

Канд. техн. наук **О.В. БЕЛЯЕВА**,  
канд. техн. наук **А.Ж. ГРЕБЕНЬКОВ**,  
д-р. техн. наук, проф. **Б.Д. ТИМОФЕЕВ**  
ГНУ ИПЭ НАНБ, г. Минск

# ВЫБОР УГЛЕВОДОРОДОВ В КАЧЕСТВЕ ХЛАДАГЕНТОВ

Обусловленная решениями Монреальского протокола необходимость замены R12 в действующем и новом холодильном оборудовании на временные альтернативные смесевые и чистые озонобезопасные хладагенты привела к появлению большого количества различных хладагентов, позволяющих решить поставленную задачу. Вместе с тем, как показывают результаты теоретических расчетов и практика, технические характеристики холодильного оборудования после ретрофита ухудшаются и возрастают эксплуатационные расходы.

Для относительной оценки эффективности холодильного цикла авторами были рассмотрены хладагенты, наиболее часто рекомендуемые в проспектах западных фирм и заводов-изготовителей в странах СНГ.

Основные термодинамические характеристики анализируемых хладагентов приведены в табл. 1. Взамен R12 и R22, значения ODP (относительная величина озоноразрушающего потенциала) которых меньше единицы, предложены смесевые хладагенты производства западных фирм и заводов России. Для ретрофита холодильного оборудования, работающего на R12, представляют практический интерес смесевые хладагенты с небольшой величиной глайда и совместимые с минеральным маслом. Менее предпочтительны хладагенты, в сочетании с которыми требуется использовать алкилбензолное или полиэфирное масла. Практически все смесевые хладагенты, за исключением "Экохола-2" и R227ea, имеют молекулярную массу, меньшую, чем у R12. В результате этого удельная работа, затрачиваемая на сжатие смесевых хладагентов, будет больше.

Проведена оценка основных показателей хладагентов, поставляемых на рынок стран СНГ, применение которых не ограничено Монреальским протоколом.

В табл. 2 даны основные параметры идеального холодильного термодинамического цикла при температурах кипения  $t_0 = -10^\circ\text{C}$  и конденсации  $t_k = 30^\circ\text{C}$ . Как видно из табл. 2, холодильный коэффициент в идеальном термодинамическом цикле достаточно высокий —  $\epsilon = 5,3 \pm 0,3$ . Это говорит о

*For the substitutes of R12 and R22 refrigerants the basic thermodynamic characteristics and calculated parameters of an ideal refrigeration cycle are given at the temperatures of  $-10^\circ\text{C}$  and  $30^\circ\text{C}$  for boiling and condensation, accordingly. For some compressors the data reported by manufacturers are analyzed and compared with the values of refrigerating factor evaluated for an ideal refrigeration cycle.*

том, что на данных хладагентах могут быть созданы эффективные холодильные агрегаты.

Для замены R12 в качестве временного решения предложены смесевые хладагенты с ODP больше 0: C10M1A, "Экохол-2", "Экохол-3", смесь 0,85R22/0,15R600a, применение которых не связано с необходимостью замены минерального масла в холодильном оборудовании. Если при использовании хладагентов R134a, C10M1A, "Экохол-3" и смеси 0,85R22/0,15R600a холодопроизводительность оборудования практически сохраняется, то при работе на смесевом хладагенте "Экохол-2" она уменьша-

ется на 15–20%\*. Хладагент R134a, наиболее близкий по теплофизическим свойствам к R12, используют, как правило, в новом оборудовании в сочетании с полиэфирным холодильным маслом.

Для замены R22 предлагаются R404A, R407C и R507a. Хладагент R507a бинарный и азеотропный, а из хладагентов R404A и R407C предпочтителен R404A, имеющий меньшее значение глайда. При выборе хладагента необходимо

\*Сухомлинов И.Я., Головин М.В., Славуцкий Д.Л., Тимофеев Б.Д., Беляева О.В.  
Использование отечественных смесей хладагентов для ретрофита холодильных машин с центробежными компрессорами // Холодильная техника. № 6/2001.

Таблица 1  
Основные термодинамические характеристики временных и постоянных заменителей R12 и R22 в холодильном компрессорном оборудовании

| Хладагент             | Компоненты                                         | Состав, мас. % | Молек. масса, г/моль | $t_{н.к.}, ^\circ\text{C}$ | $t_{к.р.}, ^\circ\text{C}$ | $p_{к.р.}, \text{МПа}$ | ODP  | GWP  | Холодильное масло |
|-----------------------|----------------------------------------------------|----------------|----------------------|----------------------------|----------------------------|------------------------|------|------|-------------------|
| R12                   | $\text{CCl}_2\text{F}_2$                           | 100            | 120,91               | -29,8                      | 111,8                      | 4,12                   | 0,9  | 8500 | М                 |
| R134a                 | $\text{CH}_2\text{F}-\text{CF}_3$                  | 100            | 102,03               | -26,1                      | 101,1                      | 4,06                   | 0,0  | 1300 | ПЭ                |
| R404A, (HP-62)        | R125/R143a/R134a                                   | 44/52/4        | 97,60                | -46,5                      | 72,1                       | 3,73                   | 0,0  | 3850 | ПЭ                |
| R407C, (Klea 66)      | R32/R125/R134a                                     | 23/25/52       | 86,20                | -43,6                      | 87,3                       | 4,82                   | 0,0  | 1370 | ПЭ                |
| R507A, (AZ-50)        | R125/R143a                                         | 50/50          | 98,36                | -46,7                      | 70,9                       | 3,79                   | 0,0  | 3900 | ПЭ                |
| R227ea, (Fm-200)      | $\text{CF}_3-\text{CHF}-\text{CF}_3$               | 100            | 170,03               | -18,3                      | 103,5                      | 2,95                   | 0,0  | 3300 | ПЭ                |
| C10M1A, (MILE "B")    | R22/R21/R142b                                      | 65/5/30        | 91,0                 | -35                        | 117                        | 5,0                    | 0,05 | 1805 | М                 |
| "Экохол-2"            | R142b/RC318                                        | 42/58          | 141,3                | -14                        | 128                        | 3,27                   | 0,04 | 4600 | М                 |
| "Экохол-3"            | R22/R142b/RC318                                    | 40/48/12       | 100                  | -33                        | 117                        | 4,5                    | 0,05 | 2730 | М                 |
| Смесь                 | R22/R600a                                          | 85/15          | 80,6                 | -41                        | 109,1                      | 4,7                    | 0,04 | 1450 | М                 |
| R152a                 | $\text{CH}_3-\text{CHF}_2$                         | 100            | 60,05                | -24                        | 113,3                      | 4,52                   | 0,0  | 140  | ПЭ                |
| R600a (изобутан)      | $(\text{CH}_3)_2\text{CH}-\text{CH}_2-\text{CH}_3$ | 100            | 58,12                | -11,8                      | 135                        | 3,65                   | 0,0  |      | М                 |
| R1270 (пропилен)      | $\text{CH}_3\text{CH}=\text{CH}_2$                 | 100            | 42,09                | -47,7                      | 92,4                       | 4,62                   | 0,0  |      | М                 |
| RC270 (циклопропилен) | $-\text{CH}_2-\text{CH}_2-\text{CH}_2-$            | 100            | 42,08                | -33,5                      | 125,2                      | 5,58                   | 0,0  |      | М                 |
| R290 (пропан)         | $\text{CH}_3-\text{CH}_2-\text{CH}_3$              | 100            | 44                   | -42,1                      | 96,8                       | 4,25                   | 0,0  |      | М                 |
| R22                   | $\text{CHClF}_2$                                   | 100            | 86,5                 | -40,8                      | 96,2                       | 4,99                   | 0,05 | 1700 | М                 |
| Смесь                 | R22/R142b                                          | 60/40          | 91,6                 | -35,3                      | 110                        | 4,8                    | 0,04 | 2000 | М                 |
| C1                    | R152a/R600a                                        | 70/30          | 63,42                | -30,0                      | 120,4                      | 4,04                   | 0,0  | 98   |                   |
| Смесь                 | R290/R600a                                         | 50/50          | 50,15                | -33,7                      | 113,2                      | 3,94                   | 0,0  |      | М                 |
| Смесь                 | R290/R600                                          | 60/40          | 48,7                 | -34,7                      | 115,6                      | 4,08                   | 0,0  |      | М                 |
| C10                   | R22/R21                                            | 50/50          | 94                   | -29,8                      | 134,1                      | 5,2                    | 0,05 | 1800 | М                 |

Примечание.  $t_{н.к.}$  — температура кипения хладагента при нормальном атмосферном давлении;  $t_{к.р.}$  и  $p_{к.р.}$  — критические температура и давление хладагента; ODP — величина озоноразрушающего потенциала относительно R11; GWP — относительная величина теплового потенциала галоидопроизводных хладагентов для 100-летнего периода; М, ПЭ — тип холодильного масла на минеральной и полиэфирной основе соответственно.

МИКОЛАЇВСЬКА ДЕРЖАВНА  
ОБЛАСНА УНІВЕРСАЛЬНА  
НАУКОВА БІБЛІОТЕКА  
ім. О. Гмирьова

Таблица 2  
Параметры идеального холодильного цикла при характерных температурах:  
 $t_0 = -10^\circ\text{C}$ ,  $t_k = 30^\circ\text{C}$

| Хладагент         | $M$ , г/моль | $p_1$ , МПа | $t_2$ , $^\circ\text{C}$ | $p_2$ , МПа | $\pi_k$ | $\rho_1$ , кг/м <sup>3</sup> | $q_1$ , кДж/кг | $q_k$ , кДж/м <sup>3</sup> | $l$ , кДж/кг | $\epsilon_{ид}$ | Глайд, $^\circ\text{C}$ |
|-------------------|--------------|-------------|--------------------------|-------------|---------|------------------------------|----------------|----------------------------|--------------|-----------------|-------------------------|
| R12               | 120,9        | 0,22        | 37,9                     | 0,74        | 3,36    | 12,9                         | 119            | 1535                       | 22           | 5,41            | 0                       |
| R134a             | 102,0        | 0,20        | 35,4                     | 0,77        | 3,85    | 9,92                         | 154            | 1528                       | 28           | 5,50            | 0                       |
| R404A             | 97,6         | 0,43        | 35                       | 1,41        | 3,28    | 21,6                         | 121            | 2614                       | 24           | 5,04            | 0,7                     |
| R407C             | 86,2         | 0,32        | 43,3                     | 1,17        | 3,66    | 13,6                         | 174            | 2366                       | 32           | 5,44            | 5,5                     |
| R507A             | 98,9         | 0,45        | 34,4                     | 1,46        | 3,24    | 23,4                         | 113            | 2644                       | 23           | 4,91            | 0                       |
| R227ea            | 170,03       | 0,13        | 30,0                     | 0,54        | 3,97    | 11,12                        | 82,9           | 922                        | 16,5         | 5,02            | 0                       |
| C10M1A (MILE "B") | 91,0         | 0,19        | 48,3                     | 0,74        | 3,89    | 8,35                         | 182            | 1520                       | 33           | 5,51            | 9                       |
| "Экохол-2"        | 141,3        | 0,13        | 30                       | 0,50        | 3,85    | 8,96                         | 105            | 941                        | 20           | 5,25            | 0                       |
| "Экохол-3"        | 100          | 0,17        | 39,6                     | 0,64        | 3,76    | 7,99                         | 166            | 1326                       | 29,6         | 5,61            | 9                       |
| 0,85R22/0,15R600a | 80,6         | 0,32        | 44,3                     | 1,08        | 3,37    | 13,0                         | 174            | 2262                       | 32           | 5,44            | 2,2                     |
| R152a             | 66,0         | 0,18        | 44,4                     | 0,69        | 3,83    | 5,85                         | 247            | 1445                       | 44           | 5,61            | 0                       |
| R600a             | 58,12        | 0,11        | 30                       | 0,40        | 3,64    | 3,01                         | 289            | 870                        | 53           | 5,45            | 0                       |
| R1270             | 42,08        | 0,43        | 40,6                     | 1,31        | 3,04    | 9,15                         | 291            | 2664                       | 54,7         | 5,32            | 0                       |
| RC270             | 42,08        | 0,25        | 49,4                     | 0,83        | 3,35    | 5,04                         | 363            | 1833                       | 64,2         | 5,67            | 0                       |
| R290              | 44,1         | 0,35        | 35,2                     | 1,08        | 3,12    | 7,64                         | 284            | 2168                       | 53,2         | 5,32            | 0                       |
| R22               | 86,5         | 0,35        | 51,8                     | 1,19        | 3,40    | 15,2                         | 167            | 2538                       | 30,5         | 5,47            | 0                       |
| 0,6R22/0,4R142b   | 91,6         | 0,19        | 56,3                     | 0,92        | 4,74    | 8,60                         | 168            | 1150                       | 38,1         | 4,42            | 8,1                     |
| 0,7R152a/0,3R600a | 63,42        | 0,22        | 36,4                     | 0,77        | 3,51    | 6,81                         | 232            | 1577                       | 42,1         | 5,5             | 0,5                     |
| 0,5R290/0,5R600a  | 51,1         | 0,18        | 40,2                     | 0,78        | 4,3     | 4,42                         | 279            | 1231                       | 62,5         | 4,30            | 7,2                     |
| 0,6R290/0,4R600   | 48,7         | 0,15        | 47,1                     | 0,80        | 5,2     | 3,57                         | 294            | 1050                       | 74,5         | 3,95            | 11,8                    |
| 0,5R22/0,5R21     | 94           | 0,10        | 88,1                     | 0,73        | 8,2     | 3,93                         | 190            | 746                        | 55,1         | 3,45            | 20                      |

Примечание.  $M$  — молекулярная масса хладагента;  $p_1$  — давление хладагента в испарителе на входе в компрессор;  $p_2$  — давление хладагента на выходе из компрессора;  $t_2$  — температура хладагента при адиабатическом сжатии на выходе из компрессора;  $\pi_k$  — степень повышения давления хладагента в компрессоре;  $\rho_1$  — плотность хладагента на входе в компрессор;  $q_1$  и  $q_k$  — удельная массовая и объемная холодопроизводительность идеального термодинамического цикла;  $l$  — удельная адиабатная работа на сжатие пара хладагента в компрессоре;  $\epsilon_{ид}$  — холодильный коэффициент идеального термодинамического цикла; Глайд — температурный диапазон фазового перехода хладагента при постоянном давлении.

Таблица 3  
Характеристики компрессоров холодильного оборудования

| Тип компрессора     | Хладагент | $t_0$ , $^\circ\text{C}$ | $t_k$ , $^\circ\text{C}$ | $Q_0$ , кВт | $L$ , кВт | $\epsilon$ | $\epsilon_{ид}$ |
|---------------------|-----------|--------------------------|--------------------------|-------------|-----------|------------|-----------------|
| Danfoss, MT-18      | R22       | -10                      | 40                       | 5,663       | 1,22      | 4,64       | 4,11            |
| Danfoss, MT-18      | R407C     | -10                      | 40                       | 5,763       | 1,11      | 5,19       | 3,93            |
| Danfoss, MT-18      | R134a     | -10                      | 40                       | 3,883       | 0,84      | 4,62       | 4,03            |
| Bitzer, 2U-3,2Y     | R134a     | -10                      | 40                       | 5,920       | 2,20      | 2,69       | 4,03            |
| Bitzer, 2DL-3,2Y    | R407C     | -10                      | 40                       | 5,550       | 2,27      | 2,42       | 5,44            |
| Bitzer, 2EL-2,2     | R22       | -10                      | 40                       | 5,900       | 2,38      | 2,48       | 4,11            |
| BOCK, HA 4/310-4    | R22       | -10                      | 30                       | 16,8        | 4,3       | 3,90       | 5,45            |
| BOCK, HAX 4/310-4   | R134a     | -10                      | 30                       | 10,5        | 3,2       | 3,28       | 5,43            |
| BOCK, HAX 3/155-4   | R404A     | -10                      | 30                       | 9,27        | 2,6       | 3,56       | 5,04            |
| BOCK, HAX 3/155-4   | R507A     | -10                      | 30                       | 9,27        | 2,6       | 3,56       | 4,91            |
| БелОМО, ХГВ-9,0     | R22       | -10                      | 30                       | 6,52        | 3,0       | 2,17       | 5,45            |
| Ярославское RGP12TB | R134a     | -15                      | 30                       | 0,545       | 0,28      | 1,95       | 4,61            |
| "Атлант", С-КМ120H2 | R134a     | -23,3                    | 54,4                     | 0,122       | 0,107     | 1,14       | 2,01            |
| Danfoss, NL7F       | R134a     | -10                      | 55                       | 0,292       | 0,226     | 1,29       | 2,00            |
| Danfoss, SC10CL     | R507A     | -10                      | 45                       | 0,750       | 0,485     | 1,55       | 2,59            |
| Danfoss, SC12CL     | R404A     | -10                      | 45                       | 0,940       | 0,595     | 1,58       | 2,91            |

Примечание.  $t_0$  и  $t_k$  — температура кипения и конденсации соответственно;  $Q_0$  — холодопроизводительность;  $L$  — адиабатная работа на сжатие пара в компрессоре;  $\epsilon$  и  $\epsilon_{ид}$  — холодильный коэффициент соответственно действительный и в идеальном цикле.

учитывать особенности конструкции и условия эксплуатации холодильного оборудования. Смесевые хладагенты рекомендуются для холодильных агрегатов с герметичным компрессором.

При использовании углеводородов из-за более низкого значения их молекулярной массы требуется разработка нового компрессорного оборудования. Термодинамические характеристики углеводородов позволяют получить по сравнению с R12 и R22 более высокие значения холодильного коэффициента в идеальном холодильном термодинамическом цикле. Вместе с тем, учитывая пожаро- и взрывоопасность углеводородов, необходимо обеспечить специальные условия для надежной эксплуатации такого оборудования.

В табл. 3 приведены паспортные характеристики некоторых холодильных компрессоров, поставляемых на рынок зарубежными фирмами и заводами-изготовителями стран СНГ. Показано, что в современных холодильных компрессорах в основном применяются хладагенты R22, R134a, R404A, R407C и R507A. К паспортным характеристикам, приводимым в рекламных проспектах, необходимо относиться критически. Так, например, холодильный коэффициент компрессоров фирмы Danfoss типа MT-18 превышает значение, соответствующее идеальному циклу, что вызывает вопрос: за счет чего получены такие показатели? Для остальных импортных компрессоров  $\epsilon/\epsilon_{ид} \approx 0,65$ . Для компрессоров БелОМО (ХГВ-9,0) и Ярославского АО "Холодмаш"  $\epsilon/\epsilon_{ид} \approx 0,41$ , а для компрессоров фирмы "Атлант"  $\epsilon/\epsilon_{ид} \approx 0,57$ . Холодильные компрессоры, производимые в странах СНГ, имеют более низкие по сравнению с компрессорами зарубежных фирм холодильные коэффициенты. Поэтому необходимо провести исследования с целью определения параметров реального холодильного цикла и теплогидравлических характеристик холодильного оборудования. Это в конечном итоге позволит разработать и внедрить технические предложения по существенному повышению его эксплуатационных характеристик на предлагаемых хладагентах.

Следует отметить пассивность рекламы хладагентов, производимых в России, которые могут достойно конкурировать с импортными хладагентами на рынке стран СНГ. Особое внимание изготовители отечественных хладагентов должны обратить на качество и цену, которые являются для потребителя определяющими при выборе продукции.