

9. Гальперин Н. И., Айнштейн В. Г., Зайковский А. В. О механизме теплообмена между поверхностью и неоднородным псевдооживленным слоем зернистых материалов. Хим. пром.-сть, 1966, № 6.
10. Мясников В. П. О динамических уравнениях движения двухкомпонентных систем. ПМТФ, 1967, № 2.
11. Мясников В. П. О процессах тепло-массообмена в псевдооживленном слое. Тр. III Всес. совещания по тепло-массообмену. Минск, 1968, т. 9.
12. Мясников В. П. Кинетическая модель процессов теплопереноса в кипящем слое. МЖГ, 1967, № 4.
13. Сыромятников Н. И., Васанова Л. К., Шиманский Ю. Н. Тепло и массообмен в кипящем слое. М., «Химия», 1967.
14. Васанова Л. К. О высоте активной зоны в кипящем слое. Цветн. металлы, 1965, № 2.
15. Мясников В. П. О распределении взвешенных частиц в кипящем слое. ПМТФ, 1968, № 3.
16. Горошков В. Д., Розенбаум Б. Р., Тодес О. М. Приближенные закономерности гидравлики взвешенного слоя и стесненного падения. Изв. вузов, Нефть и газ, 1958, № 1.
17. Wicke E., Fetting F. Wärmeübertragung in Gaswirbelschichten. Chem. — Ing. Techn., 1954, В. 26, № 6, pp. 301—309.
18. Mickleу H. S., Trilling Ch. A. Heat transfer characteristics of fluidized beds. Industr. Engng. Chem., 1949, vol. 41, pp. 1135—1147.

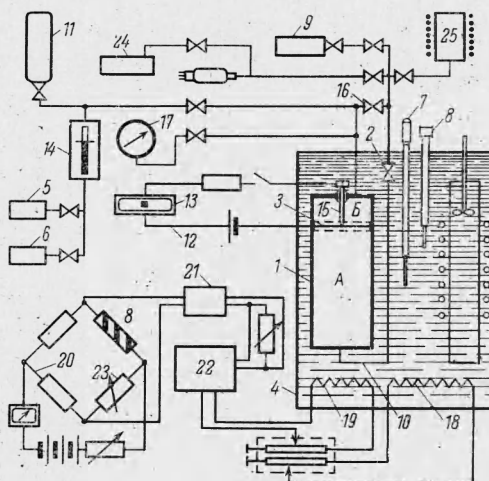
ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ $P-v-T$ ЗАВИСИМОСТИ ПАРОВ ФРЕОНА-21

А. Н. Соловьев, Е. П. Шелудяков, А. А. Шиляков
(Новосибирск)

Фреон-21 является весьма перспективным рабочим телом для водо-фреоновых энергетических установок. Однако необходимые для термодинамических расчетов данные по $P-v-T$ зависимости немногочисленны и охватывают, в основном, интервал небольших давлений (до 6 бар) [1].

Проведены систематические исследования $P-v-T$ зависимости паров фреона-21 в интервале температур от 293 до 473°К и давлений от 1.5 до 68.5 бар методом безбалластного пьезометра постоянного объема.

Схема экспериментальной установки представлена на фиг. 1. Пьезометр 1 объемом $420.44 \pm 0.07 \text{ см}^3$ при 293°К (с учетом объема заполнительной трубки 10 до горячего вентиля 2) выполнен из нержавеющей стали 1X18Н9Т. Толщина стенки $\sim 25 \text{ мм}$ обеспечивает изменение объема при максимальном давлении (100 бар) не более 0.005%. В верхней части пьезометра размещен мембранный нуль-индикатор давления 3 электроконтактного типа. Плоская мембрана из нержавеющей стали 1X18Н9Т толщиной $\delta = 0.1 \text{ мм}$ и диаметром $d = 50 \text{ мм}$ помещена между двумя перфорированными толстыми дисками. Верхний диск плоский, нижний имеет профиль прогиба мембраны в пределах упругих деформаций с максимальной стрелой прогиба $\sim 0.4 \text{ мм}$. В центре мембраны и на конце контактного стержня 15 напаяны серебряные контакты. Контакты были тщательно отполированы; это обеспечило надежную фиксацию момента замыкания и размыкания электрической цепи 12. Ток в цепи контактного датчика не превышал $1 \mu\text{ А}$. В качестве показывающего прибора использован микроамперметр 13 типа М-136. Ком-



Фиг. 1

Таблица 1

Удельные объемы v [$\text{м}^3/\text{кг}$] фреона-21 в зависимости от температуры T [$^{\circ}\text{K}$] и давления P [бар]

T	P	$v \cdot 10^3$	T	P	$v \cdot 10^3$	T	P	$v \cdot 10^3$
309.15	2.361	99.25	391.01	5.704	51.81	381.30	13.157	19.21
311.20	2.389	99.26	406.90	6.000	51.85	384.15	13.310	19.21
315.84	2.426	99.28	421.33	6.237	51.89	388.11	13.521	19.21
322.09	2.492	99.31	438.83	6.522	51.94	393.53	13.807	19.22
327.92	2.533	99.34	455.88	6.799	51.98	398.39	14.058	19.22
332.70	2.586	99.36	470.22	7.032	52.02	402.96	14.293	19.23
337.63	2.615	99.39	343.67	6.301	38.91	410.40	14.669	19.24
348.10	2.705	99.44	346.21	6.365	38.92	418.79	15.090	19.24
359.89	2.806	99.50	350.50	6.472	38.93	427.98	15.544	19.25
372.79	2.914	99.57	354.25	6.563	38.94	438.94	16.079	19.27
384.49	3.021	99.62	358.01	6.653	38.94	449.45	16.587	19.28
398.84	3.134	99.70	362.25	6.752	38.95	459.26	17.059	19.29
410.52	3.231	99.76	366.52	6.853	38.96	470.30	17.586	19.30
423.44	3.338	99.82	377.24	7.101	38.98	380.60	14.445	16.77
438.52	3.463	99.90	387.95	7.347	39.00	382.28	14.579	16.77
454.12	3.590	99.99	399.93	7.620	39.03	385.47	14.806	16.77
469.91	3.721	100.07	412.19	7.897	39.05	389.21	15.048	16.78
318.82	3.116	76.82	423.74	8.153	39.07	393.27	15.311	16.78
320.83	3.145	76.83	438.91	8.490	39.10	398.39	15.611	16.79
322.82	3.171	76.84	454.82	8.839	39.14	402.55	15.867	16.79
328.16	3.242	76.86	471.96	9.212	39.17	408.87	16.251	16.80
333.01	3.293	76.87	353.70	7.675	32.34	415.67	16.650	16.80
343.07	3.410	76.91	355.39	7.725	32.34	424.15	17.143	16.81
353.62	3.529	76.95	357.68	7.795	32.34	433.58	17.687	16.82
367.68	3.638	77.01	360.19	7.867	32.35	446.29	18.410	16.83
382.87	3.856	77.07	362.90	7.945	32.35	459.54	19.155	16.85
398.70	4.031	77.13	366.40	8.047	32.36	470.68	19.776	16.85
406.63	4.117	77.16	372.80	8.230	32.37	387.56	16.865	14.32
415.83	4.218	77.20	378.17	8.404	32.38	390.90	17.118	14.32
423.85	4.307	77.23	382.81	8.515	32.38	393.08	17.282	14.32
433.65	4.412	77.27	387.23	8.661	32.39	396.85	17.567	14.33
445.31	4.537	77.32	396.94	8.922	32.41	401.21	17.888	14.33
457.29	4.665	77.37	405.84	9.183	32.42	408.30	18.405	14.33
469.31	4.795	77.42	415.36	9.422	32.44	413.98	18.814	14.34
322.73	3.604	66.61	424.02	9.659	32.45	421.43	19.342	14.34
326.25	3.659	66.62	439.24	10.059	32.48	428.94	19.866	14.35
331.88	3.739	66.64	454.41	10.475	32.50	439.20	20.583	14.36
338.13	3.822	66.66	470.11	10.893	32.53	449.73	21.297	14.37
348.45	3.957	66.70	358.64	9.034	27.24	459.35	21.947	14.37
360.43	4.118	66.74	360.53	9.117	27.24	469.67	22.636	14.38
372.76	4.278	66.78	362.77	9.208	27.25	394.74	19.308	12.36
388.06	4.475	66.83	364.51	9.278	27.25	398.57	19.669	12.36
403.78	4.676	66.89	367.24	9.374	27.25	401.40	19.920	12.36
418.29	4.858	66.93	372.71	9.576	27.26	408.29	20.525	12.37
423.85	4.930	66.95	376.18	9.701	27.26	415.50	21.148	12.37
434.54	5.062	66.99	381.00	9.865	27.27	423.61	21.844	12.38
450.38	5.257	67.05	385.91	10.036	27.28	433.32	22.643	12.38
469.95	5.503	67.12	390.37	10.203	27.28	443.68	23.494	12.39
326.66	4.119	58.22	395.84	10.377	27.29	453.51	24.291	12.40
328.07	4.148	58.23	402.84	10.619	27.30	462.81	25.037	12.40
330.09	4.184	58.23	412.92	10.958	27.31	470.93	25.687	12.41
333.50	4.251	58.24	424.04	11.327	27.33	403.05	22.527	10.38
338.31	4.318	58.26	439.02	11.821	27.35	405.87	22.841	10.38
344.16	4.410	58.27	454.27	12.319	27.37	408.28	23.103	10.38
353.69	4.546	58.30	469.61	12.814	27.40	413.41	23.655	10.39
363.14	4.700	58.33	366.29	10.780	22.85	419.69	24.326	10.39
373.65	4.858	58.36	368.39	10.887	22.85	426.57	25.050	10.39
386.20	5.035	58.40	370.06	10.967	22.85	434.05	25.822	10.40
398.96	5.230	58.44	372.93	11.102	22.86	443.86	26.817	10.40
413.90	5.447	58.48	375.14	11.197	22.86	454.22	27.854	10.41
423.72	5.590	58.51	378.04	11.325	22.86	463.57	28.779	10.41
434.77	5.749	58.55	382.47	11.517	22.87	471.27	29.536	10.42
450.13	5.965	58.59	386.41	11.686	22.87	408.89	25.140	9.086
463.69	6.162	58.64	391.00	11.881	22.88	413.40	25.735	9.088
471.21	6.268	58.66	396.11	12.098	22.88	417.44	26.246	9.090
329.19	4.594	51.65	401.75	12.332	22.89	422.58	26.891	9.092
331.85	4.698	51.65	408.03	12.592	22.90	428.24	27.598	9.095
333.50	4.727	51.66	418.33	13.017	22.91	435.75	28.513	9.098
335.62	4.775	51.66	432.00	13.569	22.92	443.80	29.484	9.103
339.27	4.838	51.67	439.95	13.887	22.93	452.48	30.506	9.107
343.65	4.927	51.68	454.01	14.447	22.95	461.70	31.585	9.111
350.26	5.035	51.70	470.03	15.078	22.97	471.04	32.662	9.116
356.89	5.153	51.72	375.22	12.809	19.20	418.48	29.339	7.573
366.39	5.315	51.74	377.59	12.950	19.20	420.81	29.717	7.574
377.43	5.504	51.77	379.08	13.034	19.21	425.91	30.536	7.576

Таблица 1 (продолжение)

T	P	v·10 ³	T	P	v·10 ³	T	P	v·10 ³
432.66	31.573	7.578	442.64	42.061	4.756	451.00	51.128	2.645
438.29	32.446	7.531	448.55	43.676	4.757	454.89	53.411	2.646
443.78	33.575	7.584	455.40	45.551	4.759	456.48	54.320	2.646
453.04	34.655	7.587	463.53	47.726	4.761	460.63	56.696	2.647
461.25	35.860	7.591	471.01	49.719	4.763	465.32	59.325	2.647
471.67	37.369	7.595	442.55	44.304	4.034	471.17	62.535	2.648
425.95	33.540	6.321	445.83	45.449	4.035	451.44	51.675	2.478
428.23	33.998	6.322	447.90	46.164	4.035	454.35	53.468	2.479
432.83	34.913	6.323	452.74	47.839	4.036	456.64	54.923	2.479
440.40	36.385	6.326	458.87	49.880	4.037	458.39	56.060	2.479
446.75	37.594	6.328	465.22	51.971	4.039	461.85	58.190	2.480
455.34	39.206	6.331	471.02	53.872	4.040	466.53	61.043	2.480
463.47	40.705	6.333	445.30	46.383	3.619	471.77	64.207	2.481
471.02	42.081	6.336	447.87	47.425	3.620	452.03	52.280	2.027
430.27	36.445	5.556	451.97	49.043	3.621	454.32	54.082	2.028
433.15	37.125	5.557	458.79	51.708	3.622	456.65	55.895	2.028
438.41	38.371	5.559	464.63	53.927	3.623	460.67	59.044	2.028
443.48	39.512	5.560	471.04	56.323	3.624	465.34	62.694	2.029
448.96	40.743	5.562	448.23	48.601	3.235	470.57	66.791	2.029
456.50	42.417	5.563	451.82	50.286	3.235	454.32	54.126	1.850
462.90	43.806	5.565	456.86	52.574	3.236	458.51	57.714	1.850
471.06	45.566	5.568	461.67	54.689	3.237	463.60	61.986	1.851
436.55	40.314	4.754	466.76	56.917	3.238	471.16	68.527	1.851
438.26	40.798	4.755	472.35	59.425	3.239			

пенсирующее давление создавалось азотом, подаваемым из баллона 11, и замерялось поршневыми манометрами МП-60 класса точности 0.02 и МП-600 класса точности 0.05. Поршневые манометры 5 и 6 присоединены к азотной магистрали через масляный разделитель 14. Манометр МП-60 тарирован в Новосибирском Государственном институте мер и измерительных приборов. При настройке нулевого положения мембранного нуля-индикатора давления открывались вентили 16 и 2 и пьезометр заполнялся азотом. После выравнивания давлений в полостях А и В подводился регулируемый контактный стержень до касания контакта мембраны. Отклонение светового зайчика микроамперметра от нулевого положения фиксировало касание контактов.

Таблица 2

Удельные объемы V_s'' [м³/кг] и давление P_s [бар] в зависимости от температуры T [°K] на линии насыщения фреона-21

T	P _s	v _s ''·10 ³	T	P _s	v _s ''·10 ³	T	P _s	v _s ''·10 ³
293.74	1.564	—	347.19	7.467	32.33	413.97	28.634	7.571
298.26	1.841	—	354.42	8.862	27.23	422.09	32.763	6.319
305.28	2.327	99.23	362.36	10.602	22.84	427.55	35.805	5.555
313.87	3.045	76.80	370.34	12.542	19.20	433.84	39.535	4.754
319.00	3.547	66.60	376.30	14.238	16.77	439.75	43.307	4.033
323.92	4.072	58.20	384.15	16.614	14.32	442.68	45.267	3.618
328.53	4.634	51.64	391.04	18.977	12.35	445.64	47.364	3.234
332.88	5.203	—	399.27	22.104	10.37	449.17	50.051	—
339.58	6.194	38.90	405.50	24.682	9.084			

Чувствительность мембранного нуля-индикатора составила 1 мм вод. ст. Дрейф «нуля» не превышал 10 мм вод. ст. в интервале исследуемых температур и давлений. Нулевое положение проверялось после снятия каждой квазиизохоры и изменение этого положения не превышало 10 мм вод. ст. При расчете давления вводилась поправка на высоту масла в разделителе и на барометрическое давление, которое определялось при помощи барометра типа МД-49 А с погрешностью не более 1 мм рт. ст.

Пьезометр с дополнительной трубкой и горячим вентилем помещен в жидкостный термостат 4 объемом 24 л, снабженный платиновым термометром сопротивления 8,

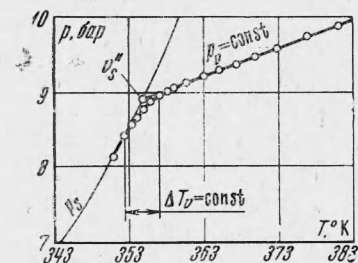
основным 18 и регулируемым 19 нагревателями. В качестве термостатирующей жидкости взята этилполисилоксановая жидкость марки Ж-5.

Регулирование температуры осуществлялось схемой, в которую входит платиновый термометр сопротивления, включенный в плечо уравновешенного моста 20, фотокомпенсационный усилитель 21 (Ф116/2) и самопишущий потенциометр 22 (ПСР1—01).

Регулируемым сопротивлением 23 (Р33) мост настраивался на температурный режим. Схема обеспечивала длительное термостатирование в пределах 0.02°K .

Температура в термостате измерялась изготовленным во ВНИИФТРИ десятиомным образцовым платиновым термометром сопротивления 7 в комплекте с потенциометром ПМС-48 и образцовой катушкой Р-321 на 10 ом.

Заполнение исследуемым веществом производилось в предварительно вакуумированный насосом 24 (ВН-2МГ) до давления 10^{-2} мм рт. ст. пьезометр при помощи термокомпрессора 25. Температура и давление измерялись в стационарных режимах как при прямом, так и при обратном ходе температуры.



Фиг. 2

Количество вещества в пьезометре определялось взвешиванием съемного баллончика 9, в который перегонялось вещество по окончании опыта. Перегонка осуществлялась в предварительно вакуумированный и охлажденный до температуры жидкого азота баллончик. Взвешивание производилось на аналитических весах ВЛА — 200 М. Остаточное давление в пьезометре после вымораживания определялось образцовым вакууметром 17 и обычно не превышало 0.01 бар. При расчете удельного объема фреона учитывались поправки на термическое расширение пьезометра [2] и на остаточное количество фреона в пьезометре после вымораживания (по уравнению для идеального газа).

Установка дважды проверялась в опытах на воде. Полученные результаты совпали с табличными данными [3] в области насыщения с точностью до 0.1% по давлению, в области перегретого пара — до 0.2% по удельным объемам.

Чистота исследуемого фреона-21 определялась хроматографическим методом. Количество примесей составило 0.194% массовой концентрации (0.19% воды и 0.004% нелетучего остатка). В табл. 1 даны результаты экспериментального исследования P-v-T зависимости паров фреона-21. Для проверки воспроизводимости результатов эксперимента, а также термической стойкости исследуемого фреона при повышенных температурах большинство квазиизохор снималось при прямом и обратном ходе.

На всех 26 изохорах разброс точек по давлению не превышал 0.15%. Для измерения параметров кривой насыщения проведено четыре серии опытов, одна из которых с прямым и обратным ходом, при различных заполнениях.

Максимальный разброс экспериментальных точек по давлению на кривой насыщения составил 0.4%. В табл. 2 представлены параметры насыщенных паров фреона-21, полученные в результате графического осреднения экспериментальных данных четырех серий. Как и в работе [4], при подходе к линии насыщения со стороны перегретого пара наблюдалось занижение давления, как это показано на фиг. 2, где P_s — кривая насыщения, P_v=const — квазиизохора. Интервал температур, в котором наблюдалось это явление, составлял обычно 1—3.5° C.

Это явление отмечено как в опытах с фреоном, так и в опытах с водой, и наиболее вероятная причина его заключается в адсорбции паров на стенках пьезометра.

Указанные в таблице значения удельных объемов (v_s'') на кривой насыщения получены экстраполяцией.

Результаты работы совпадают с данными [1] в области перегретого пара по удельным объемам с точностью 0.4% и по давлению 0.5%.

На кривой насыщения расхождения достигают 0.4 ÷ 0.6% по давлению и 1.5 ÷ 2.5% по удельным объемам. Это расхождение можно было бы объяснить различием в чистоте фреона, но, к сожалению, в работе [1] нет указаний на степень чистоты.

Поступила 3 VI 1968

ЛИТЕРАТУРА

1. Fundamentals and Equipment, N. J., 1965, and 1966.
2. В у к а л о в и ч М. П., А л т у н и н В. В. Теплофизические свойства двуокиси углерода. М., Атомиздат, 1965.
3. В у к а л о в и ч М. П. Таблицы термодинамических свойств воды и водяного пара, М., Госэнергоиздат, 1963.
4. Н о в и к о в И. И., Р о щ у п к и н В. В. Экспериментальное определение P-v-T зависимости паров цезия. Измерит. техника, 1967, № 10.