

МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ И НАУКИ РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ
УНИВЕРСИТЕТ ИТМО

А.А. Дзино, А.А. Малышев, О.С. Малинина

**ИСПЫТАНИЕ
ПАРОКОМПРЕССОРНОГО
ТЕПЛОВОГО НАСОСА**

Учебно-методическое пособие

 **УНИВЕРСИТЕТ ИТМО**

Санкт-Петербург
2015

УДК 621.575

Дзино А.А., Малышев А.А., Малинина О.С. Испытание пароконпрессорного теплового насоса: Учеб.-метод. пособие. – СПб.: Университет ИТМО; ИХиБТ, 2015. – 33 с.

Приведены методические указания к лабораторной работе по испытанию пароконпрессорного теплового насоса и методика обработки результатов эксперимента для студентов направления 16.04.03 Холодильная, криогенная техника и системы жизнеобеспечения.

Рецензент: доктор техн. наук, проф. В.А. Пронин

**Рекомендовано к печати редакционно-издательским советом
Института холода и биотехнологий**



Университет ИТМО – ведущий вуз России в области информационных и фотонных технологий, один из немногих российских вузов, получивших в 2009 году статус национального исследовательского университета. С 2013 года Университет ИТМО – участник программы повышения конкурентоспособности российских университетов среди ведущих мировых научно-образовательных центров, известной как проект «5 – 100». Цель Университета ИТМО – становление исследовательского университета мирового уровня, предпринимательского по типу, ориентированного на интернационализацию всех направлений деятельности.

© Санкт-Петербургский национальный исследовательский университет информационных технологий, механики и оптики, 2015

© Дзино А.А., Малышев А.А., Малинина О.С., 2015

ВВЕДЕНИЕ

Парокомпрессорный тепловой насос (ПКТН) предназначен для переноса низкотемпературной теплоты на более высокий температурный уровень с помощью компрессора. Энергетическая эффективность любого теплового насоса зависит от температур внешних источников [1].

Исследование ПКТН типа «вода – вода» осуществляется на экспериментальном стенде (рис. 1). Для иллюстрации эффективности работы теплового насоса в схему включен воздухонагреватель.

На данном стенде возможно осуществить режимы ПКТН в широком диапазоне температур кипения, конденсации и тепловых нагрузок испарителя и конденсатора.

1. Цель проведения испытаний

Целью испытаний является определение:

- теплопроизводительности теплового насоса Q_k ;
- эффективной мощности компрессора N_e ;
- коэффициента преобразования;
- коэффициентов теплопередачи и плотности теплового потока конденсатора.

На основании расчетных данных строятся характеристики ПКТН:

- $\mu = \mu(t_{w2})$, при $t_0 = var$;
- $Q_k = Q(t_0)$, при $t_{w2} = var$;
- $N_e = N(t_{w2})$, при $t_0 = var$.

Экспериментальные характеристики энергопотребления герметичного спирального компрессора марки Copeland ZP28K3E-PEJ сравниваются на графике $N_{эл} = N(t_{w2})$ при $t_0 = var$ с заводскими, приведенными в прил. 1.

2. Описание экспериментального стенда

Схема экспериментального стенда представлена на рис. 1. Термодинамический цикл представлен на рис. 2. Протокол испытаний представлен в прил. 2. Основное оборудование приведено в прил. 1.

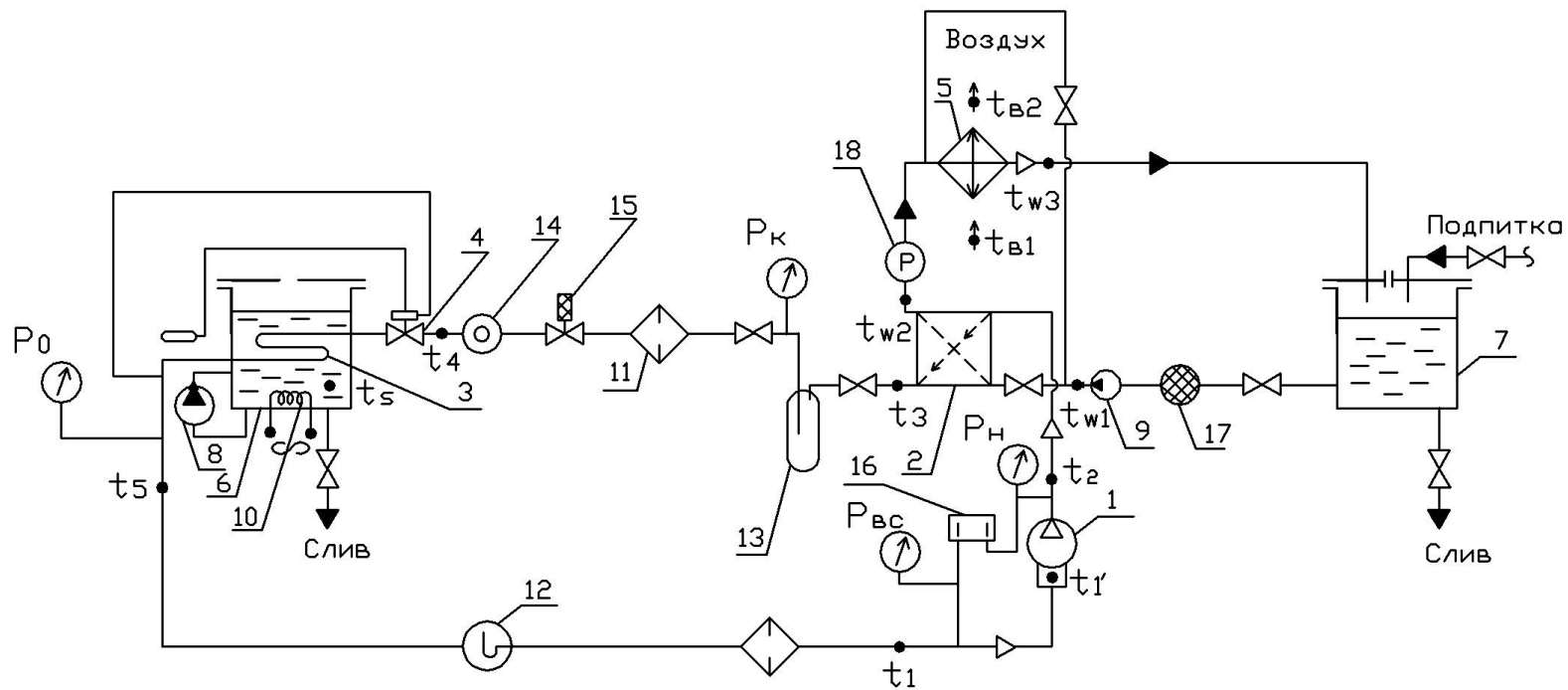


Рис. 1. Схема экспериментального стенда ПКТН

1 – компрессор; 2 – конденсатор; 3 – испаритель; 4 – терморегулирующий вентиль; 5 – воздухонагреватель;
 6 – бак холодной воды; 7 – бак горячей воды; 8 – насос холодной воды; 9 – насос горячей воды; 10 – ТЭН;
 11 – фильтр-осушитель; 12 – отделитель жидкости; 13 – ресивер; 14 – смотровое окно; 15 – соленоидный вентиль,
 16 – двойное реле давления; 17 – фильтр водяной; 18 – расходомер

Обозначения температур t и давлений P приведены в протоколе испытаний (прил. 2)

Характеристики контрольно-измерительных приборов стенда даны в прил. 3.

Стенд ПКТН смонтирован на одной раме. Основные элементы ПКТН и щит контрольно-измерительных приборов имеют свободный доступ.

3. Методика проведения эксперимента

Испытания проводятся при установившемся режиме работы теплового насоса. Установившимся режимом является режим, при котором параметры рабочего вещества остаются постоянными в течение длительного времени проведения испытаний. В работе испытуемой машины стабильного режима работы достичь практически не удастся (из-за наличия факторов внешнего воздействия и так далее), поэтому допускается отклонение температур рабочего вещества, охлаждаемой и горячей воды в контрольно-измерительных точках в пределах от 1 до 1,3 °С.

Показания контрольно-измерительных приборов записываются в протокол через каждые 15 мин не менее трёх раз.

Во время испытаний определяются:

1. С помощью контрольно-измерительного электронного прибора ОВЕН УКТ38:

– температура рабочего вещества, °С, на входе в компрессор t_1 , выходе из компрессора t_2 , на выходе из конденсатора t_3 , перед ТРВ t_4 , на выходе из испарителя t_5 ;

– температура воды, °С, на выходе из конвектора t_{w2} .

2. С помощью термометров:

– температура воды, °С, на входе в конденсатор t_{w1} ;

– температура воздуха, °С, на входе $t_{в1}$ и выходе $t_{в2}$ из конвектора.

3. С помощью манометров – давление всасывания $P_{вс}$, кипения P_0 , конденсации $P_к$, нагнетания $P_н$.

4. С помощью счетчика расхода воды – расход воды в конденсаторе G_w и расход воды через конвектор $G_{вк}$.

5. С помощью электросчетчиков – мощность, подводимая к электродвигателю $N_{эл.дв}$ и к ТЭНам для подогрева воды в баке холодной воды $N_{тэн}$.

6. Фиксируется барометрическое давление B ; расход воздуха через конвектор.

Температура воды в баке холодной воды устанавливается в соответствии с заданием на испытание и поддерживается автоматически с помощью регулятора температуры ТРЭ1.05 «Термокор» (прил. 3).

Расход воздуха через воздухонагреватель и расход воды через конденсатор меняется в соответствии с общим планом испытаний ПКТН для построения характеристик.

4. Методика обработки результатов эксперимента

По данным, полученным в результате проведения эксперимента и занесенным в протокол проведения испытаний, производится расчет параметров работы теплового насоса. Данные, полученные в результате проведения нескольких замеров, усредняются. Показания избыточных давлений по манометрам, установленным на стенде, переводятся в абсолютные значения ($1 \text{ техн. атм (кгс/см}^2) = 735,6 \text{ мм рт. ст.} = 0,098 \text{ МПа}$).

Усредненные данные, необходимые для построения цикла, заносятся в таблицу узловых точек цикла.

Параметры узловых точек

Термодинамические параметры	Номера узловых точек							
	1	2	2 _s	3	4	5	6	7
p , МПа								
t , °С								
i , кДж/кг								

По диаграмме для фреона R134a определяются значения энтальпий в узловых точках цикла.

Тепловая нагрузка конденсатора по воде

$$Q_w = G_w c_w (t_{w2} - t_{w1}),$$

где G_w – расход воды через конденсатор; c_w – удельная теплоемкость воды; t_{w1}, t_{w2} – температура воды на входе и выходе из конденсатора соответственно.

Потери теплоты в окружающую среду от наружной поверхности конденсатора

$$\Delta Q_k = \alpha_{к.н} F_{к.н} (t_k - t_{в1}),$$

где $\alpha_{к.н} = 5 \text{ Вт}/(\text{м}^2 \cdot \text{К})$, коэффициент теплоотдачи; $F_{к.н}$ – площадь наружной поверхности конденсатора; t_k – температура поверхности конденсатора, принятая равной температуре конденсации; $t_{в1}$ – температура наружного воздуха.

Количество теплоты, отведенное от конденсатора,

$$Q_k = Q_w + \Delta Q_k.$$

Количество теплоты, подведенное рабочим веществом к конденсатору,

$$Q_k = G_a^k (i_2 - i_3),$$

где G_a^k – расход рабочего вещества; i_2, i_3 – энтальпии рабочего вещества на входе и выходе из конденсатора соответственно.

Расход рабочего вещества, определенный по тепловому балансу конденсатора,

$$G_a^k = \frac{Q_k}{i_2 - i_3}.$$

Количество теплоты в баке холодной воды, воспринимаемое рабочим веществом в испарителе,

$$Q_s = N_s,$$

где N_s – мощность ТЭН, определяемая по показаниям электросчетчика,

$$N_s = \frac{N_2^{\text{ТЭН}} - N_1^{\text{ТЭН}}}{\Delta \tau},$$

где $N_1^{\text{ТЭН}}$, $N_2^{\text{ТЭН}}$ – показания электросчетчиков после и до начала эксперимента; $\Delta\tau$ – время эксперимента.

Подвод теплоты к баку холодной воды от наружного воздуха

$$\Delta Q_0 = \alpha_{\text{бак}}^{\text{X.B}} F_{\text{бак}}^{\text{X.B}} (t_{\text{в1}} - t_s),$$

где $\alpha_{\text{бак}} = 5 \text{ Вт}/(\text{м}^2 \cdot \text{К})$ – коэффициент теплоотдачи.

Расход рабочего вещества, определенный по тепловому балансу испарителя,

$$G_a^{\text{И}} = \frac{Q_s + \Delta Q_0}{i_6 - i_5}.$$

Усредненный расход рабочего вещества

$$G_a = \frac{G_a^{\text{К}} + G_a^{\text{И}}}{2}.$$

Подвод теплоты от окружающей среды к всасывающему трубопроводу

$$\Delta Q_{\text{тр}} = G_a (i_1 - i_6).$$

Эффективная мощность компрессора

$$N_e = N_{\text{эл.дв}} \eta_{\text{эл.дв}},$$

где $N_{\text{эл}}$ – электрическая мощность компрессора, определяется по электросчетчику; $\eta_{\text{эл.дв}}$ – КПД электродвигателя (КПД = 0,85).

Количество теплоты, подведенное к рабочему веществу от обмоток статора электродвигателя,

$$\Delta Q_{\text{эл}} = N_{\text{эл.дв}} (1 - \eta_{\text{эл.дв}}).$$

Энтальпия пара перед всасывающими клапанами компрессора

$$i'_1 = i + \frac{\Delta Q_{\text{эл}}}{G_a}.$$

Эффективный КПД компрессора

$$\eta_e = \frac{i_{2s} - i_1'}{i_2 - i_1'}$$

Теплота, подведенная к ПКТН,

$$Q_{\text{подв}} = N_{\text{эл}} + Q_s + \Delta Q_0.$$

Теплота, отведенная от ПКТН,

$$Q_{\text{отв}} = Q_k.$$

Коэффициент теплопередачи в конденсаторе

$$K_k = \frac{Q_w}{F_k \Theta_k},$$

где

$$\Theta_k = \frac{t_{w2} - t_{w1}}{\ln \frac{t_k - t_{w1}}{t_k - t_{w2}}}$$

Теплопроизводительность воздухонагревателя

$$Q_{\text{в.н}} = V_{\text{возд}} c_{\text{возд}} (t_{\text{в2}} - t_{\text{в1}}),$$

где $c_{\text{возд}}$ – удельная теплоемкость воздуха.

5. Требования к отчету

Все материалы испытаний объединяются в отчет по работе, который должен содержать следующее:

- протокол испытаний, подписанный студентом и преподавателем, руководившим работой;
- схему стенда с расстановкой номеров узловых точек цикла;
- цикл, вписанный в диаграмму состояния рабочего вещества;
- таблицу термодинамических параметров узловых точек цикла;
- результаты обработки опытных данных.

При самостоятельной работе рекомендуем обратиться к ниже следующей информации (прил. 4–8; ссылки на прил. 1–3 даны выше).

ПРИЛОЖЕНИЯ

Характеристика основного оборудования

1. Компрессор герметичный вертикальный.

Марка компрессора Copeland ZR28K3E-PFJ с однофазным двигателем. Площадь наружной поверхности компрессора $F_{н.к} = 0,232 \text{ м}^2$.

Ниже дана характеристика холодопроизводительности компрессора $Q_0 = Q(t_0, t_k)$.

Холодопроизводительность компрессора

Температура конденсации, °С	Температура кипения, °С								
	-20	-15	-10	-5	0	5	7	10	12,5
30	1,61	2,14	2,73	3,41	4,21	5,15	5,57	6,25	
40	1,35	1,85	2,40	3,04	3,77	4,63	5,02	5,65	6,22
50		1,57	2,08	2,67	3,34	4,12	4,47	5,04	5,55
70					2,36	2,98	3,25	3,70	4,10

Характеристика компрессора по потребляемой электрической энергии $N_{эл.к} = N(t_0, t_k)$.

Потребляемая электрическая энергия компрессора

Температура конденсации, °С	Температура кипения, °С								
	-20	-15	-10	-5	0	5	7	10	12,5
30	0,91	0,90	0,91	0,91	0,90	0,90	0,90	0,89	
40	1,12	1,12	1,12	1,12	1,13	1,13	1,13	1,13	1,13
50		1,38	1,37	1,37	1,37	1,38	1,38	1,38	1,38
70					2,21	2,19	2,19	2,18	2,17

2. Конденсатор водяной пластинчатый фирмы Alfa Laval.

Марка конденсатора СВ 26–20. Теплопередающая поверхность $F_k = 0,5 \text{ м}^2$. Площадь наружной поверхности конденсатора $F_{к.н} = 0,136 \text{ м}^2$.

3. Испаритель. Змеевик из медных труб \varnothing 16 мм. Теплопередающая поверхность $F_{\text{и}} = 0,075 \text{ м}^2$.

4. Бак холодной воды. Имеет форму куба с изолированной поверхностью и соединен с атмосферой. Площадь поверхности бака $F_{\text{бак}}^{\text{х.в}} = 3,84 \text{ м}^2$. В баке размещены три ТЭНа по 2 кВт каждый.

5. Бак горячей воды. Имеет форму куба с изолированной поверхностью и соединен с атмосферой. Площадь поверхности бака $F_{\text{бак}}^{\text{г.в}} = 3,84 \text{ м}^2$.

6. Воздухонагреватель. Марка Wesper 7031. Три позиции производительности вентилятора по воздуху $V_{\text{возд}}$: 1) $589 \text{ м}^3/\text{ч}$; 2) $768 \text{ м}^3/\text{ч}$; 3) $1085 \text{ м}^3/\text{ч}$.

**Протокол
испытания теплового насоса**

« ____ » _____ Г.

Ф.И.О. _____ № группы _____

№ п/п	Измеряемые величины	Обозначение	Единицы измерения	Замер			Среднее значение
				1	2	3	
1	Атмосферное давление	P	мм рт.ст				
<i>Рабочее вещество</i>							
2	Давление кипения	P_0	кгс/см ²				
3	Давление конденсации	P_k	кгс/см ²				
4	Давление всасывания	$P_{вс}$	кгс/см ²				
5	Давление нагнетания	P_n	кгс/см ²				
6	Температура пара на входе в компрессор	t_1	°С				
7	Температура пара на выходе из компрессора	t_2	°С				
8	Температура жидкости на выходе из конденсатора	t_3	°С				
9	Температура жидкости перед ТРВ	t_4	°С				
10	Температура пара на выходе из испарителя	t_5	°С				
<i>Вода</i>							
11	Температура на входе в конденсатор	t_{w1}	°С				
12	Температура на выходе из конденсатора	t_{w2}	°С				
13	Расход воды через конденсатор	V_w	л/мин				
14	Температура на выходе из воздухонагревателя	t_{w3}	°С				

№ п/п	Измеряемые величины	Обо- зна- чение	Единицы измере- ния	Замер			Сред- нее зна- чение
				1	2	3	
15	Температура в баке холодной воды	t_s	°С				
<i>Воздух</i>							
16	Температура на входе в воздухонагреватель	$t_{в1}$	°С				
17	Температура на выходе из воздухонагревателя	$t_{в2}$	°С				
18	Расход воздуха, прохо- дящего через нагрева- тель	V_L	м ³ /ч				
<i>Потребляемая электроэнергия</i>							
19	Компрессор, начало и конец показаний элек- тросчетчиков	$N_{эл.дв}$	кВт·ч				
20	ТЭН, начало и конец по- казаний электросчетчи- ков	$N_{ТЭН}$	кВт·ч				
21	Время начала и конца замера показаний элек- тросчетчиков	τ	ч				

Характеристика контрольно-измерительных приборов стенда

1. *Приборы для измерения давления.* Давление в трубопроводах и аппаратах стенда контролируется образцовыми манометрами, класс точности 0,6 и 0,4. Для контроля перепадов давления между линией всасывания и нагнетания используется двухблочное реле давления ALKO PS2-A7K.

2. *Приборы для измерения температуры.* Для измерения температуры в контрольных точках используются ртутные лабораторные термометры с ценой деления 0,1–0,2 °С, а также термометры сопротивления в комплекте с устройством для вывода данных ОВЕН УКТ38 с допускаемой погрешностью не более $\pm 0,5\%$ (без учета погрешности датчика, погрешность которого составляет также $\pm 0,5\%$).

3. *Приборы для измерения расхода воды.* Расход нагреваемой воды определяется с помощью универсального счетчика холодной/горячей воды СВК 15–3, установленного на водяной линии после конденсатора. Рабочий температурный диапазон в пределах от 5 до 90 °С, погрешность измерения составляет $\pm 4\%$.

4. *Приборы автоматического регулирования.* Для автоматического поддержания температуры холодной воды используется регулятор температуры ТРЭ1.05 «Термокор», работающий совместно с термопреобразователями сопротивления. Основная погрешность составляет 0,5 °С.

5. *Приборы для измерения расхода электроэнергии.* Для определения количества электроэнергии, потребляемой компрессором и ТЭНами на нагрев воды в баке холодной воды, используются электросчетчики марки ЦЕЭ6807Б 2,0 220 В 5–60 АЭР. Класс точности 2; порог чувствительности 5,5 Вт; диапазон тока от номинального до максимального – от 5 до 60 А. Предел допускаемого значения основной погрешности равен $\pm 0,5\%$.

Приложение 4

Термодинамические свойства хладагента R134a в состоянии насыщения [2]

t , °C	P_s , МПа	ρ'' , кг/м ³	ρ' , кг/м ³	h'' , кДж/кг	h' , кДж/кг	r , кДж/кг	s'' , кДж/(кг·К)	s' , кДж/(кг·К)
-70	0,00798	0,48568	1501,9	335,01	111,19	243,82	1,8264	0,6261
-68	0,00922	0,55610	1496,4	356,27	113,62	242,65	1,8208	0,6380
-66	0,01062	0,63470	1490,9	357,52	116,04	241,48	1,8155	0,6498
-64	0,01219	0,72218	1485,4	358,78	118,48	240,30	1,8104	0,6615
-62	0,01394	0,81927	1479,8	360,04	120,92	239,12	1,8056	0,6731
-60	0,01591	0,92676	1474,3	361,31	123,36	237,95	1,8009	0,6646
-58	0,01809	1,0454	1468,7	362,57	125,81	236,76	1,7965	0,6960
-56	0,02052	1,1761	1463,1	363,84	128,26	235,58	1,7922	0,7074
-54	0,02321	1,3198	1457,5	365,11	130,73	234,38	1,7881	0,7186
-52	0,02618	1,4773	1451,9	366,38	133,19	233,19	1,7842	0,7298
-50	0,02945	1,6496	1446,3	367,65	135,67	231,98	1,7805	0,7410
-48	0,03305	1,8377	1440,6	368,92	138,15	230,77	1,7770	0,7520

Продолжение прил. 4

t , °C	P_s , МПа	ρ'' , кг/м ³	ρ' , кг/м ³	h'' , кДж/кг	h' , кДж/кг	r , кДж/кг	s'' , кДж/(кг·К)	s' , кДж/(кг·К)
-46	0,03700	2,0426	1434,9	370,19	140,64	229,55	1,7736	0,7630
-44	0,04133	2,2655	1429,2	371,46	143,13	228,33	1,7703	0,7739
-42	0,04606	2,5074	1423,4	372,73	145,63	227,10	1,7672	0,7848
-40	0,05121	2,7695	1417,7	374,00	148,14	225,86	1,7643	0,7956
-38	0,05682	3,0529	1411,9	375,27	150,65	224,62	1,7615	0,8063
-36	0,06291	3,3590	1406,0	376,53	153,18	223,35	1,7588	0,8170
-34	0,06951	3,6889	1400,2	377,79	155,71	222,08	1,7562	0,8276
-32	0,07666	4,0441	1394,3	379,06	158,24	220,82	1,7538	0,8381
-30	0,08438	4,4258	1388,4	380,31	160,79	219,52	1,7514	0,8486
-28	0,09270	4,8356	1382,4	381,57	163,34	218,23	1,7492	0,8590
-26,08	0,101133	5,2566	1376,6	382,77	165,80	216,97	1,7472	0,8690
-26	0,10167	5,2748	1376,4	382,82	165,90	216,92	1,7471	0,8694

Продолжение прил. 4

t , °C	P_s , МПа	ρ'' , кг/м ³	ρ' , кг/м ³	h'' , кДж/кг	h' , кДж/кг	r , кДж/кг	s'' , кДж/(кг·К)	s' , кДж/(кг·К)
-24	0,11130	5,7449	1370,4	384,07	168,48	215,59	1,7450	0,8797
-22	0,12165	6,2476	1364,3	385,31	171,05	214,26	1,7431	0,8900
-20	0,13273	6,7845	1357,2	306,55	173,63	212,92	1,7413	0,9002
-18	0,14460	7,3571	1352,1	387,78	176,22	211,56	1,7395	0,9104
-16	0,15728	7,9673	1345,9	389,01	178,83	210,18	1,7379	0,9205
-14	0,17082	8,6167	1339,7	390,23	181,44	208,79	1,7363	0,9306
-12	0,18524	9,3074	1333,4	391,45	184,06	207,39	1,7347	0,9406
-10	0,20060	10,041	1327,1	392,66	186,69	205,97	1,7333	0,9506
-8	0,21693	11,645	1320,7	393,86	189,33	204,53	1,7319	0,9606
-6	0,23428	11,645	1314,3	395,06	191,98	203,08	1,7306	0,9705
-4	0,25268	12,521	1307,8	396,25	194,64	201,61	1,7294	0,9803
-2	0,27217	13,447	1301,3	397,43	197,31	200,12	1,7282	0,9902

Продолжение прил. 4

t , °C	P_s , МПа	ρ'' , кг/м ³	ρ' , кг/м ³	h'' , кДж/кг	h' , кДж/кг	r , кДж/кг	s'' , кДж/(кг·К)	s' , кДж/(кг·К)
0	0,29280	14,428	1294,7	398,60	199,99	198,61	1,7270	1,0000
2	0,31462	15,464	1288,1	399,76	202,69	197,07	1,7260	1,0097
4	0,33766	16,560	1281,4	400,91	205,39	195,52	1,7249	1,0194
6	0,36198	17,717	1274,6	402,06	208,11	193,95	1,7239	1,0291
8	0,38761	18,937	1267,8	403,19	210,83	192,36	1,7230	1,0388
10	0,41461	20,225	1260,9	404,31	213,57	190,74	1,7221	1,0484
12	0,44301	21,583	1253,9	405,42	216,32	189,10	1,7212	1,0580
14	0,47288	23,014	1246,9	406,52	219,09	187,43	1,7204	1,0676
16	0,50425	24,521	1239,8	407,61	221,87	185,74	1,7195	1,0772
18	0,53718	26,109	1232,6	406,68	224,66	184,02	1,7188	1,0867
20	0,57171	27,780	1225,3	409,74	227,46	182,28	1,7180	1,0962
22	0,60789	29,538	1217,9	410,79	230,28	180,51	1,7173	1,1057

Продолжение прил. 4

t , °C	P_s , МПа	ρ'' , кг/м ³	ρ' , кг/м ³	h'' , кДж/кг	h' , кДж/кг	r , кДж/кг	s'' , кДж/(кг·К)	s' , кДж/(кг·К)
24	0,64578	31,389	1210,4	411,82	233,12	178,70	1,7165	1,1151
26	0,68543	33,335	1202,9	412,83	235,97	176,06	1,7158	1,1246
28	0,72688	35,382	1195,2	413,83	238,83	175,00	1,7151	1,1340
30	0,77020	37,535	1187,4	414,81	241,72	173,09	1,7144	1,1435
32	0,81543	39,799	1179,5	415,78	244,62	171,16	1,7138	1,1529
34	0,86263	42,179	1171,5	416,72	247,54	169,18	1,7131	1,1623
36	0,91185	44,683	1163,4	417,64	250,47	167,17	1,7124	1,1717
38	0,96315	47,315	1155,1	418,54	253,43	165,11	1,7117	1,1810
40	1,0165	50,085	1146,7	419,42	256,40	163,02	1,7110	1,1904
42	1,0722	52,998	1138,1	420,28	259,40	160,88	1,7103	1,1998
44	1,1301	56,064	1129,4	421,11	262,42	158,69	1,7096	1,2092
46	1,1903	59,291	1120,5	421,91	265,46	156,45	1,7088	1,2186

Окончание прил. 4

t , °C	P_s , МПа	ρ'' , кг/м ³	ρ' , кг/м ³	h'' , кДж/кг	h' , кДж/кг	r , кДж/кг	s'' , кДж/(кг·К)	s' , кДж/(кг·К)
48	1,2528	62,690	1111,5	422,69	268,53	154,16	1,7080	1,2280
50	1,3179	66,271	1102,3	423,43	271,62	151,81	1,7072	1,2374
52	1,3854	70,047	1092,8	424,14	274,74	149,40	1,7063	1,2468
54	1,4554	74,030	1083,2	424,82	277,88	146,94	1,7054	1,2563
56	1,5282	78,235	1073,3	425,46	281,06	144,40	1,7045	1,2657
58	1,6036	82,378	1063,2	426,07	284,26	141,81	1,7035	1,2752
60	1,6817	87,379	1052,8	426,62	287,50	139,12	1,7024	1,2848
62	1,7628	92,357	1042,2	427,14	290,77	136,37	1,7012	1,2943
64	1,8467	97,637	1031,2	427,60	294,09	133,71	1,7000	1,3040
66	1,9336	103,240	1019,9	428,01	297,44	130,57	1,6986	1,3136
68	2,0236	109,210	1008,2	428,36	300,83	127,53	1,6972	1,3233
70	2,1168	115,570	996,24	428,64	304,28	124,56	1,6956	1,3331

Приложение 5

Теплофизические свойства жидкого хладагента R134a на линии насыщения [3]

t , °C	p , МПа	ρ' , кг/м ³	c_p , кДж/(кг·К)	λ , Вт/(м·К)	$\alpha \cdot 10^8$, м ² /с	$\mu \cdot 10^4$, Па·с	$\nu \cdot 10^7$, м ² /с	$\sigma \cdot 10^3$, Н/м	$\beta \cdot 10^3$, К ⁻¹	Pr
-35	0,063	1419,6	1,301	0,1095	5,929	3,09	2,174	16,72	–	3,67
-30	0,081	1396,9	1,308	0,1072	5,867	2,79	1,997	15,98	2,20	3,40
-20	0,129	1363,2	1,323	0,1027	5,694	2,26	1,658	14,54	2,30	2,91
-10	0,196	1331,3	1,339	0,0983	5,514	1,99	1,495	13,10	2,45	2,71
0	0,289	1298,7	1,358	0,0942	5,341	1,69	1,301	11,69	2,60	2,44
10	0,412	1264,6	1,380	0,0901	5,163	1,50	1,186	10,30	2,80	2,30
20	0,571	1228,4	1,406	0,0860	4,979	1,35	1,099	8,94	3,05	2,21
30	0,772	1190,1	1,439	0,0820	4,788	1,22	1,025	7,61	3,35	2,14
40	1,019	1149,0	1,482	0,0781	4,586	1,09	0,949	6,31	3,75	2,07
50	1,321	1 104,5	1,537	0,0742	4,371	0,95	0,860	5,06	4,25	1,97
60	1,684	1055,3	1,618	0,0704	4,123	0,80	0,758	3,86	5,00	1,84
70	2,118	998,8	1,747	0,0665	3,811	0,69	1,687	2,74	6,20	1,80

Приложение 6

Теплофизические свойства сухого насыщенного пара хладагента R134a [3]

t , °C	p , бар	ρ'' , кг/м ³	r , кДж/кг	c_p , кДж/(кг·K)	λ , Вт/(м·K)	$\alpha \cdot 10^8$, м ² /с	$\mu \cdot 10^4$, Па·с	$\nu \cdot 10^7$, м ² /с	Pr
-35	0,63	3,44	225,4	0,753	0,0093	3,59	9,495	2,76	0,77
-30	0,81	4,35	220,4	0,767	0,0096	2,877	9,74	2,24	0,78
-20	1,29	6,71	213,7	0,796	0,0103	1,928	10,2	1,52	0,79
-10	1,96	9,97	207,8	0,829	0,0110	1,331	10,7	1,07	0,81
0	2,89	4,39	201,0	0,864	0,0117	0,941	11,2	0,778	0,83
10	4,12	0,28	192,7	0,904	0,0124	0,676	11,7	0,577	0,85
20	5,71	7,96	183,2	0,949	0,0131	0,4937	12,2	0,436	0,88
30	7,72	37,89	172,8	1,002	0,0139	0,3661	12,7	0,335	0,92
40	10,19	50,64	161,6	1,066	0,0147	0,2723	13,2	0,261	0,96
50	13,21	67,05	149,7	1,149	0,0156	0,2025	13,8	0,206	1,02
60	16,84	88,48	136,9	1,262	0,0165	0,1478	14,5	0,164	1,14
70	21,18	117,25	122,3	1,438	0,0177	0,1050	15,3	0,130	1,24

Окончание прил. 6

t , °C	p , бар	ρ'' , кг/м ³	r , кДж/кг	c_p , кДж/(кг·К)	λ , Вт/(м·К)	$\alpha \cdot 10^8$, м ² /с	$\mu \cdot 10^4$, Па·с	$\nu \cdot 10^7$, м ² /с	Pr
80	26,35	158,06	104,3	1,773	0,0193	0,06887	16,5	0,104	1,52
90	32,48	223,23	79,5	2,747	0,0224	0,0365	18,4	0,0824	2,26
100	39,76	393,85	28,6	—	—	—	—	—	—

Хладагент R134a [4]

Химическая формула – $C_2F_4H_2$ (1,1,1,2 – тетрафторэтан). Это бесцветный нетоксичный газ. Молекулярная масса – 102 г/моль, температура кипения при атмосферном давлении – минус 26,5 °С, температура плавления – минус 101 °С, критическая температура – 101,5 °С, критическое давление – 4,06 МПа, критическая плотность – 538,5 кг/м³.

Молекула R134a имеет меньшие размеры, чем молекула R12, что делает более значительной опасность утечек.

Экологические характеристики: ODP = 0, GWP = 1300, HGW = 0,28. ПДК_{рз} не установлена. Класс опасности – 4.

Массовая растворимость R134a в воде при температуре 25 °С составляет 0,15 %, массовая растворимость воды в R134a – 0,11 %.

R134a нетоксичен и не воспламеняется во всем диапазоне температур эксплуатации. Однако при попадании воздуха в систему и при сжатии могут образовываться горючие смеси.

При соприкосновении с пламенем и горячими поверхностями R134a разлагается с образованием высокотоксичных продуктов. Это трудногорючий газ. Концентрационные пределы распространения пламени в воздухе отсутствуют.

R134a гигроскопичен, вследствие чего к холодильным системам предъявляют повышенные требования, в частности соединения должны быть паяными, а не резьбовыми; необходимо поддерживать более низкое остаточное давление в системе при вакуумировании.

R134a широко используют во всем мире в качестве основной замены R12 для холодильного оборудования, работающего в среднетемпературном диапазоне.

R12 применяют в автомобильных кондиционерах, бытовых холодильниках, торговом холодильном среднетемпературном оборудовании, промышленных установках, системах кондиционирования воздуха в зданиях и промышленных помещениях, а также на холодильном транспорте.

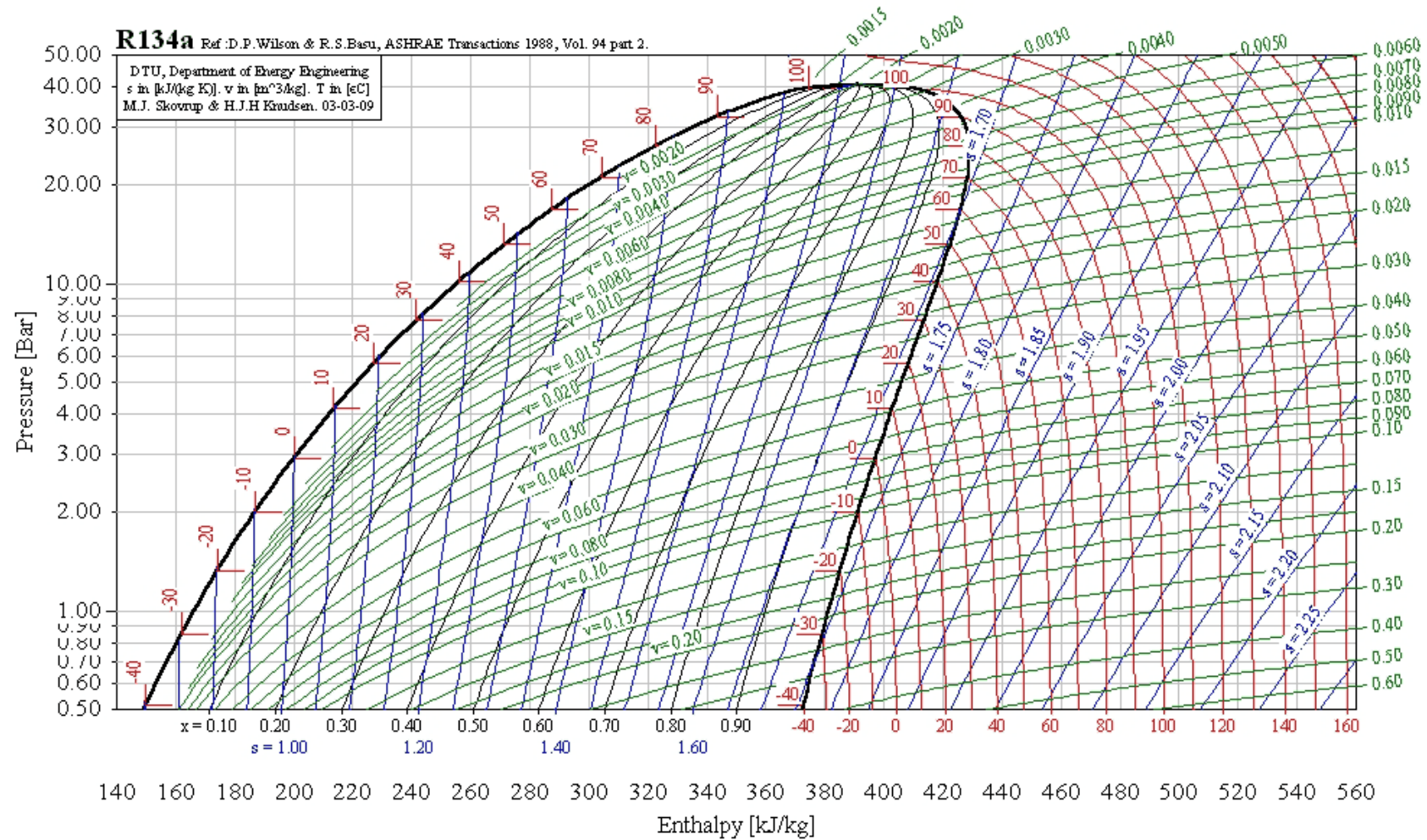


Диаграмма хладагента R134a в координатах $i - \lg P$

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Холодильные машины: Учеб. / Под ред. Л.С. Тимофеевского. – СПб.: Политехника, 2006. – 944 с.
2. Tillner-Roth R., Kraus R. Thermophysical properties of R134a. – Paris, IIR, 1995. – 49 p.
3. Промышленные фторорганические продукты.: Справ. изд./ Б.Д. Максимов, В.Г. Барабанов, И.Л. Сергушкин и др. 2-е изд., перераб. и доп. – СПб.: Химия, 1996. – 544 с.
4. Теплонасосные установки в отраслях агропромышленного комплекса: Учеб. / Под ред. проф. Ю.А. Фатыхова. – СПб.: Изд-во «Лань», 2014. – 336 с.

СОДЕРЖАНИЕ

ВВЕДЕНИЕ.....	3
1. Цель проведения испытаний.....	3
2. Описание экспериментального стенда.....	3
3. Методика проведения эксперимента.....	6
4. Методика обработки результатов эксперимента.....	7
5. Требования к отчету.....	11
ПРИЛОЖЕНИЯ.....	12
СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ.....	29

Дзино Анатолий Аполлонович
Малышев Александр Александрович
Малинина Ольга Сергеевна

ИСПЫТАНИЕ ПАРОКОМПРЕССОРНОГО ТЕПЛОВОГО НАСОСА

Учебно-методическое пособие

Ответственный редактор
Т.Г. Смирнова

Редактор
Р.А. Сафарова

Компьютерная верстка
Н.В. Гуральник

Дизайн обложки
Н.А. Потехина

Подписано в печать 4.06.2015. Формат 60×84 1/16
Усл. печ. л. 2,09. Печ. л. 2,25. Уч.-изд. л. 1,88
Тираж 50 экз. Заказ № С 41

Университет ИТМО. 197101, Санкт-Петербург, Кронверкский пр., 49

Издательско-информационный комплекс
191002, Санкт-Петербург, ул. Ломоносова, 9