wide temperature range relevant to commercial applications of R245fa were measured. The information obtained, along with other reliable and verified data on the phase equilibrium parameters for R245fa, was fitted with appropriate property correlation models.

Анализ информации из доступных оригинальных источников о термодинамических свойствах R245fa показал, что имеется несогласованность параметров равновесия жидкость – пар (*VLE*), представленных различными исследователями, особенно в низкотемпературной области, где расхождение между данными по давлению насыщенного пара превышает 2 %. *VLE*-данные вблизи критической точки ограничиваются только несколькими измеренными величинами. *PVT*-данные в однофазных областях, позволяющие рассчитывать величины плотности на линии насыщения, представлены пятью оригиналами работами, которые приемлемо согласуются друг с другом, но имеется широкая область параметров состояния, где все еще отсутствуют прямые измерения.

При создании Стандартной базы данных NIST 23 (последней версии REFPROP 7.1) использована расширенная модель соответственных состояний (ECS), которая базируется на экспериментальных данных, и, если последние недостаточно проверены, точны и последовательны (что справедливо для имеющегося набора свойств R245fa), параметры модели могут быть также неточны. Главная цель настоящего исследования – представить точные данные о параметрах фазового равновесия R245fa в широком диапазоне температур, важном для коммерческих систем кондиционирования воздуха.

Литературные данные

Давление насыщенных паров

Опубликованы три работы, представляющие экспериментальные данные по давлению насыщенного пара R245fa (табл. 1). В сравниваемых температурных диапазонах только данные, полученные

Nicola [8] и Bobbo [4], согласуются в пределах общей погрешности. Расхождение между этими данными и экспериментальными результатами, полученными Sotani et al. [10], также не превышает 5 кПа, но имеет систематический характер.

Для параметров фазового перехода жидкость – пар в области критической точки R245fa в литературе имеются только величины критической температуры и плотности, рассчитанные на основе измерений критического индекса рефракции и представленные в работе Schmidt et al. [9]. Эти параметры использованы в REFPROP 7.1 [7], где критическая точка R245fa имеет следующие параметры: $T_k = 427,2$ К, $p_k = 3640$ кПа, $\rho_k = 517$ кг/м³.

Плотность на линии насыщения

Известны три источника экспериментальных данных о плотности R245fa в жидкой фазе, которые позволяют рассчитать плотность насыщенной жидкости (табл. 1). Информация, представленная в [7], основана на *PVT*-данных R245fa, полученных на изотермах Defibauch и Moldover [6]. Погрешности измерения температуры, давления и плотности в этой работе составили $\pm 0,01$ К, $\pm 0,5$ кПа и $\pm 0,5$ кг/м³ соответственно, плотность жидкости при давлении насыщения представлена в [6] в виде полинома. Sotani et al. [10] измерили плотность жидкой фазы с погрешностью менее $\pm 0,09$ %. Результаты обобщены уравнением состояния типа уравнения Тейта с максимальным отклонением 0,07 %, по которому авторы рассчитали плотность насыщенной жидкости. Bobbo et al. [5] экспериментально определили плотность жидкости также на изотермах и полученные данные аппроксимировали уравнением состояния типа уравнения Тейта с максимальным отклонением 0,21 %.

Таблица 1

Обзор данных по параметрам фазового равновесия R245fa

Автор и дата	Температурный диапазон, К	Диапазон давлений, кПа	Количество экспериментальных точек	Погрешность*
Давление насыщенных паров				Погрешность, кПа
Nicola G.D., 2001 [8]	265 – 352	Давление насыщения	51	0,5
Sotani T., et al., 1999 [10]	293 – 426		34	5
Bobbo S., et al., 2001 [4]	293 – 313		3	1
Плотность жидкой фазы				Погрешность, кг/м ³
Defibauch et al. 1997 [6]	250 – 370	макс. 6500	1041	< 0,5
Sotani et al. 1999 [10]	298 – 323	макс. 200000	113	0,09 %
Bobbo et al. 2003 [5]	283 – 343	макс. 25000	200	0,1 %
Плотность газовой фазы				Погрешность, кПа
Nicola 2001 [8]	313 – 367	216 – 610	32	1,5
Sotani et al. 1999 [10]	313 – 343	151 – 507	98	3

* Взяты из оценок оригинальных работ.

Имеющиеся данные о плотности насыщенной жидкости хорошо согласуются между собой, максимальное отклонение не превышает общую погрешность в сравнимом диапазоне температур и давлений. Исключение составляют результаты [5], полученные на изотерме 343 К, которые выпадают из общего набора данных.

Экспериментальная информация о плотности R245fa в газовой фазе имеется в двух работах (табл. 1). Эти данные хорошо согласуются друг с другом в сравниваемом диапазоне параметров состояния. Nicola [8] и Sotani et al. [10] измерили плотность газа в сравнительно небольшом температурном диапазоне около 40 К. Плотности насыщенного пара [8] и [10] отличаются на 2 – 3 %, а данные по плотности пара на пограничной кривой REFPROP V. 7.1 [4] расположены выше данных [8] на 0,8 – 0,9 %.

Имеется одна теоретическая работа, в которой Schmidt et al. [9] представили скейлинговые уравнения для расчета плотности насыщенных жидкости и пара, которые получены на основе измерений рефракции.

Аппаратура и методика эксперимента

Подготовка образца

Образцы хладагента R245fa в количестве 20 кг приобретены в фирме Honeywell Fluorine Products Europe B.V. Поставщик указал чистоту вещества 99 %. Тем не менее содержание возможных примесей было проверено посредством хроматографического ана-

лиза двумя методами. Один из них основан на химическом разделении компонентов; другой использует разработанный нами метод определения примесей [2], которые трудно отделимы, но могут иметь разные точки кипения (например, изомеры R245cb или R245ca). Чувствительность аппаратуры составляет около 0,01 массового процента.

Чтобы устраниТЬ неконденсируемые газы, каждый образец проходил несколько циклов замораживания жидким азотом с последующей эвакуацией этих примесей. Результаты показали высокую чистоту вещества (не менее 99,9 %).

Аппаратура

Параметры равновесия жидкость – пар R245fa были исследованы с помощью пьезометра постоянного объема в варианте «адиабатического калориметра постоянного объема», который был успешно использован в ряде исследований [1, 3, 11, 12]. Пьезометр состоит из цилиндрического сосуда из нержавеющей стали с толщиной стенки 1 мм, окруженного двумя изотермическими защитными экранами, и установлен в вакуумной камере. В верхней части имеется клапан для наполнения пьезометра образцом хладагента, а также мембранный разделитель с индикатором «нуля», чувствительность которого составляет 0,005 кПа. Для компенсации давления на мембрану и передачи импульса давления в поршневой манометр или ртутный барометр высокой точности используется азот. Вдоль

оси пьезометра установлена гильза с платиновым термометром сопротивления. Электрические нагреватели в комплексе с дифференциальными термопарами, которые отслеживают перепад температур между изотермическими защитными экранами и пьезометром, расположены с наружной стороны пьезометра, экранов, мембранных разделителей и капилляра. Схема установки для измерения параметра фазового равновесия показана на рис. 1.

Автоматическая система поддерживает в пьезометре заданную температуру с точностью $\pm 5 \cdot 10^{-4}$ К. Вакуумная камера откачивается до давления $1,3 \cdot 10^{-7}$ кПа. Когда температурный диапазон измерений ниже комнатной температуры, вакуумная камера охлаждается жидким азотом. Объем пьезометра при комнатной температуре ($0,0729478 \text{ м}^3$) был определен с ошибкой 0,06 % калибровкой на дистилированной воде. Во время калибровки объема был также определен коэффициент изотермического расширения [$k = \Delta V / (V_p) = 3,26 \cdot 10^{-3} \text{ кПа}^{-1}$].

Отдельные серии измерений были выполнены на установке с пьезометром большего объема. Пьезометр оснащен системой отбора части исследуемого

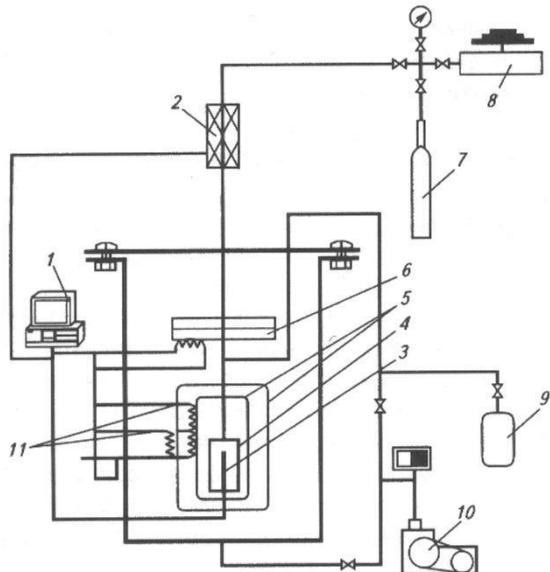


Рис. 1. Схема установки для измерения параметров фазового равновесия:

- 1 – контрольно-измерительная аппаратура;
- 2 – магнитный сердечник;
- 3 – гильза с платиновым термометром сопротивления;
- 4 – пьезометр;
- 5 – изотермические защитные экраны;
- 6 – мембранный разделитель;
- 7 – баллон с азотом;
- 8 – поршневой манометр (или высокоточный ртутный барометр для измерения низких давлений);
- 9 – промежуточный (дозирующий) вентиль с подготовленным образцом;
- 10 – вакуумный насос;
- 11 – омметрические нагреватели

вещества из паровой и жидкой фаз, что позволяет определять состав вещества или возможные примеси. Экспериментальная ячейка состоит из цилиндрического сосуда длиной около 0,5 м, установленного в термостате, температура которого регулируется с помощью электронной схемы и термометра сопротивления. Изменения температуры в пределах ячейки не превышают $\pm 0,01$ К в течение периода измерения на каждой изотерме. Давление измеряется кварцевым преобразователем давления, откалиброванным с помощью поршневого манометра, а температура – платиновым термометром сопротивления. Погрешности измерения давления и температуры составляют 0,1 % и 0,02 К соответственно.

Процедура PVT-измерений

PVT-измерения как в жидкой, так и газовой фазах проводились на квазизохорах (кривых постоянной загрузки). Образец исследуемого хладагента загружали из промежуточного сосуда в предварительно отвакуумированный пьезометр через вентиль и капилляр с калиброванным объемом. До и после загрузки (выгрузки) промежуточный сосуд взвешивали и массу образца в пьезометре определяли как разницу масс с ошибкой 0,5 мг. Затем пьезометр разогревали и измеряли температуру и давление. Переход на следующую квазизохору выполняли посредством удаления определенной части образца из пьезометра в промежуточный сосуд. Погрешность измерений плотности обычно была меньше 0,1 % с доверительной вероятностью 0,95. Температуру измеряли с погрешностью 0,02 К, а ошибка измерения давления составляла около 0,05 %.

Процедура VLE-измерений

При измерении $p - T$ -параметров кривой насыщения жидкость – пар масса образца R245fa, загруженного в пьезометр в основной серии, примерно соответствовала значению критической плотности и составила 39,6702 г. В критической области такое количество соответствовало плотности 537 г/м³. Это позволило измерить давление пара в температурном диапазоне от 242 К до критической точки в течение одной серии эксперимента.

Каждое отдельное измерение занимало около часа, что гарантировало установившийся режим и условия равновесия. Температурное приращение между измерениями составляло около 5 К в диапазоне от 240 К до 390 К, а затем при приближении к критической точке приращение уменьшалось примерно до 3 К.

При измерении плотности на линии насыщения температуру насыщения определяли в $p - T$ -диаграм-

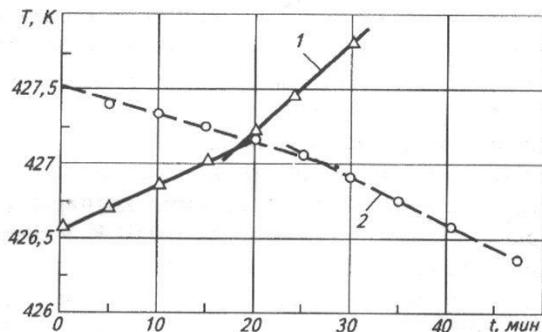


Рис. 2. Пример термограммы (зависимость температуры T от времени t) в окрестности критической точки:
1 – нагрев; 2 – охлаждение

рамме с точностью 0,1 К как точка пересечения двух экстраполированных отрезков квазизохор в однофазной и двухфазной областях. В окрестности критической точки производная $(\partial p / \partial T)_V$ при переходе из двухфазной области в однофазную меняется не так сильно. Поэтому температура фазового перехода в этой области параметров определялась методом квазистатических диаграмм [3], который основан на явлении скачкообразного изменения изохорной теплоемкости при фазовом переходе со стороны жидкости. Чтобы реализовать этот метод, пьезометр с образцом хладагента нагревался в адиабатических условиях с помощью нагревателя, расположенного в пьезометре. Скорость нагрева обычно составляла около 1 К/ч. В результате была получена зависимость изменения температуры (температурный ход) от времени (термограмма, рис. 2). Значение температуры фазового перехода соответствует точке пересечения экстраполированных отрезков термограмм в однофазной и двухфазной областях. Затем нагреватель пьезометра отключался, пьезометр медленно охлаждался, и термограммы снимали снова. Усредненное в этих двух режимах значение температуры фазового перехода, полученное с погрешностью 0,1 К, относилось к плотности на линии насыщения для данной изохоры.

Результаты измерений и сравнение данных

Параметры кривой насыщения жидкость – пар

С помощью пьезометра постоянного объема получено 61 значение давлений насыщенного пара R245fa в температурном диапазоне 242...427 К в одной специальной серии вдоль сверхкритической квазизохоры. Другой набор данных по давлению пара составил 36 экспериментальных точек, полученных для некоторых других квазизохор в условиях насыщения (табл. 2). В табл. 3 приведены дан-

ные, которые получены с использованием VLE- установки. Это независимая серия, которая состоит из 10 измерений, не дает какую-то новую дополнительную информацию по отношению к результатам основных серий, но подтверждает их точность.

Наши измерения величин давления насыщенных паров хорошо согласуются с данными, представленными Nicola [8] и Bobbo et al. [4]. Максимальное отклонение в сравниваемом температурном интервале не превышает 0,3 %. В области низких температур отклонение находится в пределах 0,13 кПа. В температурном диапазоне от 330 до 350 К, где наибольшее число измерений выполнил Nicola, отклонения достигают 1,9 кПа. Согласие наших данных с экспериментальными результатами, представленными Sotani et al. [10], менее очевидно. В низкотемпературной области данные отклоняются на величину до 4 кПа, что соответствует 2,5 % от измеренного давления. В высокотемпературном интервале отклонение достигает 17 кПа. В интервале температур до 340 К наши данные согласуются с корреляцией, использованной в REFPROP 7.1 [7], но с повышением температуры расхождение увеличивается, так что в критической области достигает 13 кПа.

Используя описанные выше метод квазистатических термограмм и метод аппроксимации в $p - T$ -диаграмме отрезков кривых опытных квазизохор, мы определили 32 значения плотности насыщенной жидкости и 27 значений плотности насыщенного пара (табл. 4). Наши экспериментальные данные согласуются с результатами, представленными в литературе, в температурном диапазоне, где существует экспериментальная информация о плотности R245fa в однофазных состояниях. Для других температур и, что особенно важно, для области вблизи критической точки наши данные являются единственной экспериментальной информацией о плотности насыщенных фаз. Тем не менее наши измерения в области критической точки хорошо согласуются (среднеквадратичное отклонение 0,2 % для насыщенной жидкости и 3 % для насыщенного пара) с расчетами, выполненными в рамках масштабной теории [9]. При температурах до 410 К имеется удовлетворительное совпадение с моделью, использованной в REFPROP 7.1 [7].

Корреляция и анализ данных

Наше исследование плотностей насыщения в окрестности критической точки позволяет определить параметры этой точки. Критическая температура выбрана как максимальное значение, которое достигнуто в наших опытах, использующих метод

Таблица 2

Экспериментальные значения давления насыщенных паров (метод пьезометра постоянного объема)

Температура T, К (I)	241,826	247,923	250,316	250,361	251,656	251,898	257,261	258,715	261,823	262,003
Давление насыщенных паров p _s , кПа (II)	9,0502	14,030	16,426	16,545	17,597	18,117	23,891	25,974	30,111	30,396
Температура T, К (I)	264,344	270,504	276,364	277,230	279,360	284,179	284,535	285,946	291,375	295,943
Давление насыщенных паров p _s , кПа (II)	34,619	46,766	61,386	63,466	69,683	85,622	86,998	91,945	114,46	137,63
Температура T, К (I)	297,109	299,619	300,450	301,650	303,568	304,533	305,046	306,988	308,245	309,997
Давление насыщенных паров p _s , кПа (II)	142,66	157,86	160,70	168,55	181,11	187,85	190,92	202,78	212,89	224,86
Температура T, К (I)	310,659	314,607	316,308	320,399	321,876	326,884	328,464	333,450	338,968	341,757
Давление насыщенных паров p _s , кПа (II)	230,84	261,56	277,69	314,50	331,34	385,55	403,49	466,52	544,23	585,80
Температура T, К (I)	345,808	352,760	357,924	364,828	367,908	371,188	374,175	375,553	377,338	380,023
Давление насыщенных паров p _s , кПа (II)	653,69	780,66	886,57	1044,6	1121,6	1208,2	1291,2	1329,5	1383,7	1468,2
Температура T, К (I)	380,362	380,790	381,349	382,194	384,166	385,589	387,09	387,32	390,034	393,485
Давление насыщенных паров p _s , кПа (II)	1477,8	1490,4	1509,1	1536,9	1600,4	1650,3	1701,3	1708,7	1806,6	1938,4
Температура T, К (I)	393,507	394,604	394,615	396,911	400,45	401,412	403,318	406,063	406,361	406,474
Давление насыщенных паров p _s , кПа (II)	1937,9	1983,1	1982,1	2073,7	2222,2	2265,2	2348,2	2476,1	2486,9	2493,9
Температура T, К (I)	408,836	409,581	410,645	411,441	412,549	413,675	414,264	416,128	416,577	418,646
Давление насыщенных паров p _s , кПа (II)	2606,0	2643,6	2695,7	2737,4	2794,1	2852	2883,1	2984,8	3009,9	3123,6
Температура T, К (I)	419,461	419,685	420,334	421,189	421,705	421,894	422,789	423,599	423,889	423,948
Давление насыщенных паров p _s , кПа (II)	3171,5	3184,1	3223,1	3271,8	3301,6	3314,2	3369,9	3419,4	3435,3	3439,7
Температура T, К (I)	424,403	424,463	424,641	424,886	425,477	426,096	427,101	—	—	—
Давление насыщенных паров p _s , кПа (II)	3467,4	3473,3	3484,8	3498,8	3538,6	3576,3	3643,7	—	—	—

термограмм вдоль окологранических квазизохор. Это значение равно 427,158 К (ITS-90) с погрешностью 0,02 К, которая в основном определяется точностью измерения температуры платиновым термометром сопротивления.

Критическая плотность ρ_k определена путем наилучшего подбора параметров масштабного уравнения [3]:

$$Z = \frac{\rho'^{(n)} - \rho_k}{\rho_k(1-T_r)^{0,34}} \operatorname{sgn}(\rho'^{(n)} - \rho_k) \approx B_0 + B_1'^{(n)}(1-T_r)^{0,5} + \dots, \quad (3)$$

Таблица 3

Экспериментальные значения давления насыщенных паров (VLE-установка)

Температура T, К (I)	293,11	293,25	298,06	303,24	313,12	323,04	333,22	343,56	353,40	354,04
Давление насыщенных паров p _s , кПа (II)	123,43	123,05	147,85	178,08	250,37	343,40	463,26	618,95	794,79	803,55

Таблица 4
Экспериментальные значения плотности насыщенной
жидкости (ρ') и пара (ρ'')

T, K	ρ' , кг/м ³	T, K	ρ' , кг/м ³	T, K	ρ'' , кг/м ³	T, K	ρ'' , кг/м ³
255,998	1445,5	255,998	1445,2	266,593	2,6070	427,149	490,37
263,500	1427,3	263,500	1427,3	293,601	7,2240	266,593	2,5650
277,251	1390,3	263,500	1427,3	305,138	10,806	305,138	11,071
286,471	1367,6	277,251	1390,3	323,261	19,286	323,261	19,432
314,911	1290,4	277,251	1392,5	329,203	23,702	329,203	23,125
353,176	1170,6	286,471	1367,6	337,136	29,244	337,136	28,972
371,352	1101,6	286,471	1368,0	346,230	37,199	346,230	37,180
394,518	991,79	314,911	1290,4	359,254	52,794	359,254	52,294
402,760	936,28	314,911	1289,3	382,404	92,699	362,810	57,213
413,026	859,87	353,176	1170,6	386,805	100,50	382,404	92,058
420,388	777,71	353,176	1171,3	409,417	181,19	386,805	102,20
425,363	686,08	371,352	1101,6	419,712	262,26	—	—
426,880	597,90	371,352	1099,8	423,197	309,38	—	—
427,076	576,19	427,155	536,06	426,409	402,18	—	—
427,151	539,31	427,157	528,06	427,046	456,14	—	—
427,153	539,27	427,158	520,42	427,116	470,99	—	—

которое может быть получено из известного степенного разложения:

$$\left| \frac{\rho'^{(n)} - \rho_k}{\rho_k} \right| = B_0(1-T_r)^\beta + B_1(1-T_r)^{1-\alpha} + B_2(1-T_r)^{\beta+\Delta} + \dots, \quad (4)$$

где $T_r = T/T_k$ — приведенная температура;

B_0 — критическая амплитуда;

B_1, B_2 , и т.д. — другие амплитуды масштабного уравнения, $\beta = 0,34$, $\alpha = 0,12$ и $\Delta = 0,49$.

Функция $Z = f(1-T)^{0.5}$, построенная на базе наших измерений плотностей насыщения (рис. 3), имеет две ветви, соответствующие насыщенной фазе, которые должны пересекаться друг с другом при $Z = B_0$ в точке $(1-T)^{0.5} = 0$. Если критическая плотность определена неправильно, жидкостная и паровая ветви Z -функции не пересекаются в этой точке (см. рис. 3, б и в). Наилучшим образом подобранное значение критической плотности составляет $\rho_k = 516,68 \text{ кг/м}^3$ с оценкой погрешностью $0,5 \text{ кг/м}^3$.

В температурном диапазоне от 240 К до критической точки результаты настоящего исследования по давлению насыщенных паров p_s , а также данные, представленные Nicola [8] и Bobbo et al. [4], аппроксимированы выражением типа уравнения Вагнера:

$$\ln \frac{P_s}{\rho_k} = \frac{1}{T_r} \sum_{i=1}^i A_i (1-T_r)^{a_i}, \quad (5)$$

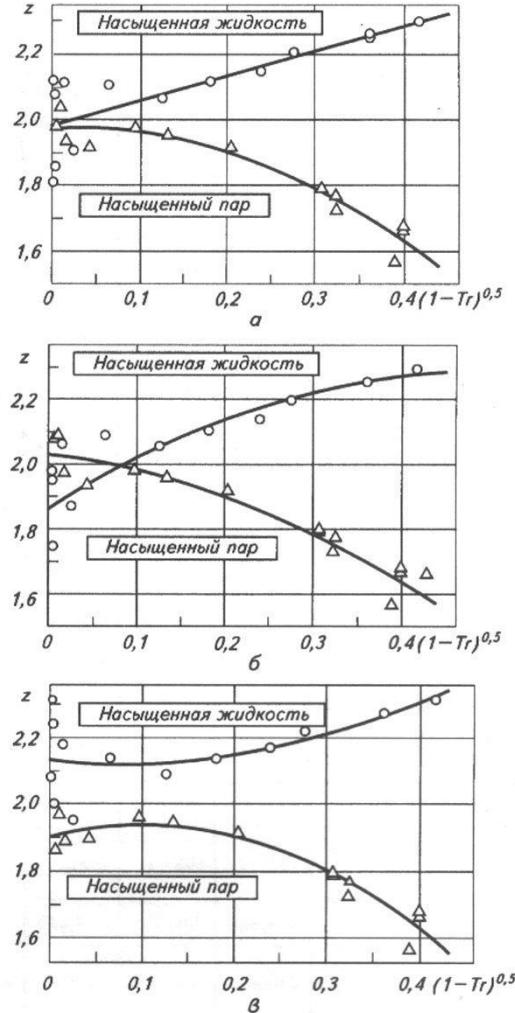


Рис. 3 Масштабная функция $Z = f(1-T)^{0.5}$,
построенная на основе измерений:
а — $\rho_k = 516,68 \text{ кг/м}^3$; б — $\rho_k = 518 \text{ кг/м}^3$;
в — $\rho_k = 515 \text{ кг/м}^3$

где a_i и A_i — параметры регрессии (табл. 5).

Критическое давление ρ_k было также получено как параметр регрессии и по оценкам составляет 3647 кПа с погрешностью 0,05 %. Стандартное отклонение всех данных, включенных в это обобщение, составляет 0,67 кПа. На рис. 4 показаны отклонения имеющихся p_s от уравнения (5).

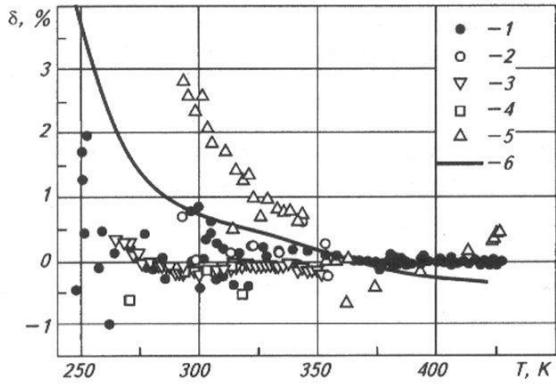
В температурном диапазоне от 250 К до критической точки результаты нашего исследования плотности жидкости и пара в насыщенном состоянии аппроксимированы следующими выражениями:

$$\frac{\rho' - \rho_k}{\rho_k} = B_0(1-T_r)^{0.34} + \sum_{i=1}^5 B_i'(1-T_r)^{b_i'}; \quad (6)$$

Таблица 5

Параметры регрессии уравнения (5)

i	1	2	3	4	5	6	7
a _i	1	1,5	2,5	3	4	5	6
A _i	-7,87353351	1,96083166	0,20906769	-14,9888978	47,51861087	-82,92485701	43,09954343

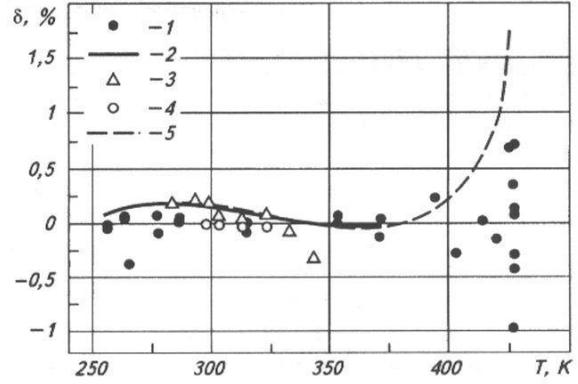
Рис. 4. Отклонения δ величин давления насыщения p_s от уравнения (5):

1 – наше исследование; 2 – наше исследование на VLE-установке; 3 – Nicola [8]; 4 – Bobbo et al. [4]; 5 – Sotani et al. [10]; 6 – REFPROP 7.1 [7]

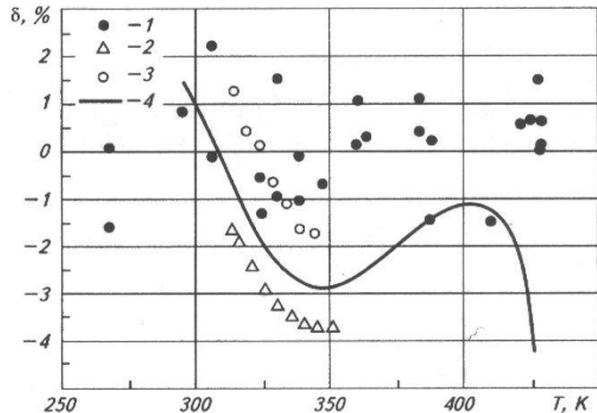
$$\frac{\rho'' - \rho_k}{\rho_k} = -B_0(1-T_r)^{0,34} + \sum_{i=1}^5 B_i''(1-T_r)^{b_i''}, \quad (7)$$

где B_0 – критическая амплитуда;
 b'_i , b''_i , B'_i и B''_i – другие параметры регрессии (табл. 6).

Стандартное отклонение данных по плотности, включенных в обобщение, составляет 0,27 % для плотности насыщенной жидкости и 0,99 % для плотности насыщенного пара. На рис. 5 и 6 пока-

Рис. 5. Отклонения δ плотности насыщенной жидкости ρ_s от полинома (6):

1 – наше исследование; 2 – Defibaugh [6]; 3 – Bobbo [4]; 4 – Sotani [10]; 5 – REFPROP 7.1 [7]

Рис. 6. Отклонения δ плотности насыщенного пара ρ'' от полинома (7):

1 – наше исследование; 2 – Nicola [8]; 3 – Sotani [10]; 4 – REFPROP 7.1 [7]

заны отклонения имеющихся данных по насыщенным плотностям от уравнений (6) и (7).

Данная работа выполнена в рамках проекта № 1256-RP корпорации «Американское общество инженеров теплоснабжения, холодильных устройств и кондиционирования воздуха» (ASHRAE), и проекта № 05K-001 Белорусского республиканского фонда фундаментальных исследований.

Таблица 6
Параметры регрессии уравнений (6) и (7)

i	b'_i	B'_i	b''_i	B''_i
0	0,34	2,041145	0,34	2,041145
1	1	-0,24512768	1	1,09378121
2	1,5	8,99699246	2	1,57779004
3	2	-25,45105251	3	-7,55413064
4	2,5	28,16685893	4	18,26381319
5	3	-10,21987307	5	-17,18161668

Список литературы

1. Вержинская А. Б., Гребеньков А. Ж., Цурбелеев В. П. Исследование термодинамических свойств диоксида азота в широкой области критического состояния // Термофизические свойства веществ и материалов, 1989. №. 27. – М.: ГССД.
2. Тимофеев Б. Д., Беляева О. В., Нехайчик Н. А., Николаев В. А. Газохроматографический анализ азотсодержащей газовой смеси // Заводская лаборатория. 1981. Т. 47, № 7.
3. Цурбелеев В. П., Гребеньков А. Ж. Параметры фазового равновесия тетраоксида азота и их асимптотическое поведение в критической области: II. Плотность // Известия Академии наук Беларуси. Сер. физ.- энерг. наук. 1985, №. 1.
4. Bobbo S., Fedele L., Scattolini M., Camporese R. Isothermal VLE measurements for the binary mixtures HFC-134a + HFC-245fa and HC-600a + HFC-245fa// Fluid Phase Equilibria . 2001. V.185.
5. Bobbo S., Fedele L., Scattolini M. Camporese R. Compressed Liquid Densities and Saturated Liquid Densities OF HFC-245fa International congress of refrigeration 2003. Washington. DC (ICR402).
6. Defibaugh D. R., and Michael R. Moldover. Compressed and Saturated Liquid Densities for 18 Halogenated Organic Compounds.//Journal of Chemical and Engineering Data. 1997. Vol. 42, N 1.
7. McLinden. M. O., Huber M. L., Lemmon. E. W., and 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).
8. Nicola G. D. Vapor Pressure and Gas Phase P-V-T Data for 1.1.1.3.3-pentafluoropropane (R245fa)//Journal of Chemical and Engineering Data. 2001. Vol. 46, N 6.
9. Schmidt J. W., Carrio-Nava E., Moldover M. R. Partially halogenated hydrocarbons CHFCL-CF₃, CF₃-CH₃, CF₃-CHF-CHF₂, CF₃-CH₂ – CF₃, CHF₂-CH₂-CHF₂, CF₃-CH₂ – CHF₂; CF₃-O-CHF₂: critical temperature, refractive indices, surface tension and estimates of liquid, vapor, and critical densities //Fluid Phase Equilibria. 1996. V. 122.
10. Sotani T., Kubota H. Vapor pressures and PVT properties of 1.1.1.3.3-pentafluoropropane HFC-245fa// Fluid Phase Equilibria. 1999. V. 161.
11. Tsurbelev V.P., Grebenkov A.J., and Klepatsky P.M. 1998. Volumetric Behavior of Refrigerant Mixture R32/R125 // Proc. of the Fifth Asian Thermophysical Properties Conference, vol. 2, M.S. Kim and S.T. Ro, ed., Seoul National University, Seoul, Korea.
12. Tsurbelev V.P., Grebenkov A.J., and Klepatsky P.M. 2000. P-V-T and phase equilibrium data of a R32-R125 refrigerant mixture // Proc. of the 14th Symposium on Thermophysical Properties, Boulder, Colorado, USA, June 25-30, 2000. University of Colorado at Boulder. Collection of Preprints.