

Канд. техн. наук, проф., акад. МАХ
В.П.ЖЕЛЕЗНЫЙ,
О.Я.ХЛИЕВА, Н.П.БЫКОВЕЦ
 Одесская государственная
 академия холода

ПЕРСПЕКТИВЫ И ПРОБЛЕМЫ ПРИМЕНЕНИЯ УГЛЕВОДОРОДОВ В КАЧЕСТВЕ ХЛАДАГЕНТОВ

The prospects and problems of use of hydrocarbons in different types of refrigerating equipment have been considered. It is shown that in the evaluation of usefulness of transition of refrigerating equipment on fire hazard refrigerants one should take into consideration additional energy expenditure for the whole service life of the equipment, as well as the ecological aspects of its increased energy consumption.

В последнем десятилетии все больше внимания уделяется использованию «натуральных» веществ в качестве хладагентов. Объясняется это не только требованиями Монреальского протокола, запрещающими производство и применение озоноразрушающих веществ, но и стремлением снизить косвенный и прямой вклад в полный эквивалент глобального потепления холодильного оборудования — TEWI (Total Equivalent Warming Impact) путем выбора хладагентов, имеющих высокую энергетическую эффективность и низкий потенциал глобального потепления. В связи с этим интерес специалистов привлекают возможности более широкого использования таких «натуральных» хладагентов, как диоксид углерода, углеводороды и аммиак. Причем наибольшие перспективы применения в различных типах холодильного оборудования благодаря своим физическим, термодинамическим и токсикологическим свойствам, безусловно, имеют углеводороды. Вместе с тем у них есть один существенный недостаток — пожароопасность. Отсутствие общепризнанных методик оценки экологической целесообразности применения пожароопасных веществ является причиной принятия в ряде случаев экологически необоснованных решений и служит сдерживающим фактором при внедрении углеводородов в холодильную технику.

В качестве хладагентов углеводороды начали использовать в начале XX в. Наиболее часто холодильное оборудование заправляли пропаном. После разработки в 1930-е годы пожаробезопасных ГФУ применение в холодильной технике углеводородов постепенно практически прекратилось. Вместе с тем в последние годы наблюдается устойчивый интерес к более широкому использованию углеводородов в малых герметичных холодильных системах (прежде всего в бытовых холодильниках). Анализируются также перспективы их применения в холодильном оборудовании большой холодопроизводительности [4, 7]. Проводятся исследования по разработке новых смесевых

хладагентов на основе углеводородов [4] и смесей углеводородов с ГХФУ и ГФУ [1, 2, 6, 12].

Важной особенностью настоящего этапа развития холодильного машиностроения является наметившийся и расширяющийся раскол в технологической политике между США и Японией, с одной стороны, применяющими в холодильном оборудовании в основном ГФУ, и европейскими странами, все шире использующими углеводороды и другие натуральные хладагенты, — с другой. Государственная политика по вопросу возможности использования углеводородов в холодильном оборудовании в этих странах сильно различается. В европейских странах такой характеристике, как потенциал глобального потепления (GWP хладагента), уделяется больше внимания, чем вопросам пожароопасности в некоторых типах холодильного оборудования [10]. Различие в технологической политике между США и Европой уже нашло отражение и в стандартах [4, 9] на использование пожароопасных хладагентов.

Стандарты на использование углеводородов в качестве хладагентов отражают изменение взглядов специалистов на проблему безопасной эксплуатации оборудования и охраны окружающей среды. После начала широкого применения в качестве хладагентов ХФУ (в 1930-е годы) необходимость в пожароопасных хладагентах отпала, вследствие чего стандарты на использование углеводородов постепенно переделали таким образом, что применять их в холодильной технике стало практически невозможно. В настоящее время стандарты на использование пожароопасных хладагентов в холодильном оборудовании вновь пересматриваются, и можно сделать вывод о том, что в ближайшем будущем возможности применения углеводородов в качестве хладагентов возрастут.

В соответствии со стандартами ASHRAE 34 (США) и prEN 378 (Европа), а также с некоторыми европейскими национальными стандартами все хладагенты по пожароопасности делятся на три класса: 1 — непожароопасные; 2 — имеющие низкую пожароопасность; 3 — имеющие высокую пожароопасность. Наиболее распространенные в холодильной технике углеводороды относятся к классу 3. Пожароопасные хладагенты характеризуются такими показателями, как низший предел воспламеняемости, температура воспламенения и теплота сгорания. Основные свойства для углеводородов, наиболее широко применяемых в качестве хладагентов, приведены в таблице.

Как уже было написано выше, стандарты на использование пожароопасных хладагентов в разных странах существенно различаются. Так, стандарты США и Франции (ASHRAE15 и NF E35-400) ограничивают применение хладагентов класса 3 в промышленном оборудовании. Напротив, европейский стандарт prEN 378 и несколько национальных европейских стандартов (BS 4434, DIN 8975 и 7003) позволяют использовать в оборудовании углеводороды при обеспечении дополнительных мер, гарантирующих безопасность эксплуатации холодильной техники.

Некоторые современные стандарты по применению пожароопасных веществ основаны на ограничении количества заправляемого в холодильную систему хладагента [4, 9]. В зависимости от стандарта требуется, чтобы концентрация пожароопасного вещества при попадании в воздух всего количества заправляемого в систему хладагента не превышала 20 % (ASHRAE15 и BS 4434) или 25 % (DIN 7003) от нижнего предела воспламеняемости. Плотность углеводородов (пропан и изобутан) выше плотности воздуха, поэтому при

утечке углеводороды могут скапливаться у пола, создавая тем самым опасные концентрации [4]. Таким образом, существующие ограничения на массу заправленного в установку углеводорода не устраняют в полном объеме риск возможного возгорания.

В ряде зарубежных стандартов разрешается без ограничений использовать углеводороды при выполнении следующих условий: количество заправляемого хладагента должно быть меньше 0,15 кг, система герметична (все соединения должны быть паяными или сварными), а оборудование спроектировано таким образом, чтобы предотвратить случайные утечки в холодильную камеру [4]. Таким образом, в соответствии с этими стандартами разрешается применять углеводороды в бытовых холодильниках и морозильниках, а также в малых тепловых насосах.

Масса хладагента, заправляемого в бытовые холодильники и морозильники, незначительна, и наблюдается тенденция к ее уменьшению. Так, количество изобутана, заправляемого в современный бытовой холодильник объемом 130 л, составляет всего около 20 г, из которых примерно 12 г растворено в компрессорном масле [10]. Для сравнения отметим, что созданный в начале 1930-х годов первый бытовой холодильник содержал 250 г пропана [10].

В стандартах некоторых стран [4, 9] разрешается использование установок и с большим количеством пожароопасного хладагента, но при условии строгого соблюдения мер пожаробезопасности. Так, нет строгих ограничений на применение углеводородов при условии, что холодильный агрегат находится снаружи на открытом воздухе или в непосредственно вентилируемом пространстве (например, тепловой насос, использующий в качестве источника низкопотенциальной теплоты воздух).

Существует два основных подхода к

решению проблемы применения пожароопасных хладагентов:

1. Добавление в пожароопасные хладагенты негорючих веществ [1, 2, 6, 12]. При этом можно получить пожаробезопасную смесь, обеспечивающую лучшие энергетические характеристики оборудования, чем при использовании негорючих компонентов, входящих в состав смеси, и гарантировать необходимую взаимную растворимость смеси с минеральным маслом.

2. Соблюдение всех мер по обеспечению пожаробезопасности при эксплуатации оборудования, к числу которых относятся прежде всего меры по снижению до минимума вероятности утечек хладагента, а также организация непрерывного контроля за его утечками.

Для реализации этих мер рекомендуется [2, 6] использовать только паяные соединения труб, устранять соединения разнородных металлов, стремиться к уменьшению количества заправляемого в холодильную систему хладагента и к исключению возможных мест сбора пожароопасного газа (при утечке). Кроме того, следует применять электрооборудование в пожаровзрывобезопасном исполнении, в нерабочее время перекачивать хладагент в вынесенный наружу специальный сосуд, проводить мероприятия по защите труб теплообменников от проколов (повреждений) и др. В случае необходимости расположения холодильной установки в помещении рекомендуется заключать ее в защитный «кожух», где поддерживается давление, немного ниже атмосферного [4].

Практическая реализация всех мероприятий по обеспечению пожаробезопасности может значительно увеличить энергоемкость холодильного оборудования и, следовательно, его стоимость, которая, по оценкам [2, 6], возрастет примерно на 30 % от начальной. Кроме того, эти мероприятия могут

привести к увеличению потребления электроэнергии оборудованием [8, 11]. Например, для обеспечения пожаробезопасности автомобильных кондиционеров рекомендуется в конструкции испарителя предусматривать двойные стенки. А это мероприятие приводит к увеличению термического сопротивления в испарителе и снижению его энергетической эффективности на 4 % [11].

Более надежный способ обеспечения пожаробезопасности — использование вторичного контура, что не только увеличивает стоимость системы (по оценкам [6], более чем на 30 %), но и приводит к дополнительному расходу энергии за счет работы насоса промежуточного хладоносителя. Кроме того, из-за необходимости поддержания большей разности между температурами кипения хладагента и хладоносителя энергетическая эффективность холодильного оборудования понизится, что значительно увеличит косвенный вклад в TEWI.

В бытовых холодильниках применяют главным образом изобутан. Так, в работе [2] приведены сведения о том, что к 1996 г. 90 % всех бытовых холодильников и морозильников в Германии и 25 % по Европе в целом уже выпускали на углеводородах. В начале нынешнего столетия изобутан применяют в 35...40 % бытовых холодильников и морозильников, выпускаемых в Западной Европе, и ожидается, что его использование в будущем увеличится и распространится на другие регионы [8]. В тепловых насосах небольшой производительности широко применяют пропан. В Швеции начиная с середины 1990-х годов до наших дней было выпущено около 30 тыс. бытовых тепловых насосов малой производительности на пропане [4]. Промышленное холодильное оборудование с углеводородами в качестве хладагентов в настоящее время серийно еще почти не выпускают. Однако в Европе уже создано много образцов торгового холодильного оборудования, в том числе работающего от систем охлаждения с промежуточным хладоносителем, которые позволяют значительно уменьшить количество заправляемого углеводорода [8]. Перспективными хладагентами в этом типе оборудования считают про-

Свойства углеводородов, наиболее широко применяемых в качестве хладагентов

Хлад-агент	Название	Химическая формула	Молекулярная масса	Нормальная температура кипения, °C	Критическая температура, °C	Критическое давление, МПа	Нижний предел воспламеняемости, %	Теплота сгорания, МДж/кг	Температура воспламенения, °C	GWP за 100 лет
R170	Этан	CH_3-CH_3	30,07	-88,6	32,2	4,87	3,2	47,7	472	~20
R1270	Пропилен	$\text{CH}_3-\text{CH}=\text{CH}_2$	42,08	-47,7	92,4	4,67	2,0	49,0	455	—
R290	Пропан	$\text{CH}_3-\text{CH}_2-\text{CH}_3$	44,10	-42,1	96,7	4,25	2,3	50,3	466	~20
RC270	Циклопропан	$-\text{CH}_2-\text{CH}_2-\text{CH}_2-$	42,08	-33,5	125,2	5,58	2,4	—	495	—
R600a	Изобутан	$\text{CH}(\text{$								

пан или пропилен (C_3H_4). Существуют хорошие перспективы применения циклопропана в низкотемпературных установках [4].

Углеводороды имеют отличные термодинамические и транспортные свойства, что обеспечивает высокий холодильный коэффициент и меньшее по сравнению с основными ГФУ потребление электроэнергии оборудованием. Незначительное падение давления в теплообменниках (меньше, чем для R22) и хорошие коэффициенты теплопередачи (по сравнению с R22) [2, 4] также могут быть отнесены к преимуществам углеводородов. Кроме того, углеводороды совместимы с обычными конструкционными материалами и растворимы в минеральных и алкилбензольных маслах [2, 4]. Во многих работах [2, 4, 5, 11] есть сведения, что заправка углеводородов (изобутана и пропана) в среднем составляет около половины от заправки ГФУ (в связи с более низкой плотностью углеводородов по сравнению с ГФУ). Для холодильного оборудования на углеводородах (пропан и изобутан) выгодно использовать регенеративный теплообменник (выгоднее, чем для R22) [4, 5]. С термодинамической точки зрения пропан является отличным кандидатом для замены R22 [5]. Считается [11], что пропан на практике будет иметь хорошие энергетические показатели благодаря меньшему объемному расходу по сравнению с R600a при равной холодопроизводительности и меньшему падению давления в трубах и теплообменниках.

Кроме того, углеводороды характеризуются нулевым значением ODP, практически не вносят существенного вклада в глобальное потепление, растворяются в дешевых и удобных в эксплуатации маслах и имеют низкую стоимость [7]. Затраты на создание компрессоров на углеводородах и ГФУ одного порядка [8].

При рассмотрении влияния холодильного оборудования на процессы, связанные с экономией энергетических ресурсов, а следовательно, и с глобальным потеплением климата Земли, в пользу применения углеводородов обычно приводят следующие аргументы.

• Из-за прямого вклада ГХФУ и ГФУ в глобальное потепление создание оборудования на «натуральных», озонобезопасных хладагентах является предпочтительным (с экологической точки зрения) перед оборудованием на галоидопроизводных хладагентах.

• Натуральные хладагенты, такие, как аммиак и углеводороды, характеризуются большей энергоэффективностью, чем фторуглероды. Вместе с тем даже 2–5%-ное увеличение энергетической эффективности может иметь большее значение для экологии, чем полное исключение утечек хладагента из системы [3].

• Чтобы доказать преимущество углеводородов перед другими хладагентами, достаточно вычислить TEWI оборудования, учитывая при этом прямой вклад от утечек хладагента и косвенный вклад в глобальное потепление от эмиссии <