

АНАЛИЗ ХОЛОДИЛЬНОГО ЦИКЛА НА ПРИРОДНЫХ ХЛАДАГЕНТАХ – ЗАМЕНИТЕЛЯХ R12, R13 и R22

Канд. техн. наук **О.В.БЕЛЯЕВА**,
канд. техн. наук **А.Ж.ГРЕБЕНЬКОВ**,
д-р техн. наук, проф. **Б.Д.ТИМОФЕЕВ**
Институт проблем энергетики ОИЭЯИ НАНБ, г. Минск

В последние годы все чаще в качестве хладагентов используются природные вещества, такие, как углеводороды [1], диоксид углерода [4], аммиак [2], воздух, азот, вода. Воздух, азот и вода находят применение в холодильных установках узкого технологического профиля [3]. Эти вещества не разрушают озонового слоя ($ODP=0$) и имеют минимальную величину потенциала глобального потепления (GWP).

В табл. 1 приведены теплофизические и экологические харак-

теристики озонобезопасных хладагентов, которые предлагаются взамен CFC и HCFC.

Из табл. 1 видно, что замени-
телями R12 по температуре нор-
мального кипения $t_{н.к.}$ могут быть
циклопропан (RC270), зеотроп-
ные смеси 0,6R290/0,4R600 и
0,5R290/0,5R600а, аммиак
(R717). Азеотропная смесь
0,7R152а/0,3R600а содержит
компонент R152а типа HFC, ко-
торый практически уравнивает
температуру нормального кипе-
ния смеси и R12. Углеводороды
н-бутан (R600) и изобутан

Thermophysical and ecological characteristics of natural refrigerants – substitutes for CFC and HCFC – are considered. Main characteristics of the refrigerating cycle during operation on the substitutes of R12, R13 and R22 are presented. Vivid comparison of substituting refrigerants by their volumetric refrigerating effect and the temperature in the compressor outlet is given. In conclusion, recommendations on the use of particular alternative refrigerants are presented, and it is shown that it is impractical for the countries of CIS to take out of use HCFC refrigerants before the appointed time (prior to 2030).

(R600a) значительно уступают R12 по температуре нормального кипения.

Аммиак по теплофизическим и экологическим характеристикам является перспективным заменителем R12.

Таблица 1

Теплофизические и экологические характеристики озонобезопасных хладагентов

Хладагент	Название	Химическая формула	Молек. масса, г/моль	$t_{н.к.}, ^\circ\text{C}$	$t_{к.р.}, ^\circ\text{C}$	$p_{к.р.}, \text{МПа}$	GWP	Glide, $^\circ\text{C}$
R12*	Дифтордихлорметан	CCl_2F_2	120,92	-29,8	111,8	4,12	8500	0
R600	n-Бутан	$\text{CH}_3-\text{CH}_2-\text{CH}_2-\text{CH}_3$	52,12	-0,5	152,0	3,80	3	0
R600a	Изобутан	$\text{CH}(\text{CH}_3)_2-\text{CH}_3$	52,12	-11,8	135,0	3,65	3	0
RC270	Циклопропан	$-\text{CH}_2-\text{CH}_2-\text{CH}_2-$	42,08	-33,5	125,2	5,58	0	0
0,6R290/ 0,4R600	Смесь	$\text{CH}_3-\text{CH}_2-\text{CH}_3 / \text{CH}_3-\text{CH}_2-\text{CH}_2-\text{CH}_3$	49,6	-34,7	128,3	4,78	3	14
0,5R290/ 0,5R600a	Смесь	$\text{CH}_3-\text{CH}_2-\text{CH}_3 / \text{CH}(\text{CH}_3)_2-\text{CH}_3$	51,107	-33,7	110	3,9	3	8,6
0,7R152a/ 0,3R600a	Смесь C1	$\text{CH}_3-\text{CHF}_2 / \text{CH}(\text{CH}_3)_2-\text{CH}_3$	68,295	-29,9	115,4	4,71	98	0
R717	Аммиак	NH_3	17,03	-33,3	132,2	11,33	0	0
R22*	Дифторхлорметан	CHClF_2	86,47	-40,8	96,2	4,99	1700	0
R290	Пропан	$\text{CH}_3-\text{CH}_2-\text{CH}_3$	44,1	-42,1	96,8	4,25	0	0
R1270	Пропилен	$\text{CH}_3\text{CH}=\text{CH}_2$	42,09	-47,7	92,4	4,62	3	0
R13*	Трифторхлорметан	CClF_3	104,46	-81,4	28,8	3,81	11700	0
R744	Диоксид углерода	CO_2	44,01	-78,4	31,1	7,38	1	0
R170	Этан	CH_3-CH_3	30,07	-88,8	32,2	4,89	3	0
R23*	Трифторметан	CHF_3	70,1	-82,1	26,3	4,87	12100	0

Примечание. Для смесей перед обозначением компонентов указаны их массовые доли. $t_{\text{нк}}$ – температура кипения хладагента при нормальном атмосферном давлении; $t_{\text{кр}}$ и $p_{\text{кр}}$ – критические температура и давление хладагента; GWP – потенциал глобального потепления (для 100-летнего периода).

* Характеристики R12 и R13 (CFC), R22 (HCFC) и R23 (HFC) приведены для сравнения.

Исходя из величины температуры нормального кипения, заменяемыми R22 являются пропан (R290) и пропилен (R1270). Этан (R170), диоксид углерода и трифторметан (R23) могут быть заменителями R13 в низкотемпературной ветви каскадных холодильных установок. Использование этих хладагентов в интервале температур кипения $t_0 = -35...+5\text{ }^{\circ}\text{C}$ приводит к высоким значениям давления в контуре холодильного оборудования. Низкая стоимость, доступность, экологическая безопасность диоксида углерода по сравнению с R170 и R23 открывают возможность для его применения в низкотемпературных холодильных установках, рассчитанных на более высокие параметры по давлению.

Хладагент R23 обладает большой величиной GWP, поэтому его использование вместо R13 при ретрофите каскадного холодильного оборудования будет вызывать сопротивление стран, подписавших Киотский протокол 1997 г.

В табл. 2 приведены основные характеристики реального холодильного термодинамического цикла на озонобезопасных хладагентах при температуре конденсации $t_k = 30^\circ\text{C}$.

Из табл. 2^к следует, что при температурах кипения хладагентов ниже -15°C не следует применять R600 и R600a, так как давление в испарителе будет ниже атмосферного. Температуры кипения хладагента от -15°C и выше можно получить, исполь-

зую RC270, R717 и смесевые хладагенты 0,6R290/0,4R600, 0,5R290/0,5R600а, 0,7R152а/0,3R600а. При этом давление в испарителе будет выше атмосферного.

На рис. 1 и 2 приведены значения относительной (по отношению к R12) удельной объемной холодопроизводительности и относительной температуры на выходе из компрессора при температуре в испарителе $t_0 = 1, -15$ и -35°C . Из рис. 1 видно, что, за исключением RC270 и R717, относительная объемная холодопроизводительность альтернативных хладагентов меньше 1. Объемная холодопроизводительность цикла на смесевых хладагентах практически сохраняется на уровне R12. Это обстоятельство позволяет ус-

Основные характеристики реального холодильного термодинамического цикла на озонобезопасных хладагентах –
заменителях R12 при температуре конденсации $t_k = 30^\circ\text{C}$

Хладагент	$t_0, ^\circ\text{C}$	$p_1, \text{бар}$	$t_1, ^\circ\text{C}$	$p_2, \text{бар}$	$t_2, ^\circ\text{C}$	π_k	$q_0, \text{кДж/кг}$	$q_v, \text{кДж/м}^3$	$l, \text{кДж/кг}$	ε	$q(p, t), \text{кДж/кг}$	η
R12*	1	3,2	20	7,4	62,2	2,31	135,7	2301	21,9	6,20	11,8	0,430
	-15	1,8	20	7,4	89,2	4,11	137,7	1293	38,7	3,56	20,8	0,483
	-35	0,8	15	7,4	122,9	9,25	135,1	562	64,1	2,11	28,5	0,487
R600	1	1,0	20	2,8	66,5	2,80	347,1	850	77,9	4,46	35,2	0,309
	-15	0,6	20	2,8	75,4	4,67	349,0	478	93,5	3,73	71,1	0,506
	-35	0,2	15	2,8	101,4	14,0	342,1	185	153,2	2,23	78,0	0,515
R600a	1	1,6	20	4,0	52,6	2,5	316,8	1283	49,7	6,37	31,7	0,442
	-15	0,9	20	4,0	73,1	4,44	319,9	691	86,5	3,70	56,2	0,501
	-35	0,4	15	4,0	98,1	10,0	313,7	276	106,7	2,94	76,2	0,506
RC270	1	3,57	20	8,27	71,1	2,32	399,0	2622	63,9	6,24	25,6	0,433
	-15	2,06	20	8,27	102,5	4,01	403,8	1488	112,9	3,58	44,7	0,485
	-35	0,92	15	8,27	142,1	8,99	400,8	657	189,3	2,12	60,1	0,490
0,6R290/0,4R600	1	2,9	20	6,9	57,5	2,38	352,2	2177	56,0	6,29	21,0	0,436
	-15	1,6	20	6,9	81,0	4,31	357,0	1203	98,8	3,61	46,6	0,490
	-35	0,7	15	6,9	109,1	9,86	352,0	510	162,8	2,16	67,9	0,499
0,5R290/0,5R600a	1	3,0	20	7,0	55,6	2,33	333,6	2196	52,5	6,35	25,4	0,440
	-15	1,7	20	7,0	86,5	4,12	388,8	1232	92,4	4,21	50,5	0,496
	-35	0,8	15	7,0	104,7	8,75	333,5	534	153,1	2,18	71,2	0,503
0,7R152a/0,3R600a	1	2,9	20	7,1	60,7	2,45	270,4	2201	43,9	6,16	24,8	0,427
	-15	1,6	20	7,1	86,2	4,44	274,8	1206	77,5	3,55	42,6	0,481
	-35	0,7	15	7,1	117,7	10,1	271,7	494	128,9	2,11	57,2	0,487
R717	1	4,46	20	11,7	111	2,62	1170	3844	195	6,00	49	0,417
	-15	2,36	20	11,7	182	4,96	1185	2010	356	3,33	82	0,451
	-35	0,93	15	11,7	228	12,6	1184	792	628	1,88	110	0,435

Примечание. t_1 — температура кипения хладагента.

Примечание. t_0 – температура кипения хладагента в испарителе (в соответствии с ГОСТ 22502–89 выбраны значения $t_0 = 1, -15$ и -35 °C); p_1 и p_2 – давления хладагента в испарителе и конденсаторе; t_1 и t_2 – температуры на входе в компрессор и выходе из него; $\pi_k = p_1/p_2$ – степень повышения давления хладагента в компрессоре; q_0 и q_v – массовая и объемная холодопроизводительности цикла; l – удельная работа сжатия хладагента в компрессоре при политропном коэффициенте $h_i = 0,75$; $\varepsilon = q_0/l$ – холодильный коэффициент цикла; $q(p, t)$ – удельная тепловая нагрузка регенеративного теплообменника; η – эксергический коэффициент холодильного цикла.

*Данные по R12 приведены для сравнения.

В табл. 3 приведены основные характеристики реального холодильного термодинамического цикла на озонобезопасных хладагентах – заменителях R22 (R290 и R1270) при $t_0 = 1, -15$ и -35°C и $t_k = 30^\circ\text{C}$, а также заменителях R13 (R170, R744 и R23) при $t_0 = -90^\circ\text{C}$ и $t_k = -60^\circ\text{C}$, которые характерны для каскадной холодильной установки в низкотемпературной ветви. Из табл. 3 видно, что R290 и R1270 являются удачными заменителями R22. Однако у R290 относительная удельная объемная холодопроизводительность меньше, в то время как у R1270 больше, чем у R22 (рис. 3). Для обоих хладагентов – заместителей

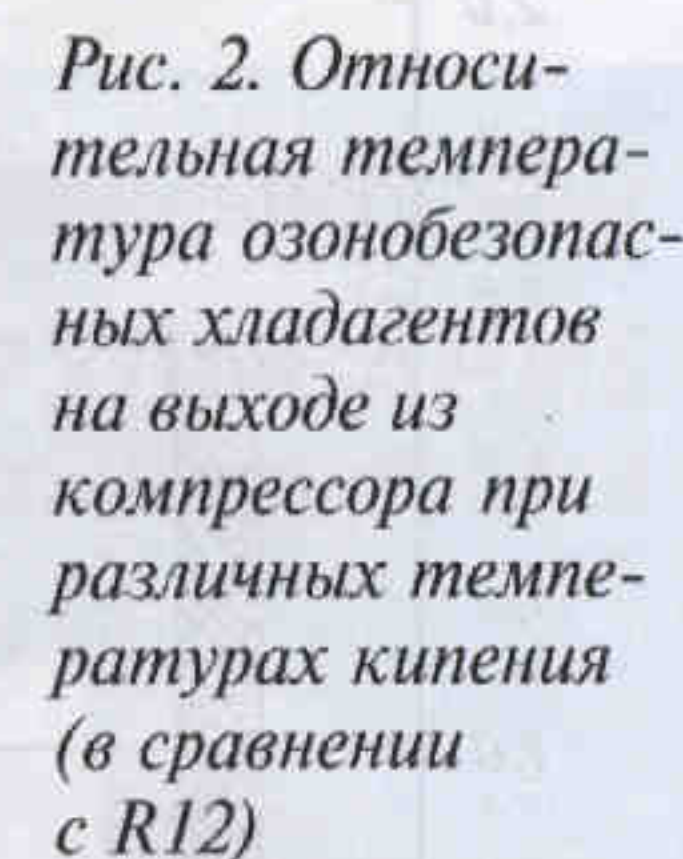
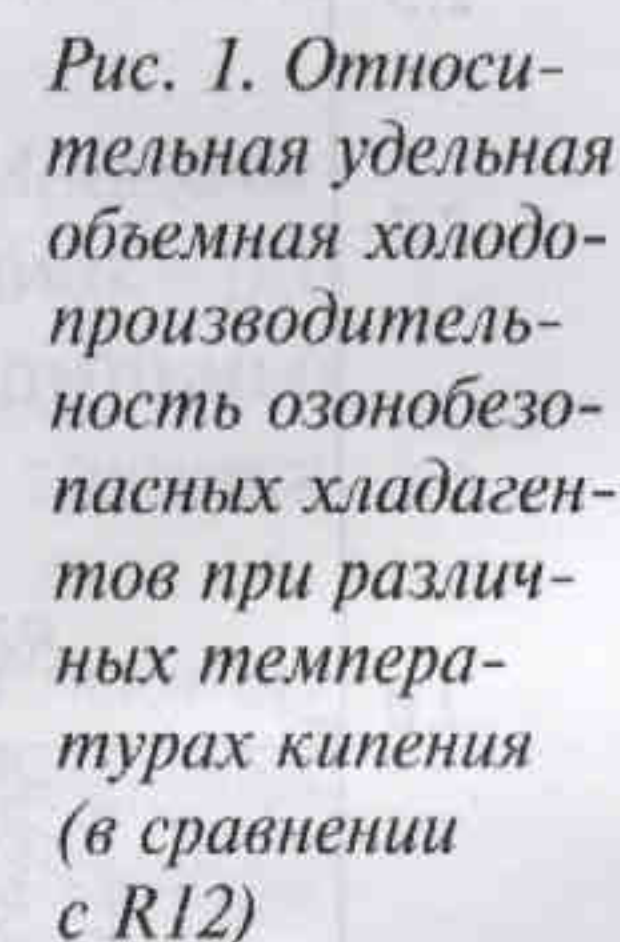


Таблица 3

* Данные по R22 и R13 приведены для сравнения.

t_c – температура конденсации; остальные параметры – см. примечание к табл. 2.

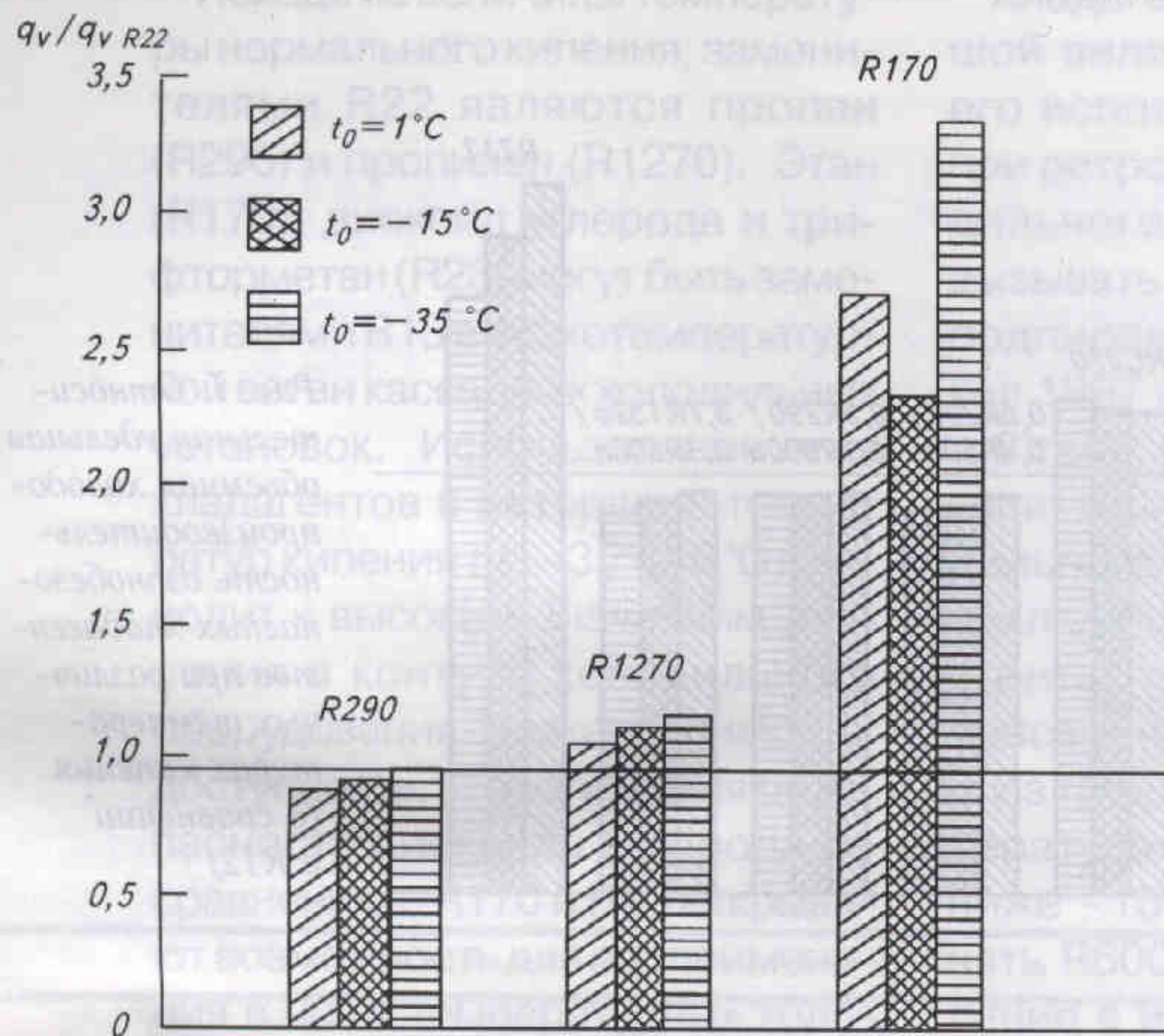


Рис. 3. Относительная удельная объемная холодопроизводительность хладагентов при различных температурах в испарителе (в сравнении с R22)

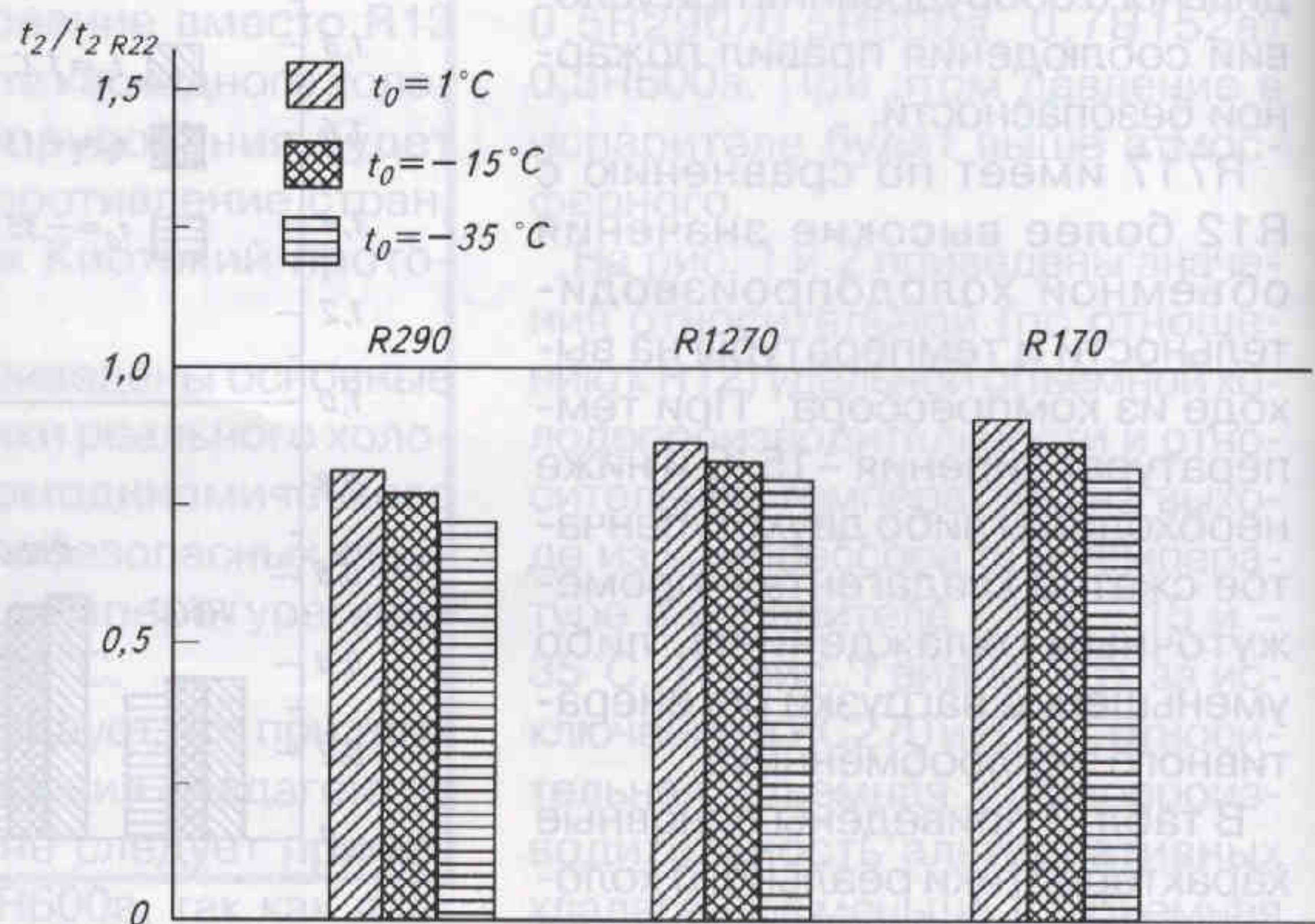


Рис. 4. Относительная температура хладагентов на выходе из компрессора при различных температурах в испарителе (в сравнении с R22)

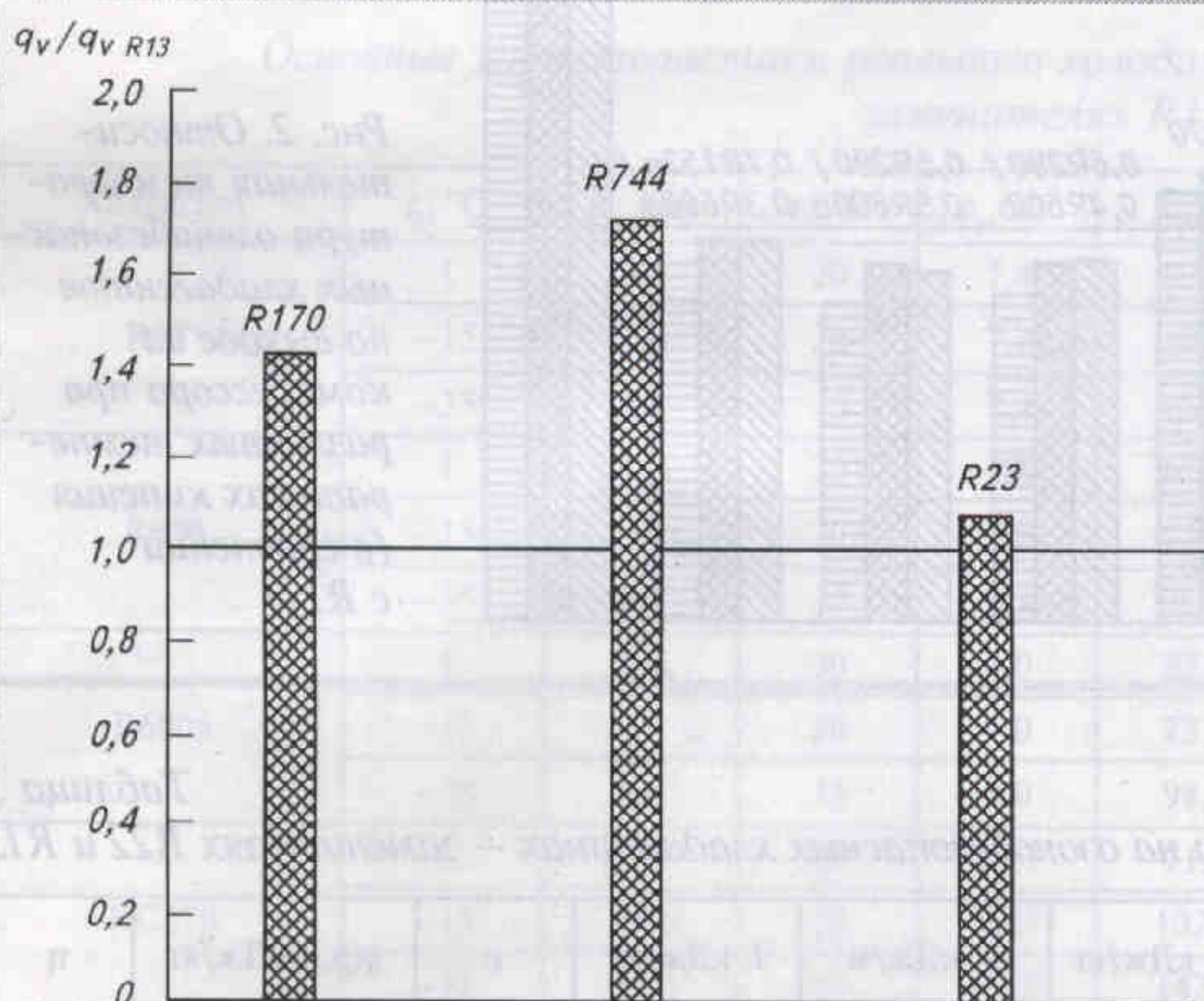


Рис. 5. Относительная удельная объемная холодопроизводительность при $t_0 = -90^\circ\text{C}$ и $t_k = -30^\circ\text{C}$ (в сравнении с R13)

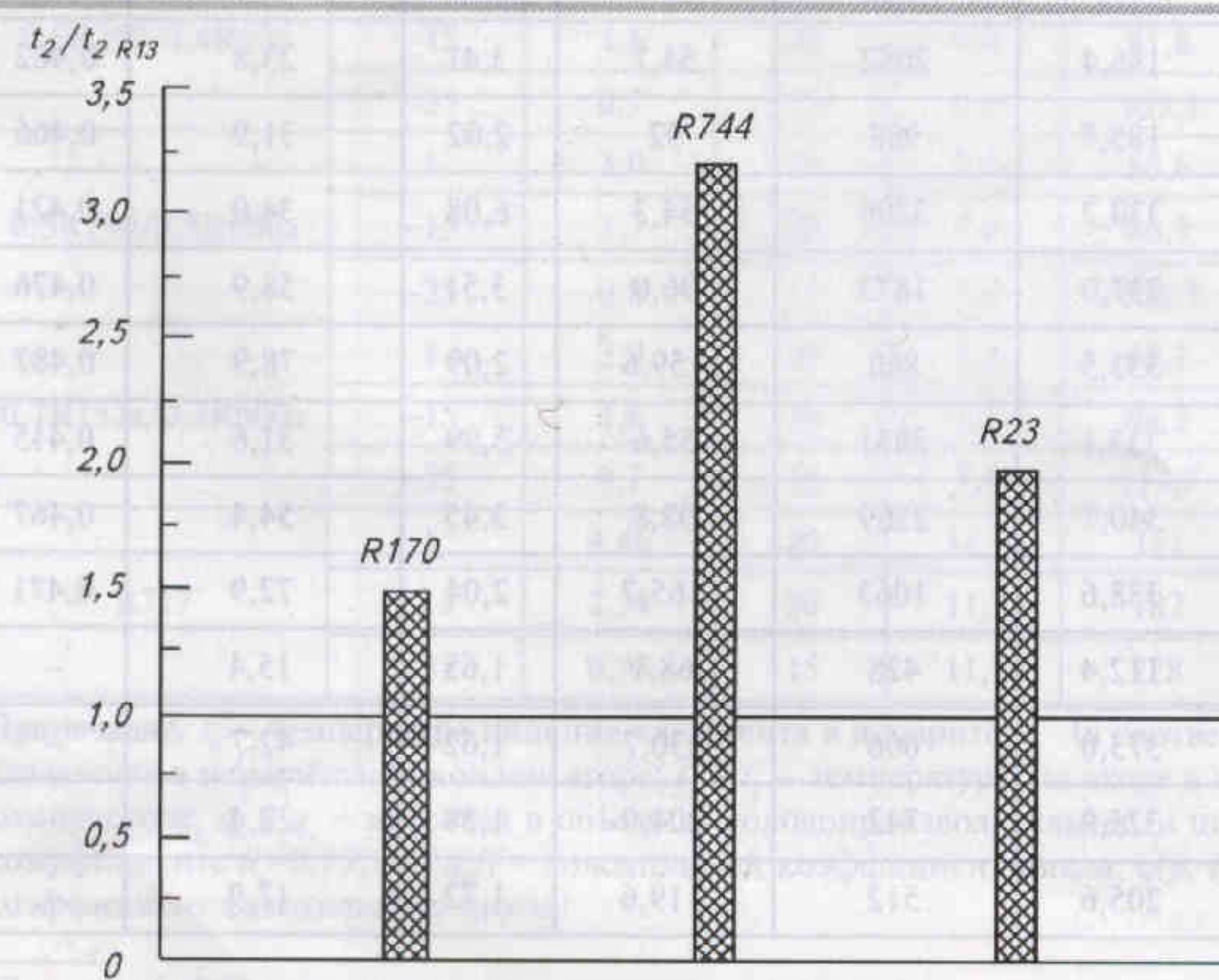


Рис. 6. Относительная температура хладагентов на выходе из компрессора при $t_0 = -90^\circ\text{C}$ и $t_k = -30^\circ\text{C}$ (в сравнении с R13)

лей R22 относительная температура на выходе из компрессора ниже (рис. 4).

Заменители R13 для низкотемпературной ветви каскадной холодильной установки обладают более высокими значениями как относительной удельной объемной холодопроизводительности (рис. 5), так и относительной температуры хладагента на выходе из компрессора (рис. 6). Особенно высокие значения получены на R744. Поэтому реальным заменителем R13 при ретрофите может стать озонобезопасный и пожаробезопасный R23, который относится к веществам типа HFC.

В заключение можно отметить следующее:

- использование углеводородов требует разработки нового холодильного оборудования с учетом пожаровзрывоопасности этих хладагентов, что, несомненно, приводит к повышению стоимости оборудования;
- применение углеводородов для ретрофита работающего холодильного оборудования приведет к значительному уменьшению холодопроизводительности;

- смесевые хладагенты на базе углеводородов для ретрофита работающего холодильного оборудования можно использовать только при обеспечении пожаро- и взрывобезопасных условий эксплуатации. С этой точки зрения смесевые хладагенты на основе углеводородов уступают регулируемым Монреальским протоколом смесям;

- аммиак перспективен как для коммерческих, так и промышленных холодильных установок;

- диоксид углерода по своим термодинамическим и экологическим показателям более эффективен по сравнению с R13 в нижней ветви каскадной холодильной установки;

- при модернизации действующего холодильного оборудования для снижения утечек хладагента необходимо использо-

вать надежные герметичные и полугерметичные компрессоры, применять более эффективное теплообменное оборудование, а также уменьшать объем хладагента, находящегося в контуре;

- учитывая огромное количество холодильного оборудования, работающего на CFC и HCFC, в странах СНГ экономически нецелесообразен ускоренный вывод из потребления (ранее 2030 г.) хладагентов типа HCFC.

Сейчас на рынке стран СНГ представлено большое количество регулируемых Монреальским протоколом смесевых хладагентов на базе HCFC, HFC и PFC с небольшими количествами углеводородов, которые являются пожаровзрывобезопасными и имеют небольшой потенциал разрушения озонового слоя ($ODP \approx 0,05$).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Калнинь И.М., Смыслов В.И., Факедов К.Н. Оценка перспектив применения экологически безопасных хладагентов в бытовой холодильной технике // Холодильная техника. 2001. № 12.

2. Красномоуец П.Г., Мнацаканов Г.К., Бакум Э.Я. Аммиак – рабочее вещество холодильных машин // Холодильная техника. 2001. № 3.

3. Промышленная теплоэнергетика и теплотехника: Справочник/Под общ. ред. В.А. Григорьева, В.М. Зорина – 2-е изд. переработ. – М.: Энергоатомиздат. 1991. – 588 с.

4. Цветков О.Б. Диоксид углерода: природный экологически безопасный хладагент // Холодильная техника. 2001. № 3.



**ООО "Эйркул" —
ГЕНЕРАЛЬНЫЙ
ДИСТРИБЬЮТОР BITZER
С 1994 ГОДА
СЕРВИС-ЦЕНТР BITZER-РОССИЯ
С 1999 ГОДА**

**СЕРВИС ЦЕНТР
BITZER
INTERNATIONAL
РОССИЯ**

ГОСТИРОВАННАЯ ПРОДУКЦИЯ

КОМПЕТЕНТНАЯ ДИАГНОСТИКА И РЕМОНТ КОМПРЕССОРОВ
ТЕХНИЧЕСКАЯ ПОДДЕРЖКА
ПОСТАВКА ЗАПАСНЫХ ЧАСТЕЙ СО СКЛАДА
АБОНЕНТСКОЕ ОБСЛУЖИВАНИЕ ДИЛЕРОВ

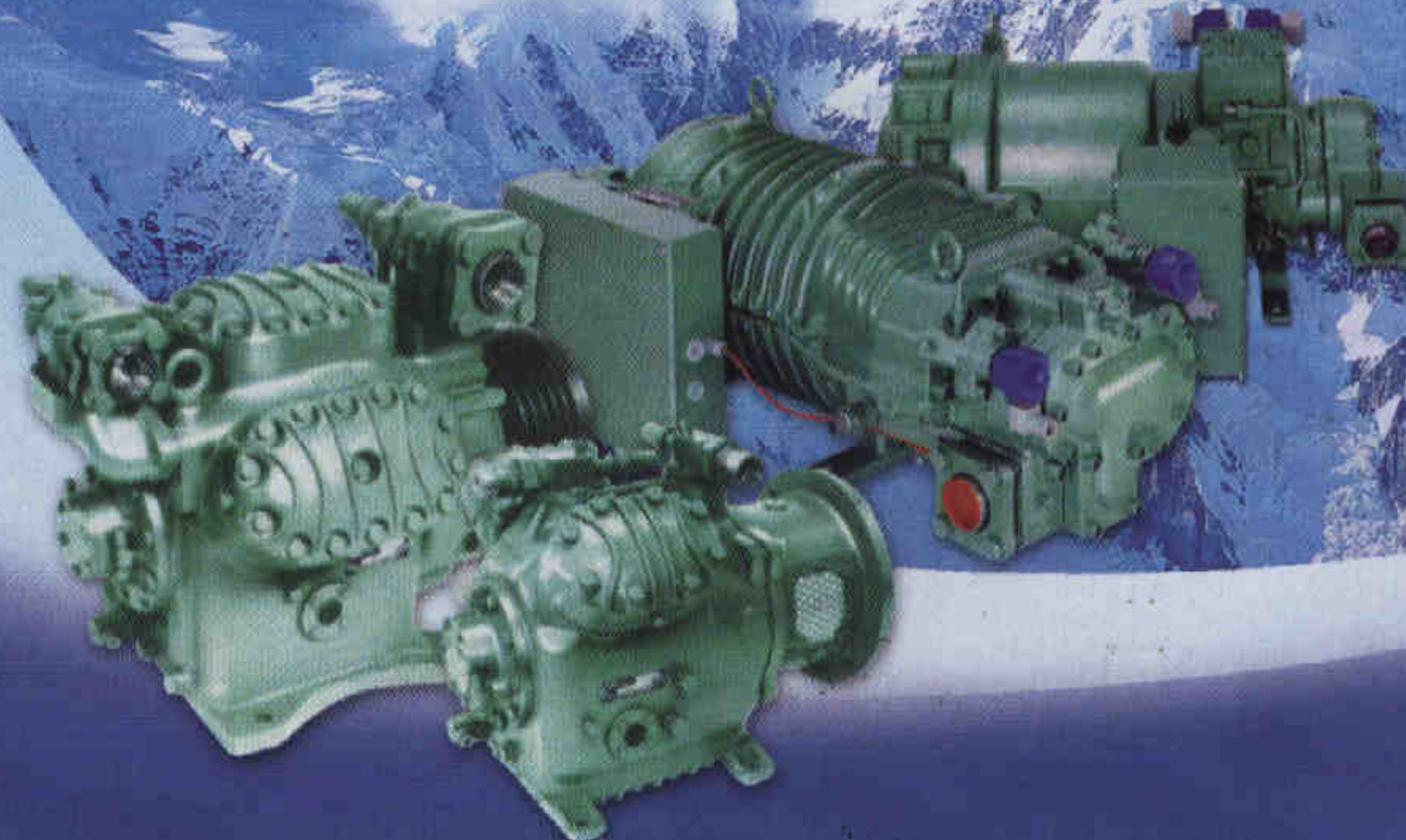


ООО "Эйркул" — ПОБЕДИТЕЛЬ
ВСЕРОССИЙСКОГО КОНКУРСА "1000
ЛУЧШИХ ПРЕДПРИЯТИЙ РОССИИ"



ПРОЕКТЫ • ПРОИЗВОДСТВО • ПОСТАВКИ • МОНТАЖ • КРУГЛОСУТОЧНЫЙ СЕРВИС
ХОЛОДИЛЬНОЕ ОБОРУДОВАНИЕ
ПРОМЫШЛЕННОЕ • КЛИМАТИЧЕСКОЕ • ТОРГОВОЕ

**ХОЛОД
ВСЕГДЕ**



9 ЛЕТ УСПЕШНОЙ РАБОТЫ НА РЫНКЕ ХОЛОДИЛЬНОГО ОБОРУДОВАНИЯ

**Центральный офис
ООО "Эйркул"**
191123, Санкт-Петербург,
ул. Шпалерная, 32-6Н
тел. +7(812) 279-9865,
тел. +7(812) 327-3821,
факс +7(812) 327-3345
info@aircool.ru,
www.aircool.ru

Производственно-монтажный комплекс
196084 С-Петербург, ул. Заставская, 14а
тел. +7(812) 371-8821, 371-8822,
факс +7(812) 371-8820

ООО "Эйркул-Дон"
г. Ростов-на-Дону, ул. Пушкинская, 54
тел./факс (8632) 40-3597, 99-9797
aircooldon@mail.ru, www.accdon.da.ru

ООО "Эйркул-Сибирь"
г. Омск, ул. Маяковского, 74, офис 211,
тел. (3812) 36-1161, факс (3812) 36-1162
aircoolsib@omskcity.com

ООО "Эйркул-Урал"
г. Ижевск, Якшур-Бодьинский тракт, 1
тел. (3412) 59-2553 факс (3412) 59-2554