

МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ И НАУКИ РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ
УНИВЕРСИТЕТ ИТМО

О.Б. Цветков, О.Н. Цветков, Ю.А. Лаптев

**МАСЛА
НИЗКОТЕМПЕРАТУРНЫХ
УСТАНОВОК**

Учебно-методическое пособие

 **УНИВЕРСИТЕТ ИТМО**

Санкт-Петербург

2016

УДК 621.56

Цветков О.Б., Цветков О.Н., Лаптев Ю.А. Масла низкотемпературных установок: Учеб.-метод. пособие. – СПб.: Университет ИТМО, 2016. – 56 с.

Систематизированы вопросы, связанные со свойствами и применением минеральных и синтетических холодильных масел в современных установках искусственного холода, с проблемами фазовых переходов и взаимной растворимостью масел и хладагентов, приведены справочные данные по свойствам смазочных масел.

Предназначено для бакалавров направлений: 16.03.03 Холодильная, криогенная техника и системы жизнеобеспечения по дисциплине «Термодинамика и теплопередача»; 23.03.03 Эксплуатация транспортно–технологических машин и комплексов по дисциплине «Основы термодинамики и теплопередачи»; 14.03.01 Ядерная энергетика и теплофизика по дисциплине «Термодинамика» очной и заочной форм обучения.

Рецензент: кандидат техн. наук, проф. А.А. Малышев

Рекомендовано к печати Советом факультета холодильной, криогенной техники и кондиционирования, протокол № 1 от 31.08.2016 г.



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, 2016

© Цветков О.Б., Цветков О.Н., Лаптев Ю.А., 2016

ОСНОВНЫЕ УСЛОВНЫЕ ОБОЗНАЧЕНИЯ

M – молекулярная масса, кг/кмоль
 T – температура, К
 t – температура, °С
 p – давление, Па
 ρ – плотность, кг/м³
 V – объем, м³
 v – удельный объем, м³/кг
 h – удельная энтальпия, Дж/кг
 r – теплота парообразования, Дж/кг
 C_p – удельная массовая изобарная теплоемкость, Дж/(кг·К)
 μ, η – коэффициент динамической вязкости, Па·с
 ν – коэффициент кинематической вязкости, м²/с
 λ – коэффициент теплопроводности, Вт/(м·К)
 α – коэффициент теплоотдачи, Вт/(м²·К)
 q – плотность теплового потока, Вт/м²
 G – масса, кг
 σ – коэффициент поверхностного натяжения, Н/м
 q – тепловая нагрузка, кВт/м²
 ξ – концентрация

Индексы

о – кипение
к – конденсация
всп – вспышка (температура)
 f – застывание (температура)
м – помутнение (температура)
п – пена
ж – жидкая фаза
м – масло
см – смесь (раствор)
мас – массовый
а – хладагент

Сокращения

ODP – потенциал озоноразрушающей способности хладагента
CFC – хлорфторуглероды (ХФУ)
HCFC – гидрохлорфторуглероды (ГХФУ)

HFC – фторуглеводороды (ГФУ)
PFC – перфторуглероды (ПФУ)
ISO – международная организация по стандартизации (ИСО)
GWP – потенциал глобального потепления (ПГП)
R – обозначение хладагента по ISO
ppm – пропромиле (одна миллионная доля)
С – синтетическое масло
М, МО – минеральное масло
АВ – алкилбензольное масло
РОЕ – полиольэфирное масло
РАГ – полиалкиленгликолевое масло (ПАГ)
РАО – полиальфаолефиновое масло (ПАО, ПАОМ)
PVE – поливинилэфирное масло
PFE – перфторполиэфирное масло
РЕ – полиэфирное масло
МА – смесь алкилбензольных и минеральных масел
VI – индекс вязкости (ИВ)
ПЭТ – пентаэритритовые эфиры
ПЭС – олигоэтилсилоксаны
КМКО – комплекс методов квалификационной оценки
ВНИИ НП – Всероссийский научно-исследовательский институт
нефтяных процессов

ВВЕДЕНИЕ

Учебно-методическое пособие знакомит обучающихся с областями применения минеральных и синтетических масел, номенклатурой масел для систем искусственного холода, параметрами минеральных и синтетических масел, взаимодействием масел с холодильными агентами, маслофреоновыми растворами, которые реально циркулируют в контуре холодильных систем. Рассмотрены фазовые диаграммы растворов холодильных масел с рабочими веществами низкотемпературной техники, свойства широко используемых масел, совместимость их с конструкционными и прокладочными материалами холодильной техники.

Учебно-методическое пособие будет полезно студентам, изучающим основы техники низких температур, а также преподавателям и специалистам, работающим в этой области.

1. ХОЛОДИЛЬНЫЕ МАСЛА НАЗНАЧЕНИЕ И КЛАССИФИКАЦИЯ

В холодильной технике применяются минеральные и синтетические масла [1–9]. Среди минеральных масел наибольшее предпочтение отдается маслам, полученным из нефти с высоким содержанием циклических, т. е. нафтеновых, углеводородов. Такие масла имеют природную низкую температуру застывания и удовлетворительную совместимость с большинством хладагентов. Зарубежные предприятия, вырабатывающие холодильные масла, широко используют нафтеновую основу, производимую нефтяными компаниями путем выборочной переработки определенных сортов нефти. В российских нефтяных компаниях переработка нефти осуществляется из тех смесей, которые поступают на нефтеперерабатывающие заводы (НПЗ) по трубопроводам из Западной Сибири, т. е. преимущественно из парафиновой нефти с тем или иным соотношением парафиновых и нафтеновых фрагментов. Разумеется, и в нафтеновых, и парафиновых маслах присутствует заметное количество ароматических углеводородов (~20–35 %), поэтому весьма условно по групповому химическому составу минеральные масла можно разделить на две группы:

- 1) нафтеновые;
- 2) парафиновые.

При этом надо иметь в виду, что парафиновые и нафтеновые фрагменты не находятся в составе масел в отдельности, а представляют собой химически взаимосвязанные соединения. То же самое относится и к ароматическим углеводородам.

Синтетические масла отличаются большим разнообразием, но в качестве основы холодильных масел применяются в основном следующие:

- алкилбензолные (АБ, АВ);
- полиалкиленгликолевые (ПАГ, РАГ);
- сложноэфирные (РОЕ);
- поли- α -олефиновые (ПАОМ, РАО);
- олигоорганосилоксановые.

Помимо перечисленных на практике иногда применяются и синтетические масла, например смеси на основе алкилбензолов и минеральных масел.

Основными требованиями к маслам для холодильных компрессоров являются: термостойкость, химическая стабильность в присутствии хладагентов, смазочная способность, взаимная растворимость с холодильными агентами, электроизоляционные свойства, гидрофобность или низкая гигроскопичность, низкотемпературная текучесть, совместимость со всеми материалами холодильных машин.

В процессе работы холодильной машины масло подвергается воздействию холодильного агента в широком диапазоне температур (от минус 50 до 200 °С) в присутствии металлов. При применении фреонов класса CFC в результате термического разложения и вероятного взаимодействия продуктов разложения с маслами образуются (особенно в присутствии влаги) агрессивные продукты, вызывающие коррозию металлических поверхностей машины и нежелательные эффекты переноса меди и омеднение клапанов. Электроосаждение меди на контактах в герметичных холодильных машинах может стать причиной короткого замыкания двигателя. Термическая нестабильность масла может стать причиной появления отложений на клапанных платах и клапанах.

Техническими показателями холодильных масел по ГОСТ Р 5546 «Масла для холодильных машин. Технические условия» являются: вязкость, плотность, стабильность против окисления, коррозия стальных и медных пластин, температура вспышки в открытом тигле, температура помутнения с хладагентом, механическая стабильность, зольность, цвет, кислотное число, содержание воды.

От масла зависит надежность работы компрессора и системы в целом. Во внимание принимают также:

- показатель преломления;
- температуру критической точки;
- токсичность;
- агрессивность масла к конструкционным, уплотнительным и электроизоляционным материалам;
- концентрацию пара хладагента над раствором;
- анилиновую точку;
- коэффициент поверхностного натяжения;
- обобщенный показатель износа;
- концентрацию жидкого хладагента в растворе масло–хладагент;

- химическую стабильность масла;
- электрическое сопротивление;
- стоимость.

Выбор масла для новой холодильной машины – результат определенного компромисса между реальными свойствами масел, имеющихся на рынке, заявленными требованиями к ним и диктуемыми условиями эксплуатации машины. В большинстве случаев ни одно из масел не является полностью оптимальным для решения той или иной задачи.

По международному стандарту ISO 3448 холодильные масла классифицируются по значениям кинематической вязкости при температуре 40 °С. Единица размерности для кинематической вязкости в системе СИ – квадратный миллиметр на секунду ($\text{мм}^2/\text{с}$). В странах, не перешедших на международную систему единиц, используется прежнее название единицы кинематической вязкости – сантистокс (сСт).

Диапазон используемых масел по вязкости при 40 °С – от 10 до 200 $\text{мм}^2/\text{с}$. Вязкость применяемого масла зависит от типа и производительности холодильной машины, используемого холодильного агента, нагрузок на наиболее напряженные детали компрессора (цилиндропоршневую группу, подшипники или зубья шестерен и т. д.). В местах контактов подшипников или зубьев шестерен при высоких нагрузках возникает режим эластогидродинамической смазки, причем дискретно могут возникать локальные давления более 1 ГПа. При нагревании вязкость раствора масло–хладагент уменьшается, поэтому при недостаточной вязкости базового масла возможен разрыв масляной пленки между трущимися деталями и, как следствие, их интенсивный износ. С другой стороны, высокая вязкость масла затрудняет его циркуляцию в системе, возврат масла в компрессор, увеличивает затраты энергии на трение.

При создании холодильной машины выбор вязкости масла осуществляется на этапе опытно-конструкторских работ.

Тип масла и конструкция холодильной машины взаимосвязаны. В холодильных машинах с поршневыми компрессорами расслоение фреона и масла является неблагоприятным фактором, особенно в начальный период работы компрессора: жидкий хладагент, имеющий более высокую плотность и низкую вязкость по сравнению с маслом, быстрее попадает к смазываемым трибоповерхностям. Из-за недоста-

точности смазки возможны сухое трение и износ сопряженных деталей. Предпочтительнее использование взаиморастворимых масло-фреоновых растворов или – при несмесимости – автоматических систем, обеспечивающих бесперебойное поступление масла к узлам трения. В аммиачных и углекислотных холодильных машинах эта проблема менее существенна ввиду высокой плотности масла и наличия ресиверов, играющих роль маслоотделителей.

В машинах с винтовыми компрессорами при применении масел, не смешиваемых с хладагентом, вязкость масла остается на высоком уровне, создается надежный уплотняющий слой между винтами, в результате чего увеличивается подача хладагента и производительность компрессора. Современные машины с винтовыми компрессорами снабжаются маслоотделителями с дополнительными фазоразделительными устройствами (насадками), обеспечивающими максимальное удаление капель масла.

В агрегатах с турбокомпрессорами масло отделено от рабочего пространства лабиринтными или иными видами уплотнений и служит для смазывания и охлаждения подшипников, практически не соприкасаясь с хладагентом. В этом случае предъявляются требования к вязкости в целях обеспечения гидродинамической смазки подшипников при рабочих температурах и линейных скоростях вращения.

В США вязкость масла измеряют при 100 °F (37,8 °C). В качестве единицы измерения используют секунды Сейболта – SUS или SSO. Соотношение единиц США и ISO 3448 выглядит так: 150 SUS ≈ 32 мм²/с; 300 SUS ≈ 68 мм²/с; 450 SUS ≈ 100 мм²/с.

По международному стандарту ISO холодильные масла делятся на 9 классов в диапазоне вязкости от 10 до 200 мм²/с (табл. 1.1).

Таблица 1.1

Классы вязкости масел по ISO 3448

Класс вязкости	Вязкость кинематическая при 40 °C, мм ² /с	Класс вязкости	Вязкость кинематическая при 40 °C, мм ² /с
10	9,00–11,0	68	61,2–74,8
15	13,5–16,5	100	90,8–110
22	19,8–24,2	150	135–165
32	28,8–35,2	200	180–220
46	41,4–50,6		

Согласно классификации, в названии холодильного масла обязательно указывается число, соответствующее классу вязкости по ISO 3448. В отечественной практике в названии холодильных масел указывается число, соответствующее вязкости масел при температуре 50 °С. Кроме того, числом и (или) буквой обозначается хладагент, с которым рекомендуется данное масло применять. Например, название ХА-30 означает, что холодильное масло предназначено для аммиачных машин, вязкость у него примерно 30 мм²/с при 50 °С. Название ХФ-12-16 означает, что масло с вязкостью при 50 °С около 16 мм²/с рекомендуется для фреоновых (буква «Ф») холодильных машин, работающих на хладагенте R12. В названиях масел на синтетической основе присутствует буква «С». В частности, масло ХС-40 расшифровывается как синтетическое холодильное масло с вязкостью около 40 мм²/с при 50 °С. В масле ХС-40 обозначение хладагента не указано, поскольку оно может применяться как с аммиаком, так и с другими хладагентами, например с R290 и R600a.

В соответствии с немецким стандартом DIN 51 503–1 холодильные масла классифицируются и обозначаются в алфавитном порядке в зависимости от вида хладагента:

- КАА – холодильные масла, не растворимые в аммиаке;
- КАВ – холодильные масла, растворимые в аммиаке;
- КС – холодильные масла для частично или полностью галогенизированных (С1, Вг, I) хладагентов типа СFC, HCFC (фреоны);
- КD – холодильные масла для фреонов – хладагентов класса FC и HFC;
- KF – холодильные масла для углеводородов, например пропана или изобутана.

Важнейшее значение для холодильных масел имеет зависимость вязкости от температуры. Стандартный показатель для этой зависимости – индекс вязкости (ИВ), определяемый по ГОСТ 25371. Индекс вязкости представляет собой безразмерную величину, вычисляемую путем сравнения вязкости испытуемого масла и двух условных эталонных масел, у одного из которых индекс вязкости принят за 100, а у другого – за нуль. Индекс вязкости находят по значениям кинематической вязкости, определяемых по ГОСТ 33–2000, при температурах 40 и 100 °С. Чем выше индекс вязкости, тем меньше вязкость масла зависит от температуры. Нефтяные холодильные масла имеют индекс вязкости до 100. Индекс вязкости нефтяных масел, полученных специальными методами или загущенных полимерными присадками, а также синтетических масел обычно выше 120.

Минеральные масла на парафиновой основе имеют, как правило, высокий ИВ, т. е. около 100. Масла на нефтяной основе имеют низкий ИВ, для повышения их индекса вязкости прибегают к полимерным модификаторам вязкости. Высокий индекс вязкости важен для смазывания винтовых и турбокомпрессоров, а также для поршневых компрессоров с малой взаимной растворимостью масла и хладагента. Для поршневых компрессоров, смазываемых маслофреоновыми растворами, например компрессоров бытовых холодильников или малых торговых агрегатов, индекс вязкости масел менее важен.

О вязкости холодильных масел можно судить значениям, приведенным в табл. 1.2.

Таблица 1.2

Значения вязкости различных масел

Марка масла	Тип масла	v, мм ² /с		Марка масла	Тип масла	v, мм ² /с	
		40 °С	100 °С			40 °С	100 °С
ХА-30	М	45	6,4	ПФГОС-4	С	60–68	11,5
ХФ12-16	М	26	4,6	ПМТС-5	С	41–50	13
ХФ22-24	М	40	7	Shell Clavus 46	М	46	5,8
ХФ22с-16	С	23–25	5,3	Shell Oil 22-12	МС	40	6,5
ХС40	С	60	10	Zepinon 150	М+С	40	4,2
ХМ35	М	51–56	6,5	Zerice S 46	М	48	6,5
ФМ5,6АП	С	15–19	5	Lalinqol ХК-57	С	52–63	–

Выбор вязкости холодильного масла прежде всего связан с нагрузками, которые испытывают контактирующие поверхности. Компрессоры до 5 кВт условно считают компрессорами малой производительности, от 5 до 25 кВт – средней, а выше 25 кВт – высокой.

Для аммиачных холодильных машин применяют минеральные масла с вязкостью не менее 45–50 мм²/с при 40 °С. Для разветвленных испарительных систем с периодическим оттаиванием целесообразно применение масел с вязкостью до 60–80 мм²/с при 40 °С.

В аммиачных холодильных машинах масло, вышедшее из компрессора вместе с хладагентом, скапливается на дне испарителей и ресиверов. В таких машинах возврат масла из конденсатора и ресивера осуществляется принудительно в автоматическом или ручном режиме. В аммиачных машинах используют масла марок ХА-30, ХМ-35, Shell Clavus 46, Shell Clavus 68, ХС-40, SHC-226. В аммиачных

установках масло из маслоотделителя уносится обогащенным легкими фракциями минеральных масел. В компрессоре накапливаются тяжелые, вязкие фракции масел. Высокая вязкость благоприятна для смазки компрессора, но в картере могут скапливаться и продукты термического разложения масла, которые снижают надежность работы клапанов и уплотнений. Масло темнеет и требует замены.

Во фреоновых машинах в зависимости от холодопроизводительности используют минеральные масла вязкостью от 22 до 100 мм²/с при 40 °С. Для низких температур при использовании малорастворимых хладагентах разработаны рафинированные сорта минеральных масел (МО): Shell Clavus, Zerice S, Fuchs КМН.

В винтовых компрессорах используют масла наибольшей вязкости. Это позволяет снизить утечки в зазорах. При умеренных температурах целесообразно применять масла класса вязкости 68. Для винтовых машин с маслоотделителями применяют углеводородные синтетические масла (СУ) марок ХС-40, SHC-226 в широком диапазоне температур кипения. В кондиционерах и тепловых насосах применяют масла классов вязкости по ISO 100–200 (например, ХС-100, SHC-230, SHC-234).

Синтетические алкилбензолные масла (АВ) средней вязкости применяют в низкотемпературных холодильных машинах, работающих на любых хладагентах. Эти масла добавляют как низкотемпературный компонент в компаундные масла Zepinon 150, Shell 22-12, Shell SD, Refrigeration Oil.

Для криогенных и некоторых низкотемпературных машин применяют кремнийорганические масла: маловязкое – ФМ 5,6 АП; масла средней вязкости – ПФГОС 4, 166-43, 132-244; масла высокой вязкости – Flusil S55К.

В поршневых компрессорах, где высокая температура конденсации, для кондиционеров применяют масла с вязкостью до 60 мм²/с при 40 °С. В бытовых холодильных приборах в последние 10–15 лет наблюдалась тенденция к снижению вязкости масел. Если раньше применялось масло класса вязкости 22, то теперь в основном 15 или 10. Снижение вязкости масла создает дополнительные возможности для экономии энергии при выработке холода.

Для центробежных компрессоров рекомендуют масла с вязкостью 40–70 мм²/с, такие как ХС-30, ХС-40, ХМ-35, Shell Clavus 46, Capella, Fuchs KES, турбинные масла типа ТП-30.

Масло, растворенное в хладагенте, снижает холодопроизводительность холодильной машины. Давление раствора хладагента с маслом в испарителе ниже давления чистого хладагента при заданной температуре кипения. Например [10], для раствора R12 с минеральным маслом при $t_0 = -35,5 \text{ }^\circ\text{C}$, $t_k = 25 \text{ }^\circ\text{C}$ и $p_0 = 80 \text{ кПа}$ и массовой доле масла 2 % перед регулирующим вентилем удельная холодопроизводительность q_0 составляет лишь 89,4 % от холодопроизводительности при $-35 \text{ }^\circ\text{C}$ для чистого R12.

Требования к маслу по его взаимной растворимости с хладагентами чрезвычайно важны для герметичных агрегатов, в которых маслофреоновая смесь движется по всему контуру холодильной машины. Данная система реализуется в холодильных машинах преимущественно малой производительности.

В поршневых холодильных машинах механический унос масла в систему практически постоянен по величине. Концентрация масла в циркулирующем холодильном агенте меняется в зависимости от t_0 и t_k . С понижением температуры кипения t_0 концентрация масла резко возрастает, удельная холодопроизводительность снижается.

В машинах с винтовыми компрессорами концентрацию масла можно регулировать, изменяя количество впрыскиваемого в компрессор масла из маслоотделителя.

В системах с кожухотрубными испарителями для нормальной работы ТРВ и возврата масла обеспечивают перегрев пара на $1-5 \text{ }^\circ\text{C}$. Из испарителя масло возвращается с растворенным хладагентом в компрессор.

При пуске компрессора давление в картере резко понижается, маслофреоновая смесь вскипает, образуется пена, нарушается работа маслонасоса и всей системы смазки. При вскипании раствор в картере охлаждается ниже температуры всасывания в компрессор. Масло начинает адсорбировать хладагент, в результате чего концентрация хладагента в масле может стать выше той, которая была до пуска компрессора. Для надежности в современных компрессорах подогревают масло в картере, предусматривая наличие подогревателя.

В табл. 1.3 указаны значения индексов вязкости (безразмерная величина), температур вспышки и застывания минеральных и синтетических масел.

Синтетические масла по сравнению с минеральными обладают более низкой температурой застывания (ниже минус $50 \text{ }^\circ\text{C}$), имеют

высокий индекс вязкости. Синтетические масла совместимы с озонобезопасными HFC-хладагентами, растворяются и смешиваются с аммиаком и диоксидом углерода.

Таблица 1.3

Канонические показатели холодильных масел

Показатель	Тип масла			
	Н	П	Г	С
Вязкость, мм ² /с, при температуре: 40 °С, 100 °С	52	70	63	69
	6	8	8	10
Индекс вязкости (VI)	20	90	106	138
Температура, °С: вспышки застывания	200	220	226	248
	-40	-32	-39	-51

Примечание: Н – нефтяные минеральные масла, П – парафиновые минеральные масла, Г – гидрированные минеральные масла, С – синтетические масла.

Масло ХФС–134 (ТУ 029–004806–94) типа PAG для температур кипения 7 °С и выше имеет температуру застывания минус 51 °С и температуру помутнения минус 27 °С. Масла для этого же фреона R134a класса POE имеют соответствующие температуры от минус 44 до минус 65 °С соответственно (Clavus R32, EAL Arctic 22, Icematic SW 22, Emkarate RL Lubricant 22).

Примеры минеральных масел для традиционных CFC-хладагентов – фреонов 12 и 22 – ХФ12-16, Icematic 66 и 266, Energol LPT 32, Freol 16, Friga 2. Алкилбензольный тип масел представляют V-oil 7041 и 7054, ХК 30, Triton S32, Icematic 2282. Для этих же фреонов можно применять масла типов PAO и PAG Icematic 2293 и Serice S32 соответственно и масло типа POE Icematic SW 22.

Алкилбензольные масла характеризуются низкими температурами застывания, высокой растворяющей способностью по отношению ко многим веществам, хорошей стабильностью с хладагентами. Такие масла применяются в качестве основы масел для холодильных машин с поршневыми компрессорами, работающих на слаборастворимых в нефтяных маслах и ПАОМ фреонах. На европейском рынке преобладают алкилбензольные холодильные масла классов вязкости от 32 до 68 по ISO. Пока R22 будет использоваться, алкил-

бензолы смогут сохранять свое значение в холодильной технике как недорогие и вместе с тем эффективные смазочные масла.

Синтетические масла ПОАМ стабильны по вязкости при нагреве, имеют низкую температуру застывания ниже минус 65 °С. Примером отечественного синтетического масла может служить масло ХС-40. Данное масло получают путем каталитической олигомеризации высших α -олефинов с последующим гидрированием олигомеров. Высокий индекс вязкости ПАОМ обеспечивает лучшую текучесть в области отрицательных температур и надежный возврат масла в компрессор [8, 9].

В виду низкой температуры застывания и отсутствия хлопьеобразования в смеси с фреонами масло ХС-40 рекомендуется к применению в тандеме с низкокипящими хладагентами, в частности с R22. Вместе с тем масло ХС-40 обладает слабой взаимной растворимостью с R22. Благодаря этому между сопряженными поверхностями роторов в винтовых компрессорах сохраняется вязкая и плотная масляная пленка, достигается уплотняющий эффект, причем более сильный, чем это имеет место при использовании нефтяных масел, повышается коэффициент полезного действия винтовых компрессоров при работе на R22 с маслом ХС-40 по сравнению, например, с нефтяным маслом ХА-30, увеличивается холодопроизводительность до 15 %. Опыт применения масла ХС-40 с R22 в холодильных машинах с винтовыми компрессорами и маслоотделителями показал высокую эффективность эксплуатации оборудования с точки зрения энергопотребления, в плане надёжности и ресурса. Масло ХС-40 проявляет высокую стабильность в смеси с R134a, R125, R141b, R600a, аммиаком. Среди зарубежных аналогов маслу ХС-40 наиболее близко холодильное масло Gargoil Arctic SHC 226. Это масло, как и ХС-40, соответствует классу вязкости ISO 68, используется в нагруженных винтовых и спиральных компрессорах, работающих на синтетических хладагентах.

Во ВНИИ НП разработано высоковязкое поли- α -олефиновое масло ХС-100. Основные физико-химические показатели ХС-100 приведены в разд. 2. Масло ХС-100 после комплекса лабораторных испытаний рекомендовано для тепловых насосов.

В высокооборотных турбокомпрессорах воздушных холодильных машин открытого типа, используемых для кондиционирования воздуха в авиалайнерах, применяют масло ИТМ-10 (класс вязкости

по ИСО – 15), вырабатываемое на основе маловязких ПАОМ. Основное применение этого масла – смазка подшипников газотурбинных авиационных двигателей. Помимо хороших низкотемпературных свойств данное масло обладает высокой термоокислительной стабильностью и низкой испаряемостью, что важно при использовании его в воздушных кондиционерах открытого типа. Физико-химические свойства масла ИПМ-10 приведены в разд. 2.

Масла класса PAG получают полимеризацией окиси бутилена, пропилена или этилена. В составе PAG оксиалкильные группы, группы простых и сложных эфиров, гидроксильные группы, фторированные алкильные группы, различные присадки. Их сочетания позволяют изменять молекулярную массу масла, вязкость, взаимную растворимость с холодильными агентами. Высокомолекулярные PAG предназначены для углеводородных холодильных машин, аммиачных систем и систем с диоксидом углерода. Полигликолевые масла в отличие от минеральных масел имеют ограниченную растворимость с углеводородами, что позволяет сохранить приемлемую вязкость раствора и обеспечить смазку.

Холодильные масла на основе PAG применяются преимущественно в аммиачных холодильных машинах. Аммиак лучше всего растворяется в PAG сравнительно с минеральными маслами, поэтому в испарителе возникают благоприятные условия для теплопередачи, снижается удельный расход энергии. В России имеется удачный опыт разработки холодильного масла на основе смеси PAG и ПЭТ для бытовых холодильных машин, работающих на R134a. Такое масло марки ХФС-134 классов вязкости 22 и 32 прошло в 90-е годы XX века успешные испытания в бытовых холодильниках и морозильниках «Атлант». Масла на основе PAG не заменяются нефтяными маслами. Перед заменой нефтяного масла необходима промывка холодильной машины. Со сложными эфирами масла PAG взаимозаменяемы, т. е. перед сменой масла промывки не требуется.

Взаимная растворимость минеральных масел и углеводородов снижает вязкость масла. Как следствие, снижается толщина масляной пленки, возникает интенсивное пенообразование. Полигликолевые масла хуже растворяют минеральные масла. В присутствии воды и остатков минеральных масел использование PAG дает интенсивное пенообразование. Новейшие образцы масел на основе PAG несколько

лучше смешиваются с минеральными маслами и менее склонны к эмульгированию.

Полигликолевые масла повышают эффективность работы аммиачных теплообменных аппаратов в системе. Например, наличие пленки минерального масла в пластинчатом аммиачном морозильном аппарате может увеличить время заморозки более чем на 30 %. В аммиачном воздухоохладителе наличие минерального масла приводит к снижению температуры кипения до 3–5 градусов по сравнению с ситуацией, когда масло растворяется в аммиаке.

Масла PAG применяют в системах автомобильных кондиционеров. В последние годы для этой цели стали использовать поливинилэстеровые масла (PVE) благодаря их большей термической и химической стабильности, устойчивости к гидролизу, более высокой электрической прочности, хорошим смазывающим способностям и меньшей склонностью к эмульгированию.

Важной характеристикой масла является температура помутнения и застывания масла. С понижением температуры из минерального масла выпадают частицы парафина. Парафин имеет достаточно высокую температуру плавления, поэтому происходит осаждение парафина на холодных поверхностях. Крайне нежелательно появление парафина в коммуникационных системах и, особенно, в капиллярных трубках и дроссельных вентилях. Температуру начала кристаллизации парафинов и выпадения кристалликов называют температурой помутнения либо температурой выпадения хлопьев. Температура помутнения ниже температуры кипения в испарителе. Этой цели достигают депарафинизацией масел, а также снижением концентрации масла в хладагенте. Температуры застывания, помутнения и вспышки масел приведены в табл. 1.4.

Температура текучести определяет подвижность и характеризуется скоростью подъема масла в U-образной трубке под избыточным давлением в 50 мм вод. ст. в зависимости от температуры. Температура текучести несколько выше температуры застывания. Разница этих температур составляет 3–5 °С и более в зависимости от класса масла. Обычно температуру, соответствующую скорости подъема масла в колене трубки 10 мм/мин, принимают за температуру текучести. Температура текучести должна быть, естественно, ниже температуры кипения в испарителе.

Температурные показатели смазочных масел

Марка масла	$t_{всп}, ^\circ\text{C}$	$t_f, ^\circ\text{C}$	$t_M, ^\circ\text{C}$	Тип масла
ХА30	185	-38	-	МО
ХФ12-16	160	-40	-32	МО
ХФ22-24	125	-55	-55	МО
ХФ22с-16	225	-58	-70	С
ХС40	240	-48	-55	С
ХМ35	180	-35	-45	МО
ФМ5,6АП	247	-110	-	С
ПФГОС-4	210	-60	-	С
ПМТС-5	210	-128	-	С
Shell Clavus 46	195	-39	-50	МО
Shell Clavus 68	205	-36	-50	МО
Shell Oil 22-12	180	-36	-60	МО
Suniso 4GS	181	-32	-48	МО
Zerice S68	200	-33	-30	МО
Zerice S100	200	-33	-65	МО
EAL Arctic 22	245	< -54	-53	С
Emkarate RL 22H	240	-52	-42	С
Renico E22	236	-60	-	С
Icematic SW 22	240	-60	< -41	С
EAL Arctic 32	245	-54	-56	С
Emkarate RL32H	270	-46	-42	С
Renico E32	242	-57	-	С
Icematic SW 32	258	-54	< -50	С
Clavus Oil R32	255	-54	< -50	С
ХФС 134	200	-51	-27	С
Icematic 66	-	-36	-39	С
Icematic2293	-	< -60	< -60	С
ХК-35	180	-	-38	МО
V-Oil 7041	-	-42	-60	МО
V-Oil 7054	-	-42	-60	МО
Gargoyle Arctic 155	-	-45	-51	МО

По стандарту при температуре застывания уровень масла в пробирке диаметром 20 мм с углом наклона 45° остается неподвижен в течение 1 мин. Температура застывания масла снижается при растворении в масле фреонов. Масла с пониженным содержанием пара-

финов и ароматических углеводородов имеют более низкую температуру застывания.

В системах с неограниченной растворимостью масла и хладагента температура застывания в зависимости от концентрации маслофреонового раствора изменяется в пределах от значений для чистого масла до значений для чистого хладагента. При малых концентрациях масла в испарителях затопленного типа опасности застывания маслофреонового раствора нет. Менее определенной является ситуация в системах с ограниченной растворимостью масла при низких температурах в прямоточных змеевиковых испарителях. Одним из эффективных способов решения подобных задач может являться применение синтетических масел.

Температура вспышки минеральных масел 160–180°C. У синтетических масел более высокие температуры. Важное условие работы компрессора – температура нагнетания должна быть не менее чем на 30 градусов ниже температуры вспышки. Температура вспышки определяется по ГОСТ 4333 путем поджигания пламенем поверхности нагретого масла; температура, при которой масло воспламеняется, и является температурой вспышки. Этот показатель косвенно свидетельствует о летучести масел.

Температура вспышки масла – важнейший показатель термической стабильности и своеобразный индикатор замены масла в низкотемпературной системе, поскольку температуры деталей компрессоров холодильных машин достигают 160–220 °С и выше [1, 3, 11–14]. Даже в герметичном компрессоре бытового холодильника температура в аварийных условиях доходит до 250 °С. Контакт холодильного масла и хладагента со столь нагретыми деталями компрессора опасен. При таких температурах в присутствии воды и масла возможно разложение хладагента (к примеру, аммиака), возникновение химических реакций с образованием агрессивных органических кислот, альдегидов спиртов, восстановление, диспергирование и пиролиз хладагентов. При высоких температурах и разрушении масла в системе могут появиться метан, этилен, другие продукты дегидрирования масла, отложения кокса на деталях компрессора, обугливание силикагеля, изменяется цвет масла.

Высококачественные масла имеют светло-желтый цвет. Есть сорта масел, близких по цвету к бесцветным жидкостям. Цвет масел связан с содержанием смол, в минеральных маслах содержание смол

обычно не превышает 0,3 % и зависит от степени их очистки. Вследствие окисления при работе в холодильной системе масла постепенно темнеют. Черный цвет масла – показатель аварийной ситуации, в частности, например, при возгорании обмотки встроенного электродвигателя.

Масла ХА-30 в аммиачных машинах иногда приобретали темный цвет уже через 100–200 ч работы. Изменение цвета говорит о нарушении герметичности или о несоответствии качества масла или аммиака требуемым характеристикам. Обычно стандартное масло ХМ-30 в машинах с герметичными и бессальниковыми компрессорами практически не меняет своих характеристик в течение нескольких тысяч часов работы.

Масло является основным источником минеральных и органических кислот в холодильной системе. От органических кислот зависит кислотное число масла. Для масел высокого качества кислотное число не превышает 0,03–0,05 мг КОН/г масла. От содержания кислот в масле зависит надежность систем, особенно герметичных со встроенными электродвигателями. По данным работ [5, 11, 13], для хладагента R22 при кислотности масла около 0,06 мг КОН /г масла доля сгоревших электродвигателей составляет всего несколько процентов, а при кислотности 0,10 мг КОН/г масла – 20 %. В процессе эксплуатации холодильной установки кислотное число масла возрастает, что является серьезным поводом для решения вопроса о его замене [10, 14, 15]. Обычно в рабочей документации на эксплуатацию холодильных машин указывается предельное кислотное число масел.

В результате окисления масла могут появиться осадки смол, частичек кокса, нарушается работа холодильной машины. Присутствие смолы и серы в масле способствует процессу омеднения. Согласно одной из гипотез [5], омеднение не происходит, если в масле менее 0,3 % смолистых веществ и не более 0,2 % серы. В присутствии этих соединений масло может растворять медь. Присутствие влаги и продуктов окисления масла резко увеличивают растворимость меди. Медь осаждается на стальных поверхностях, а железо переходит в раствор. Покрываются, прежде всего, чистые шлифованные поверхности трения, где зазоры крайне малы, что может вызвать механические повреждения и задиры. Эксплуатационные качества деталей компрессоров и узлов холодильных машин, подвергшихся омеднению, практически не восстанавливаются.

Присутствие воды в масле, строго говоря, должно быть исключено. Замерзшая вода может закупорить дроссельный вентиль и дроссельные капилляры. Вода – катализатор многих химических реакций, происходящих в маслах и хладагентах. Содержание влаги в масле должно составлять не более 20 ppm (20 частей на миллион частей масла!). При концентрации воды ≥ 25 ppm в присутствии атомов хлора, фтора или брома холодильная система получает в результате гидролиза активные кислоты HCl, HF и HBr. При окислении масел появляются также органические кислоты, которые в присутствии воды резко увеличивают коррозионную активность.

Растворимость воды в углеводородах зависит от их химического строения и молекулярной массы. Тяжелые углеводороды растворяют воду хуже, чем углеводороды того же гомологического ряда, но имеющие меньшую молекулярную массу. Наилучшей способностью растворять воду обладают непредельные и ароматические углеводороды, наихудшей – парафиновые углеводороды. При нагреве растворимость воды в масле возрастает.

Синтетические масла значительно гигроскопичнее минеральных и углеводородных масел. Полиэфирные и полиалкаленгликолевые масла – активные поглотители влаги. Способность поглощать воду зависит от влажности воздуха, в контакте с которым находится масло. Обезвоженное масло чрезвычайно гигроскопично. Контакт такого масла с наружным воздухом нежелателен, особенно, если речь идет о полиалкаленгликолевых маслах.

Наличие воды изменяет электроизоляционные свойства масла. Величина электрической проводимости холодильных масел составляет 10^{-12} – 10^{-18} См⁻¹·м⁻¹. Диэлектрическая постоянная минеральных масел – 2,26; синтетических масел – 2,17. На диэлектрическую прочность масел влияют концентрация воды, форма ее присутствия (в растворенном или эмульгированном виде), наличие механических примесей в масле, температура и другие факторы.

Масла и холодильные агенты должны проверяться на влажность. Должны контролироваться также узлы и детали холодильной системы, прокладочные и уплотнительные материалы. Даже слабая концентрация воды в масле повышает скорость коррозии под влиянием образующихся в масле низкомолекулярных органических кислот более чем в 20 раз [5].

2. ФИЗИКО-ХИМИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА МАСЕЛ

Физико-химические свойства синтетических и минеральных масел значительно отличаются друг от друга. Этот факт надо учитывать при выборе того или иного холодильного масла для практического применения.

В табл. 2.1–2.13 приведены свойства ряда наиболее используемых в низкотемпературной технике масел. Составлены таблицы на основе данных источников [2, 3, 8, 9, 12, 15].

Таблица 2.1

Значения коэффициентов поверхностного натяжения масел, мН/м

Температура, °С	Марка масла				
	Planetelf ACD 100 FY	ХМИ АЗМОЛ	Lunaria FR 32	XC-15	XC-40
–33,15	31,35	34,8	35,64	37,82	32,83
–23,15	30,63	33,91	34,73	36,93	32,09
16,85	27,82	30,46	31,24	33,46	29,20
56,85	25,14	27,17	27,89	30,12	26,42
96,85	22,57	24,02	24,69	26,90	23,74

Таблица 2.2

Характеристики масел EAL Arctic Mobil, Icematic SW22 Castrol

Показатель	Марка масла	
	EAL Arctic Mobil	Icematic SW22 Castrol
Тип масла	POE (E)	POE (E)
Вязкость, сСт, при температуре:		
40 °С	23,6	22,0
100 °С	4,7	4,7
Индекс вязкости	116	132
Температура, °С:		
вспышки,	245	240
застывания	< –54	–60
помутнения (с R134a)	–53	< –41
Плотность, г/см ³	0,995	1,000
Содержание воды, ppm	< 50	50
Кислотность, мг КОН/г масла	< 0,1	0,15

Характеристики масел ХФ 12-16, ХФ 22-24, ХФ 22с-16

Показатель	Марка масла		
	ХФ 12-16	ХФ 22-24	ХФ 22с-16
Тип масла	МО	МО	С
Вязкость, мм ² /с, при температуре:			
40 °С	26	40	23–25
100 °С	4,6	7	5,3
Температура, °С:			
застывания	–40	–55	–58
текучести	–38	–52	–54
помутнения (хлопьевыпадения)	–32	–55	–70
вспышки	160	125	225
Плотность при температуре 20 °С, г/см ³	0,874	0,883	0,994
Кислотное число, мг КОН/1 г масла	0,03	0,05	–
Анилиновая точка, °С	105	81	–
Цвет, ед. ЦНТ	2	2,5	4,5
Поверхностное натяжение при температуре 50 °С, 10 ³ Н/м	23	24	25
Противоизносные качества	3	2	4
Стабильность с хладагентом	4	1	3
Рекомендуется применять с хладагентом	R12	R22	R12/R22, R22, R502

Примечания:

1. Анилиновая точка используется для качественной оценки содержания алифатических углеводородов (чем выше анилиновая точка, тем больше концентрация алифатических углеводородов) и характеризует критическую температуру растворения смеси углеводородов масла в анилине, выше которой указанные компоненты образуют гомогенный раствор.

2. Цвет – визуальный показатель состава масла и степени его очистки от смолистых веществ. Высококачественные «светлые» масла с содержанием смол до 0,3 % имеют светло-желтый цвет и не более 1,5 ед. ЦНТ по ГОСТ 2028–74.

Таблица 2.4

Теплофизические свойства масел

Марка масла	Свойство	Температура, °С				
		-33,15	-23,15	16,85	56,85	96,85
XC15	ρ , кг/м ³	867,41	860,73	834,41	808,45	782,54
	ν , мм ² /с	2595,35	826,93	44,38	10,03	4,41
	C_p , кал/(г·К)	0,4425	0,4503	0,4832	0,5193	0,5588
XC40	ρ , кг/м ³	871,08	864,57	838,95	813,76	788,7
	ν , мм ² /с	27700	7318	212,66	31,41	10,3
	C_p , кал/(г·К)	0,462	0,4693	0,5081	0,5335	0,5698
ХМИ АЗМОЛ	ρ , кг/м ³	913,69	906,75	879,26	851,91	824,35
	ν , мм ² /с	1401,05	453,86	26,64	6,18	2,57
	C_p , кал/(г·К)	0,4209	0,428	0,4577	0,4902	0,5257
Planetelf ACD 100 FY	ρ , кг/м ³	1011,4	1003,86	974,19	944,97	915,85
	ν , мм ² /с	197100	37000	468,25	46,46	12,02
	C_p , кал/(г·К)	0,4091	0,4149	0,4394	0,4659	0,4945
Lunaria FR 32	ρ , кг/м ³	935,12	928,31	901,38	874,67	847,85
	ν , мм ² /с	58200	10150	135,09	16,29	4,95

Таблица 2.5

Характеристика холодильного масла Planetelf PAG 488

Показатель	PAG 488
Цвет	Голубой
Вязкость, мм ² /с, при температуре:	
40 °С	130
100 °С	26
Температура, °С:	
застывания	-44
вспышки	204
Плотность при температуре 20 °С, г/см ³	1,05

Таблица 2.6

Характеристики холодильных масел ХС-40 и ХС-40М*

Показатель	Стандарт	Марка масла	
		ХС-40	ХС-40М
Класс вязкости	ISO 3448	68	68
Вязкость кинематическая при температуре 50 °С, мм ² /с	ГОСТ 33–82	37–42	37–42
Индекс вязкости, не менее	ГОСТ 25371–82	113	120
Температура, °С: вспышки в открытом тигле, не менее	ГОСТ 4333–87	200	200
застывания, не выше	ГОСТ 20287–74	–50	–55
Плотность при температуре 20 °С, г/см ³	ГОСТ 3900–85	0,840–0,860	0,830–0,850
Содержание, %: воды	ГОСТ 1547–84	Нет	Нет
механических примесей	ГОСТ 6370–83	Нет	Нет
Кислотное число, мг КОН/ 1 г масла, не более	ГОСТ 5985–79	0,02	Нет
Зольность, %, не более	ГОСТ 1461–75	0,02	–
Цвет, ед. ЦНТ, не более	ГОСТ 20284–74	1,0	1,0

* См. прим. 2 к табл. 2.3.

Таблица 2.7

Характеристика холодильного масла PAG 244

Показатель	PAG 244
Цвет	Прозрачный с желтоватым оттенком
Вязкость, мм ² /с, при температуре: 40 °С	53
100 °С	10
Содержание воды, %	0,1 (max)
Температура, °С: застывания	–48
вспышки	268
Плотность при температуре 20 °С, г/см ³	0,99

Характеристика масла ИПМ-10

Показатель	Нормы ТУ 38.1011299–90
Вязкость кинематическая, мм ² /с, при температуре: 100 °С минус 40 °С	Не менее 3,0 Не более 3000
Температура, °С: застывания вспышки в открытом тигле	< –50 > 190
Кислотное число, мг КОН/г масла	Не более 0,1
Содержание, %: водорастворимых кислот и щелочей механических примесей	Отсутствие Отсутствие
Массовая доля воды	Отсутствие
Термоокислительная стабильность при 200 °С в течение 50 ч: а) вязкость при 100 °С после окисления, мм ² /с б) вязкость при –40 °С после окисления, мм ² /с в) кислотное число после окисления, мг КОН/г масла г) осадок, не растворимый в изооктане, % д) коррозия на пластинах после окисления, мг/см ² : сталь ШХ-15 по ГОСТ 861–73 медь М-1 или М-2 по ГОСТ 859–78 алюминиевый сплав АК-4 по ГОСТ 4784–74	Не более 5,0 Не более 5000 Не более 8,0 Не более 0,35 Отсутствие ±0,2 Отсутствие
Плотность при температуре 20 °С, г/см ³	Не менее 0,820
Трибологические характеристики, определяемые на ЧШМ при температуре окружающей среды: критическая нагрузка P_k , кгс показатель износа $D_{и}$ при осевой нагрузке 20 кгс, мм	Не менее 71 Не более 0,35

Таблица 2.9

Теплофизические свойства раствора фреона R12–масло ХФ-12

ξ_a	C_p , кДж/(кг·К)	r , кДж/кг	λ , Вт/(м·К)	$\nu \cdot 10^6$, м ² /с	$\sigma \cdot 10^3$, Н/м
$t = 20 \text{ }^\circ\text{C}$					
0	1,738	–	0,1250	77,0	29,03
0,1	1,658	–	0,1163	18,0	24,32
0,2	1,566	–	0,1085	7,0	20,00
0,3	1,482	–	0,1012	3,6	18,09
0,4	1,394	111,4	0,0948	2,36	16,23
0,5	1,310	122,2	0,0890	1,55	14,51
0,6	1,222	129,0	0,0840	0,98	13,04
0,7	1,139	133,1	0,0799	0,64	11,77
0,8	1,047	136,9	0,0763	0,41	10,79
0,9	0,988	138,7	0,0737	0,26	10,00
1,0	0,963	140,7	0,0720	0,20	9,81
$t = 0 \text{ }^\circ\text{C}$					
0	1,670	–	0,126	340,0	30,79
0,1	1,583	–	0,119	52,0	26,38
0,2	1,536	–	0,112	14,0	22,56
0,3	1,457	–	0,106	5,6	20,69
0,4	1,331	140,7	0,100	2,8	18,83
0,5	1,252	144,0	0,095	1,9	17,26
0,6	1,164	148,2	0,091	1,2	15,49
0,7	1,080	150,7	0,088	0,78	14,32
0,8	0,992	153,2	0,085	0,50	13,34
0,9	0,950	154,9	0,082	0,32	12,94
1,0	0,934	156,6	0,081	0,21	12,75
$t = 20 \text{ }^\circ\text{C}$					
0	1,604	–	0,126	2500,0	33,34
0,1	1,520	–	0,120	110,0	28,54
0,2	1,440	–	0,115	22,0	24,42
0,3	1,352	–	0,109	7,1	23,54
0,4	1,231	157,4	0,106	3,3	21,48
0,5	1,197	159,1	0,102	2,2	20,00
0,6	1,110	160,4	0,099	1,39	18,14
0,7	1,026	162,0	0,095	0,89	16,87
0,8	0,946	162,0	0,093	0,57	15,98
0,9	0,913	162,0	0,092	0,36	15,49
1,0	0,904	162,0	0,091	0,24	15,10

Таблица 2.10

Характеристика холодильного масла ХС-100

Показатель	ХС-100
Вязкость кинематическая, мм ² /с, при температуре: 40 °С 50 °С 100 °С	90–110 Не нормируется Не менее 12,0
Индекс вязкости, не ниже	125
Температура, °С: застывания, не выше вспышки, определяемая в открытом тигле, не ниже	Минус 50 200
Испытание на коррозию пластинок из стали и меди (ГОСТ 2917)	Выдерживает
Кислотное число, мг КОН/г масла	Отсутствие
Содержание, %: воды механических примесей	Отсутствие Отсутствие
Плотность при температуре 20 °С, г/см ³	Не нормируется

Таблица 2.11

Физико-химические свойства пентаэритритовых эфиров (ПЭТ)

Показатель	Значение
Вязкость кинематическая, мм ² /с, при температуре: 100 °С –40 °С	5,1 7000
Индекс вязкости	135
Температура, °С : застывания вспышки	–60 260
Кислотное число, мг КОН/г масла	0,05
Гидроксильное число, мг КОН/г масла	1
Испаряемость по НОАК	6

Таблица 2.12

Физико-химические свойства ПАГ

Вязкость при 100 °С, мм ² /с	Вязкость при 40 °С, мм ² /с	Индекс вязкости	Температура застывания, °С	Температура вспышки, °С
3	12	103	-53	170
6	28	168	-28	228
11	58	185	-40	226
17	92	201	-42	230
25	145	207	-45	224
30	180	209	-35	224
39	235	219	-34	226
65	387	242	-23	232
75	460	244	-24	234

Таблица 2.13

Свойства олигоорганосилоксановых масел

Название жидкости	Вязкость при 20 °С, м ² /с	Температура вспышки, °С	Температура застывания, °С
ПМС-5	5	130	-68
ПМС-10	10	180	-68
ПМС-25	25	215	-66
ПМС-10р	10	170	-125
ПМС-20р	20	200	-115
ПМС-200А	1000	250	-60
ПЭС-3	14-17	125	-110
Жидкость № 7	44-49	195	-100
ПЭС-5	200-500	260	-96
ФМ-5 (6)	16	250	-120
Сополимер-3 (20)	230-400	325	-60
ПФМС-4 (53)	600-1000	335	-20

Примечание. В скобках дано содержание С₆Н₅-групп на молекулу масла.

3. ВЫБОР МАСЕЛ ДЛЯ НИЗКОТЕМПЕРАТУРНЫХ СИСТЕМ

При выборе смазочного масла необходимо иметь в виду две довольно противоречивые тенденции:

– лучшие условия смазки и уплотнения компрессоров можно достигнуть при использовании масел с незначительной растворимостью в хладагентах;

– нормальная циркуляция масла в холодильной установке обеспечивается в результате неограниченной взаимной растворимости масла с хладагентом.

Хладагент понижает вязкость масла, способствуя его циркуляции в системе. От растворимости хладагента в масле зависит вспениваемость масел. При резком падении давления происходит «вскипание» раствора, масло вспенивается, разрушается масляная пленка, ухудшается смазка, возможен выброс масла из картера компрессора. Вспенивание возможно в дроссельном устройстве, при впрыске масла в рабочую полость винтового компрессора. Пенообразование стабилизируется с повышением температуры и понижением вязкости масла; применяют пеногасящие присадки (например, силиконовые жидкости), подогревают масло в картере компрессора, чтобы снизить количество растворенного в нем хладагента.

Пенообразование характеризует коэффициент пенообразования $K_{\text{п}}$:

$$K_{\text{п}} = \frac{V_{\text{п}}}{V_{\text{ж}}},$$

где $V_{\text{п}}$ и $V_{\text{ж}}$ – объемы пены и жидкой фазы.

В табл. 3.1 и 3.2 приведены данные по пенообразованию масел в растворах с R22, R134a, R290, R717, DME и R723. В диапазоне концентраций 80–90 % масла отмечены пики пенообразования [16].

Как видно из табл. 3.1 и 3.2, способность к пенообразованию системы R22–минеральное масло наибольшая. У раствора R723 с маслом PAG $K_{\text{п}} = 0$ и существенно больше в растворе с MO.

Масло влияет и на процессы теплообмена в аппаратах низкотемпературных установок. Согласно работе [16], при концентрациях масла в растворе менее 6 % коэффициент теплоотдачи при кипении на пучке гладких труб может увеличиваться, уменьшаться, даже ос-

таваться неизменным. Для кипящих растворов хладагентов R12 или R22 с минеральным маслом при $t_0 \leq 0$ °С и тепловых нагрузках q менее 6 кВт/м² ($\xi_m \leq 6$ %) полагают, что по сравнению с чистыми хладагентами коэффициент теплоотдачи не меняется. Если концентрация масла ξ_m более 6 %, коэффициент теплоотдачи при кипении масло-фреоновых растворов уменьшается [17].

Таблица 3.1

Показатели масел, исследованных на пенообразование

Показатель	Тип масла		
	МО	PAG	POE
Плотность, кг/м ³ : при 20 °С при 40 °С	892,0 879,1	991,6 975,9	1033,9 1017,7
Вязкость, мм ² /с: при 20 °С при 40 °С	250 70	184 72	84 34
Поверхностное натяжение, Н/м: при 20 °С при 40 °С	24,9 23,4	33,2 31,9	30,4 28,9

Таблица 3.2

Максимальные значения коэффициентов ($K_{п\ max}$) пенообразования для растворов масло–хладагент

Раствор	$K_{п\ max}$	Раствор	$K_{п\ max}$	Раствор	$K_{п, max}$
R22–МО	16,5	R723–PAG	0	R723–МО	8,8
R134a–POE	15,4	R717–МО	11,8	R717–PAG	3,0
R290–МО	15,0	DME–МО	9,5		

Для системы 10 % веретенного масла–аммиак при температуре $t_0 = -20$ °С и нагрузке $q = 3 \div 10$ кВт/м² коэффициент теплоотдачи при кипении смеси уменьшается на 13 % по сравнению с коэффициентом теплоотдачи кипящего чистого аммиака.

Значения коэффициентов теплоотдачи при кипении R12 или R22 с маслом на трехрядном пучке оребренных труб были в 1,05–1,3 раза больше значений коэффициентов теплоотдачи при ки-

пении чистых R12 и R22 на том же пучке оребренных труб. Эти данные получены для $q = 4 \div 8$ кВт/м² и $\xi_m = 3 \div 8$ %. В случае $\xi_m \geq 8$ % коэффициенты теплоотдачи кипящего раствора были ниже в сравнении с коэффициентом теплоотдачи кипящих чистых фреонов при температурах -20 и -10 °С. При указанных температурах и $q = 4$ кВт/м² снижение составило соответственно 1 и 10 % у R22 и 10 и 16 % у R12 [16].

Для маслофреоновых растворов, кипящих внутри труб паровых холодильных машин ($q = 1 \div 6$ кВт/м², $\xi_m < 7 \div 10$ %), коэффициент теплоотдачи на начальном участке трубы, где концентрация масла наименьшая, повышается. По мере выкипания хладагента (ξ_m возрастает) теплоотдача ухудшается. Условия теплоотдачи меняются по длине канала в зависимости от режима кипения. Исследователи в целом отмечали снижение коэффициентов теплоотдачи кипящего раствора при $\xi_m > 3$ %. В случае, когда концентрация масла не превышала трех процентов для $x < 0,45$, наблюдали рост коэффициентов теплоотдачи на 10–15 %, в частности, по мнению исследователей, благодаря эффекту пенообразования.

Для однозначных оценок экспериментальных данных по кипению маслофреоновых растворов недостаточно. Нередко полагают $\alpha_{см} = \alpha_0$ кипящего чистого хладагента.

Значения коэффициентов теплоотдачи при конденсации маслофреоновых растворов близки к значениям коэффициентов теплоотдачи при конденсации чистых хладагентов, так как большинство фреонов растворяют масло при температурах конденсации.

В аммиачных машинах масло скапливается в нижней части конденсатора или ресивера. Замасливание создает дополнительное термическое сопротивление теплоотдаче, как следствие, возрастает температура конденсации. Вместе с тем в ряде экспериментальных работ отмечают, что в таких конденсаторах масла окисляются и приобретают свойства поверхностно-активных веществ. В итоге снижается коэффициент поверхностного натяжения, изменяется режим течения пленки конденсата, более того, может возрасти коэффициент теплоотдачи.

Показатели масла можно улучшить, используя антиокислительные, противокоррозионные, противозадирные, пеногасящие, противоизносные синтетические присадки (до 5 %) [2, 12].

С учетом присадок и добавок в холодильной системе появляется целый «букет» масел и химических соединений. При замене и добавке холодильных масел необходимо следовать руководящим документам. Необязательно, что масла даже одного класса, но полученные от разных фирм-производителей, совместимы: при эксплуатации смеси разных масел могут образовывать гели, что может привести к ухудшению работы или даже выходу из строя компрессора.

При замене хладагента R12 на R134a минеральное масло заменяют на синтетическое. Остатки минерального масла в системе не должны превышать 1 % от первоначальной заправки. С минеральными маслами лучше смешиваются алкилбензолные масла.

Имеется группа присадок для снижения износа деталей компрессора и интенсификации процесса теплопередачи в аппаратах холодильных установок. Ряд присадок содержит поляризованные молекулы, имеющие сильное химическое сродство с молекулами металла [12]. Например, слой молекул присадки PROA покрывает металлические поверхности, улучшает смазку сопрягаемых деталей компрессора, снижает термическое сопротивление масляной пленки на поверхности теплообменного аппарата. Для компрессоров, работающих на углеводородах, применяются нефтяные или синтетические масла с противоизносными присадками, так как углеводородные хладагенты разбавляют масла и снижают их трибологические свойства, чего не происходит, когда применяются хладагенты класса CFC, поскольку последние, благодаря атомам хлора, сами обладают противоизносными свойствами.

О совместимости тех или иных хладагентов с маслами можно судить по табл. 3.3, обобщающей ряд литературных данных и материалов фирменных каталогов.

Высокую степень совместимости обеспечивают синтетические и полусинтетические масла. Прежде всего это относится к алкилбензолным маслам и CFC-, HCFC- и HFC-классам хладагентов.

Для озонобезопасных HFC-хладагентов (R134a, R407C, R410A, R404A и др.) пригодны полиэфирные масла (POE). В автомобильных кондиционерах, работающих на хладагенте R134a, удачно применяют полиалкиленгликолевые масла (PAG).

Выбор масла требует серьезного внимания. Полезно сделать анализ пробы заправляемого масла. Не секрет, что образцы поставляемых масел не всегда удовлетворяют требованиям стандарта. Са-

мый тривиальный пример – чрезмерное присутствие влаги в маслах, особенно в синтетических [2]. Насыщение влагой синтетических масел происходит необычайно быстро. Так, в течение суток концентрация влаги в масле PAG достигает уровня 5000 ppm (1 ppm = 10^{-4} мас. %), т. е. в масле может находиться до 0,5 % по массе воды.

Таблица 3.3

Совместимость хладагентов и смазочных масел

Вид хладагента	Тип смазочного масла	Примеры совместимых хладагентов
Озоноразрушающие хладагенты – ГФУ(СFC), ГХФУ (HCFC)	MO*, A*, MA*, PAO, POE	R12, R22, R502, R13, R123, R503, R142в, R21, R141в и др.
Смеси для ретрофита	MO, A*, MA*, POE	R402A, R402B, R401A и др.
Озонобезопасные хладагенты и их смеси – ГФУ(HFC)	PVE*, POE*, PAG, A	R134a, R125, R404A, R507, R407C, R410A и др.
Природные хладагенты, разрешенные Киотским протоколом	MO*, PAG, A*, MA*, PAO*, POE*	R717, R290, R723, RE170, R744, R600a и др.

Примечание. MO – минеральные масла; A – алкилбензолные масла; MA – смесь минеральных и алкилбензолных масел; PAO, POE, PAG, PVE – синтетические масла. Знаком «*» отмечены чаще всего применяемые масла.

За первый час концентрация влаги, поглощенной маслом PAG из воздуха, возрастает от 50 до 700 ppm. Масло из вскрытой емкости надо использовать немедленно. При хранении и транспортировке синтетических масел свободное пространство емкости заполняют сухим инертным газом под избыточным давлением. Холодильное масло фасуют в тару, близкую по массе к той, которая нужна для зарядки системы.

На предприятиях, выпускающих герметичные маслозаполненные холодильные агрегаты, поступающее масло дополнительно подвергают осушке нагреванием в пленочном испарителе, а заправку агрегатов или компрессоров осуществляют в сухих камерах.

Современные синтетические масла не дешевы. Цена заправки бытового холодильника на R134a до 70 % определяется ценой масла, а масса заправляемого масла может превышать массу хладагента [6].

В табл. 3.4 приводятся показатели предельного влагосодержания холодильных масел [2, 3, 12].

Таблица 3.4

Влагосодержание в холодильных маслах

Марка масла	Предельное содержание влаги, ppm	Тип масла	Температура, °С
ХФ22с-16	1200	С	25
ХФ12-16	110	МО	25
ХФ22-24	600	МО	25
ХФС-134	21000	С	20
SW22 Castrol	4000	С	20

В процессе эксплуатации холодильной установки изменяются многие показатели масел: вязкость, кислотное число, цвет, плотность; появляются механические примеси.

Цвет масла (в единицах ПНТ или NPA) не должен быть более 4–5, а кислотное число (мг КОН на 1 г масла) не более 0,1–0,2. Изменение вязкости масла допускается не более 10–15 %, а плотности – не более $\pm 0,02$ – $0,03$ г/см³. Механических примесей в масле допускается не более 0,05–0,15 %.

Моторесурс масел – от 1 до 25000 ч. При этом масло не должно разрушать материалы прокладок и проявлять агрессивность по отношению к конструкционным и электроизоляционным материалам. Перед сменой масла, особенно при ретрофите, необходимо убедиться, что новое масло совместимо с конструкционными материалами и не вызовет набухания, сморщивания прокладок, их разрыва и т. д. Некоторые рекомендации [2, 3, 12] при решении подобных вопросов сведены в табл. 3.5 по шкале оценок: 5 – отлично, 4 – хорошо, 3 – удовлетворительно, 2 – неудовлетворительно.

В табл. 3.6 показатели масел ранжированы согласно оценкам литературных источников [1, 2, 4, 6, 11–14, 18]. Минимальное значение показателя обозначено *N*, желаемое максимальное значение показателя – *X*.

Холодильные масла – малотоксичные жидкости, имеющие 4-й класс опасности. Новые холодильные масла в обязательном порядке проходят токсикологические испытания. В холодильных машинах для кондициони-

рования помещений холодильные масла проходят дополнительную специальную токсикологическую экспертизу. Отработанные холодильные масла после удаления из них хладагента могут быть подвергнуты регенерации и далее использоваться в качестве компонентов промышленных масел.

Таблица 3.5

Холодильные масла и материалы

Материал прокладки	Тип масла			
	МО	РАО	РАГ	Эфирные масла
Натуральная резина (NR)	2	2	2	2
Изопрен (IR)	2	2	4	2
Акрилонитрилбутадиен (NBR)	5	4	3	4
Стирол-бутадиен (SBR)	2	2	5	2
Хлоропрен (CR)	3	4	2	2
Бутил (IIR)	2	2	3	3
Силикон (VMQ)	3	4	4	5
Фторсиликон (FVMQ)	5	5	5	5
Фторуглерод (FPM)	5	5	5	5
Полиакрилат (ACM)	4	4	2	4
Хлористый полиэтилен (CSM)	3	3	2	2
Этилен-пропилен (EPDM)	2	2	5	2
Полиуретан (EU)	4	4	3	4
Политетрафторэтилен (тефлон) (PFTE)	5	5	5	5
Полисернистый этилен (T)	5	5	2	4

Таблица 3.6

Значения показателей масел

Показатель	Значение	Показатель	Значение
Температуры застывания и хлопьеобразования	N	Поверхностное натяжение	X
Кислотное число	N	Концентрация жидкого хладагента в растворе	X
Вязкость масла	X	Агрессивность к материалам	N
Индекс вязкости	X	Концентрация паров хладагента в растворе с маслом	N
Температура вспышки	X	Температура критической точки	N
Показатель преломления	N	Показатели цвета	N
Химическая стабильность	X		
Стоимость	N		

4. СИСТЕМЫ ХЛАДАГЕНТ–МАСЛО

Особенностью компрессионной холодильной машины (КХМ) является контакт масла с холодильным агентом. Раствор холодильный агент–масло является рабочим веществом и смазкой. Свойства раствора отличаются от свойств индивидуального хладагента. Масло в растворе из картера компрессора попадает в конденсатор, испаритель, ресивер, всасывающий трубопровод компрессора.

Концентрация масла не постоянна. Больше всего масла в картере компрессора. Меньше масла в теплообменных аппаратах и элементах холодильной установки, заполненных жидким хладагентом.

В состоянии насыщения жидкая фаза и пар находятся в термодинамическом равновесии. Состояние насыщения имеют место в ресивере, картере, во всасывающей линии. Раствор в переохлажденном состоянии, например, может быть между ресивером и дросселем. Хладагент и масло имеют различную летучесть. Различие существенно, поскольку при давлении паров фреона порядка 0,1 МПа и выше давление паров масла с вязкостью 30 сСт всего лишь 0,16 мкПа.

Состояние термодинамического равновесия раствора хладагент–масло, по Гиббсу, определяется двумя произвольно выбранными параметрами [1, 11, 18–20]:

$$n = \alpha - \beta + 2 = 2 - 2 + 2 = 2,$$

где n – число параметров; α – число компонентов смеси, $\alpha = 2$; β – число фаз ($\beta = 2$, т. е. пар и жидкость).

Основной параметр раствора – концентрация масла. К примеру, массовую концентрацию масла рассчитывают по формуле

$$\xi_M = \frac{G_M}{G_M + G_{ха}},$$

где G_M и $G_{ха}$ – соответственно масса масла и жидкого хладагента.

Концентрацию паровой фазы масла можно считать практически близкой к нулю.

Состояние жидкой фазы представляют в виде фазовых диаграмм. На рис. 4.1 представлены возможные фазовые диаграммы растворов масло–хладагент [1, 2, 12, 18–24].

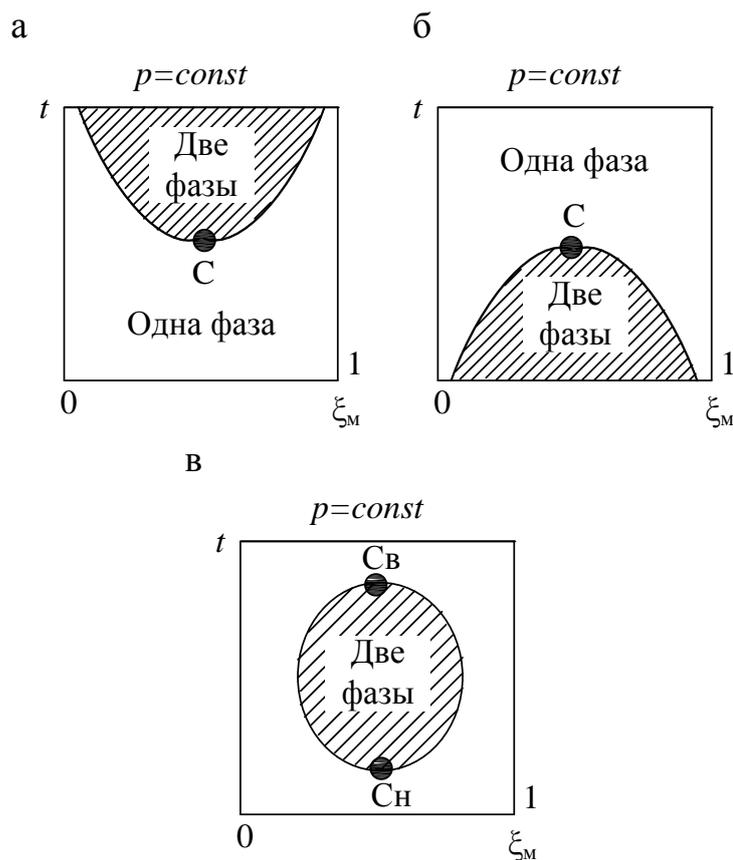


Рис. 4.1. Фазовые диаграммы (а–в) бинарных систем

Существует критическая температура растворения. В критической точке растворения тождественными становятся две жидкие (или две твердые) фазы, причем каждая из них является раствором.

Если речь идет о верхней критической температуре растворения, критическая температура является наивысшей температурой, при которой возможно сосуществование двух фаз (см. рис. 4.1, б) в точке С две жидкие фазы становятся одинаковыми.

Возможны системы с нижней критической температурой растворения. Случай фазового равновесия такой системы представлен на рис. 4.1, а. Ниже температуры, соответствующей точке С, двойная система образует одну устойчивую фазу.

Не исключен вариант системы с двумя критическими температурами растворения – верхней и нижней (см. рис. 4.1, в).

Признаком, определяющим наличие верхней критической точки (точки максимума) или нижней критической точки (точки минимума), может служить характер изменения энтальпии смеси жидкостей (рис. 4.2).

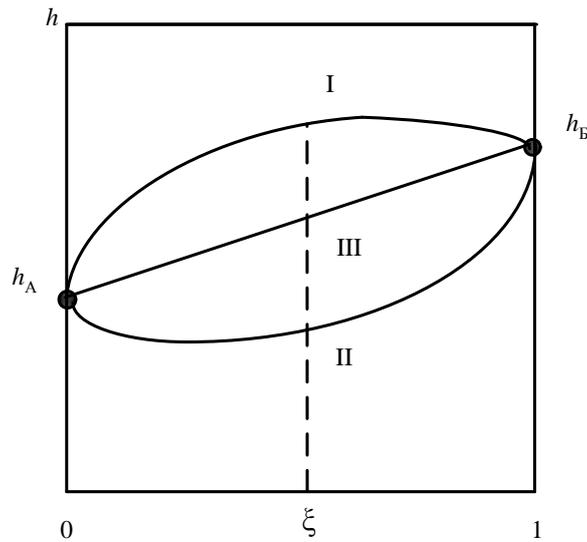


Рис. 4.2. Изменение энтальпии смеси в зависимости от состава:
 h_A и h_B – энтальпия чистых жидкостей при $t = \text{const}$
и $p = \text{const}$ до смешения

Если энтальпия смеси больше суммы энтальпии чистых компонентов до смешения (кривая I), смесь образуется с поглощением теплоты (эндотермическая смесь). Возможно образование смеси с выделением теплоты (экзотермическая смесь). Тогда энтальпия смеси меньше суммы энтальпии чистых жидкостей (кривая II). Верхняя критическая точка растворения наблюдается только у эндотермических смесей, нижняя – у экзотермических. Большинство жидких смесей являются эндотермическими, т. е. имеют верхнюю критическую точку растворения.

Фазовые линии, соответствующие различным концентрациям компонентов в зависимости от температуры и давления, образуют пограничные кривые растворимости. Линии фазового равновесия ограничивают зону несмесимости. В качестве примера на рис. 4.3 представлены пограничные кривые фазового равновесия системы жидкий хладагент–масло. Между пограничными кривыми однородное состояние неустойчиво. Гетерогенная система (точка M) состоит из двух гомогенных растворов и стремится к разделению на слои с концентрациями ξ_A и ξ_B . Отношение отрезков AM и MB обратно пропорционально количеству равновесных фаз:

$$\frac{AM}{MB} = \frac{G_B}{G_A}.$$

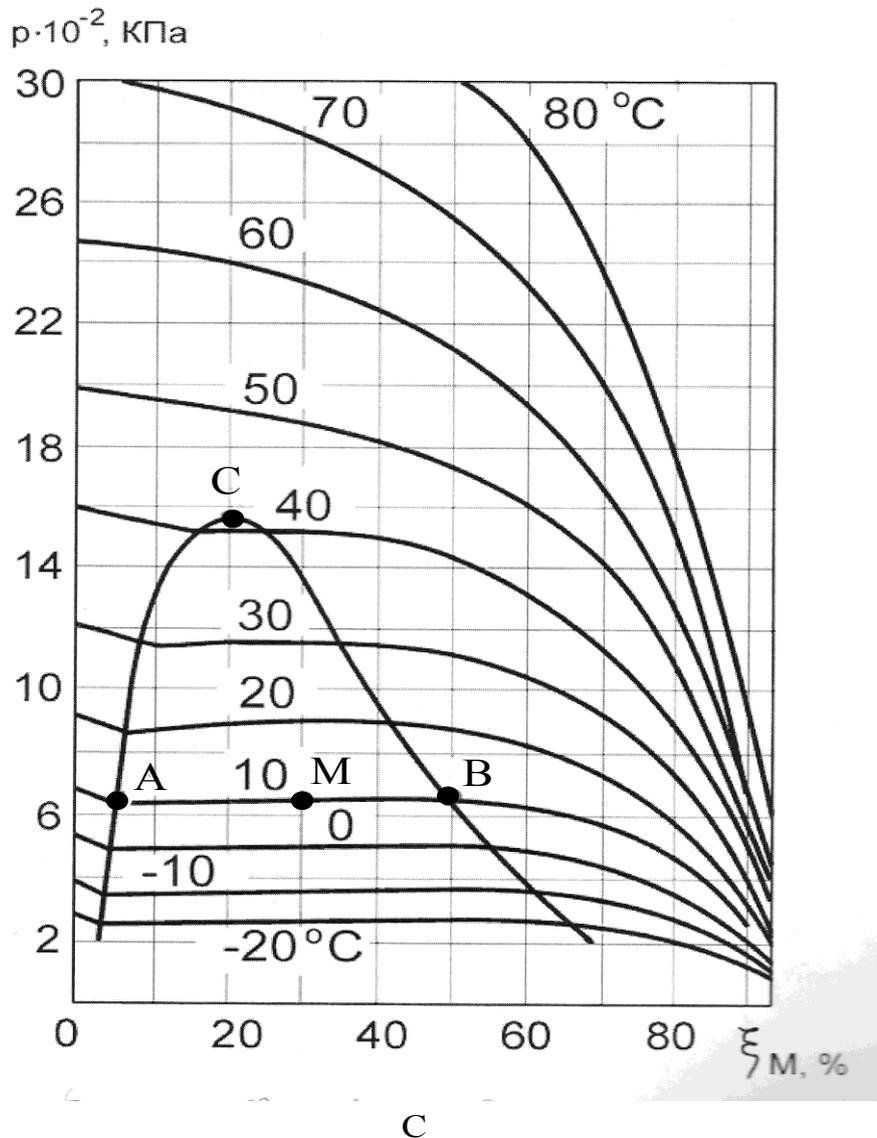


Рис. 4.3. Фазовая диаграмма системы R22–минеральное масло XM 35 с верхней критической точкой растворимости [3]

В точке А концентрация масла ξ_A . В точке В (раствор хладагента в масле) концентрация масла значительно больше. Выше критической температуры (точка С) растворимость масла и хладагента неограниченна, т. е. при всех концентрациях масла имеет место гомогенный раствор. Неограниченная растворимость жидких фаз наблюдается также слева от линии АС и справа от ВС при температурах ниже критической температуры. В области под кривой АСВ – зона

гетерогенных растворов (зона несмесимости), где происходит расслоение раствора.

Расположение слоев зависит от соотношения массы растворов. Компонент смеси с меньшей плотностью «всплывает», а с большей плотностью располагается внизу. Так, аммиак, почти не растворяющийся минеральное масло, как более легкий компонент располагается сверху. Масло с небольшим количеством аммиака располагается в нижней части и осаждается в виде пленки на низкотемпературной теплопередающей поверхности (испаритель затопленного типа). Масляная пленка увеличивает термическое сопротивление теплопередачи, снижает коэффициенты теплоотдачи при фазовом переходе. При этом понижается температура кипения аммиака, ощутимо повышаются энергетические затраты.

Фреон при низких температурах тяжелее масла, поэтому в аппаратах фреоновых холодильных установок слой масла с растворенным в нем хладагентом располагается сверху. При остановке компрессора жидкий фреон натекает в картер. При пуске поршневого компрессора жидкость засасывается снизу картера. Если применяются взаиморастворимые масло и фреон, то с точки зрения смазывания трущихся деталей компрессора нет никаких проблем; если используются расслаиваемые смеси фреона и масла, то первым засасывается фреон, не способный образовывать смазывающую пленку. Имеет место контактное трение и, как следствие, износ поверхностей. Для предотвращения этого в агрегате, работающем на расслаиваемых фреоне и масле, должна быть предусмотрена автоматическая система, ограничивающая натекание фреона в компрессор после его остановки.

Растворимость масел в хладагентах различна. Аммиак и диоксид углерода практически не растворяются в минеральных маслах. Практически неограниченна растворимость хладагента R12 в масле ХФ12-16. Хладагент R22 с минеральным маслом ХФ22-24 смешивается неограниченно до температуры выше минус 12 °С, с синтетическим маслом ХФ22с-16 – вплоть до минус 60 °С.

Не растворяются в минеральных маслах хладагенты R13, R14 и R115, а R142b, R22, R114 – лишь частично. Незначительна растворимость в минеральных маслах перфторуглеродов (полностью фторированных хладагентов): C_3F_8 , C_4F_{10} , SF_6 и др. Азеотропная смесь R502 растворяется в минеральных маслах хуже, чем R22.

Хладагенты R290 и R1270 растворяются в минеральных маслах подобно R12, а R11, R21 и R113 – неограниченно.

Растворимость масел и хладагентов в работе [11] объясняют соотношением внутренних (лапласовых) давлений смешивающихся жидкостей. Величины внутреннего давления R12 и минерального масла сопоставимы: соответственно 210,0 и 360,0 МПа. Эти вещества смешиваются во всех соотношениях. При больших отличиях в значениях внутреннего давления взаимная растворимость жидкостей уменьшается. Для воды внутреннее давление составляет 2000 МПа, и вода практически не растворима в R12.

Критическая температура растворения снижается у масел с высоким содержанием нафтенов и ароматических углеводородов и низкой молекулярной массой. Масла с высокой вязкостью и высоким индексом вязкости растворяется хуже. Большинство растворов масел с хладагентами имеет верхнюю критическую точку растворения. Существуют системы с нижней критической точкой (рис. 4.4). Вне зоны несмесимости подобные растворы гомогенны, т. е. обладают неограниченной растворимостью. Неограниченная растворимость имеет место у хладагента R404A (ГФУ) с маслом типа POE в интервале температур от минус 60 до 80 °С и у сервисных смесей R402A и R402B с тем же типом масел практически в том же диапазоне температур. С хладагентом R502 гомогенную систему образуют алкилбензолные масла (А).

Две критические температуры фазового равновесия имеет смесь CO₂ с полиольэфирным маслом POE 220 (рис. 4.5). Верхняя критическая точка соответствует температуре 3 °С, нижняя – минус 40 °С [9, 11–13].

Фазовая диаграмма масел Shell SP68 (PAO) и Reniso C130E (POE) имеет с диоксидом углерода правую ветвь (рис. 4.6). Подобный вид кривой фазового равновесия характерен для полиалкиленгликолевых масел PAG VG68 и PAG VG220. Единственная ветвь фазовой диаграммы таких масел (правая) – практически вертикаль, идущая от температуры 30 до –50 °С при почти постоянной концентрации около 60 % для масла VG220 и 44–60 % для масла VG68.

Фазовое равновесие с двумя ветвями для раствора CO₂ с модифицированным маслом PAG показано на рис. 4.7. Совместимость компонентов смеси имеет место в зоне температур от 31 до минус

50 °С и практически важных концентраций до 8 % масла по массе (левая ветвь фазового равновесия) [21–24].

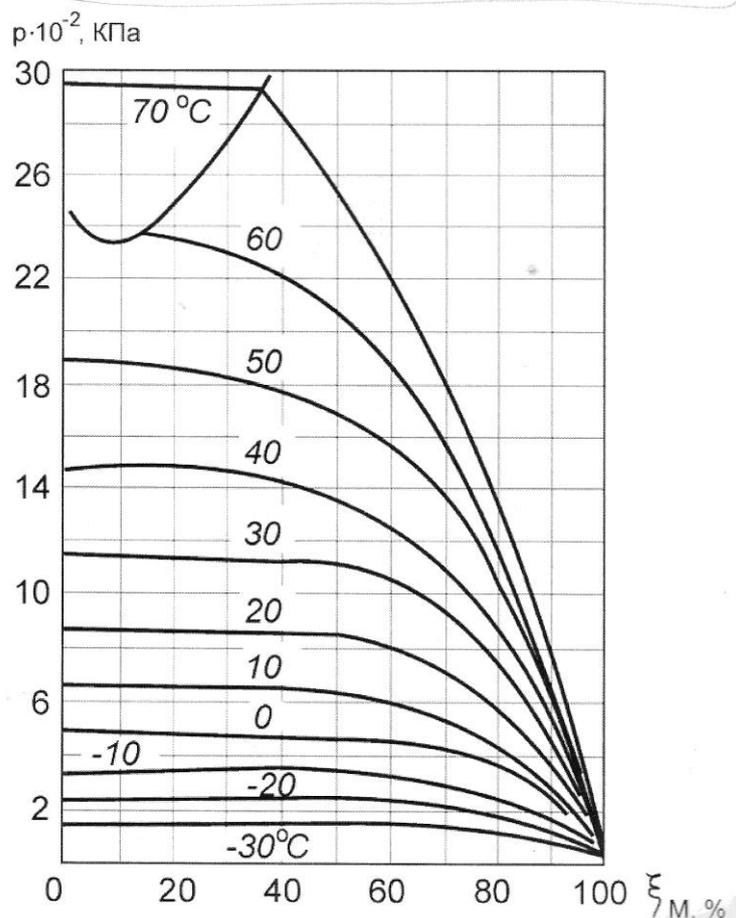


Рис. 4.4. Фазовая диаграмма раствора масла ХФ22-24 и хладагента R22 [14]

Аммиак практически не растворяется в минеральных маслах. Растворимость масел в аммиаке изменяется от температуры и давления [1, 3, 12, 18] (табл. 4.1).

Таблица 4.1

Растворимость R717 в минеральном масле

Температура, °С	Растворимость, мас. % при давлении, МПа				
	0,1	0,2	0,3	0,4	1,0
0	0,261	0,517	0,820	1,280	–
21	0,180	0,362	0,540	0,697	–
71	0,101	0,195	0,291	0,383	1,015

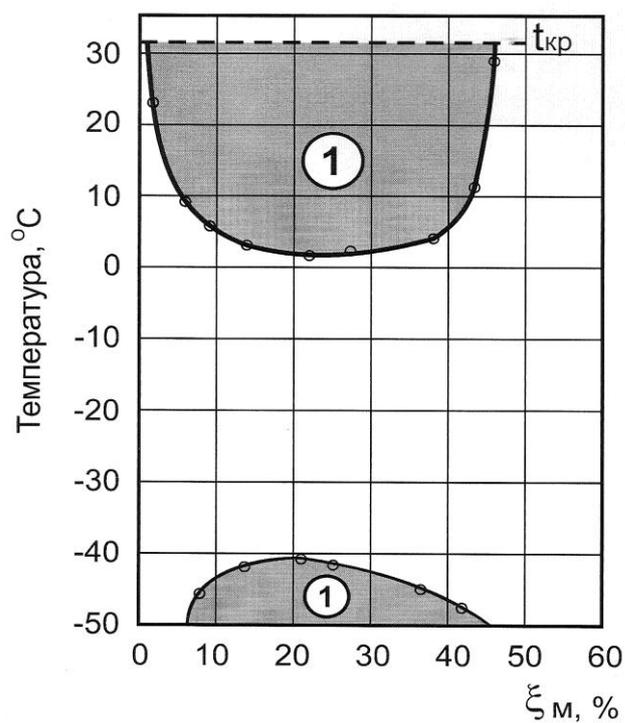


Рис. 4.5. Равновесие фаз раствора R744 с маслом POE:
1 – зона несмесимости [21]

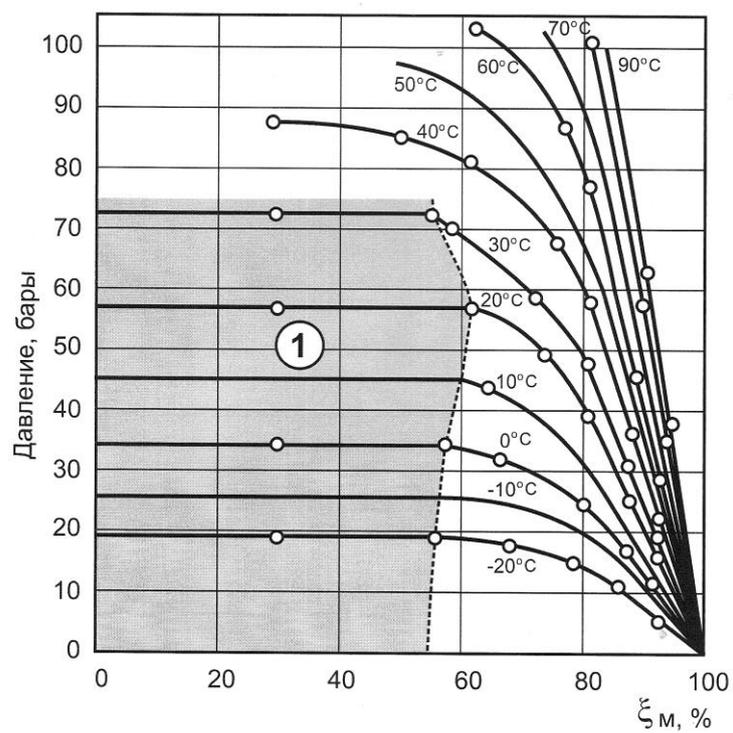


Рис. 4.6. Фазовая диаграмма смеси R744 с синтетическим маслом PAO:
1 – зона гетерогенной смеси

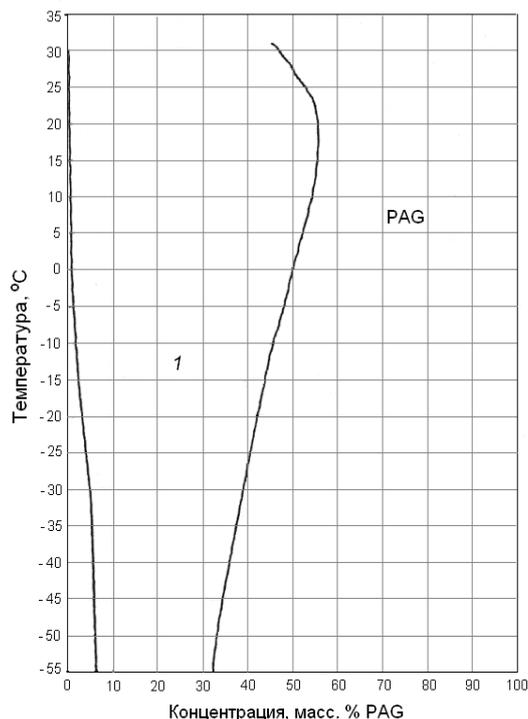


Рис. 4.7. Устойчивость фаз жидкой смеси R744 с маслом PAG:
1 – зона несмесимости

Растворимость фреонов в минеральном масле оценивают по методике И.С. Бадылькеса [1]:

$$K = \frac{n_1}{n_1 + n_2 + 0,25n_3 + 2n_4},$$

где n – число атомов соответственно фтора (n_1), хлора (n_2), водорода (n_3) и брома (n_4) в молекуле фреона.

Растворимость считается неограниченной, когда $K \leq 1/2$. Ограниченная растворимость при всех температурах имеет место, если $K > 2/3$, а также в некотором диапазоне температур – при $K \leq 2/3$ [1, 3].

Масло не должно накапливаться в конденсаторе или ресивере. Поэтому желательна неограниченная растворимость масла при температуре конденсации.

В процессе кипения маслофреонового раствора в испарителе остается насыщенное фреоном масло. Масло собирается в верхнем слое и поступает из кожухотрубного испарителя во всасывающую магистраль.

Для низкотемпературных КХМ растворимость до минус 60 °С могут обеспечить, к примеру, масла типа РОЕ. Хорошие низкотемпературные показатели растворимости у хладагента R22 с ХФ22с-16 и Zerice S46, у R12 – с маслом ХФ12-16.

При низких температурах масло ХС-40 слабо растворяется в R22, R134а, R125, R401А и аммиаке, но достаточно хорошо в изобутане (R600а).

Природный хладагент R600а имеет неограниченную растворимость с нефтяными и синтетическими углеводородными маслами при отрицательных температурах. Взаимная растворимость R600а с нефтяными маслами делает этот углеводород пригодным для бытовых холодильных приборов и торговой холодильной техники, что уже подтверждается на практике.

5. МЕТОДЫ СТАНДАРТИЗАЦИИ МАСЕЛ

Производство и применение холодильных масел регулируются стандартом ГОСТ Р 15.201–2000 «Порядок разработки и постановки продукции на производство». Согласно стандарту, новые масла или уже выпускаемые масла, но вырабатываемые по новой технологии или по новой рецептуре, перед началом их производства подвергаются испытаниям. Холодильные масла испытываются по комплексу методов квалификационной оценки холодильных масел (КМКО), позволяющему объективно оценить возможность применения испытуемого образца по назначению. По результатам сравнительных испытаний заявленного опытного и товарного образцов масел принимается решение о допуске заявленного образца к стендовым испытаниям, если речь идет о новом масле, или о допуске масла к производству и применению, если речь идет о штатном масле с несущественным изменением технологии или рецептуры, либо о допуске нового предприятия к производству штатного холодильного масла. Стендовые испытания проводятся на базовых предприятиях отрасли холодильного машиностроения по программам испытаний, принятых на этих предприятиях. При положительных результатах стендовых испытаний принимается решение о допуске к производству масел на предприятии, представившем образцы испытуемых масел, и применении в холодильной технике соответствующих типоразмеров с рекомендациями используемых хладагентов или без них. На новые масла разрабатывается постоянно действующая нормативно-техническая документация. Масла вносятся в карты смазки холодильного оборудования, для которого они предназначены. Установленный порядок постановки масел на производство гарантирует, что только те предприятия, масла которых прошли необходимый объем испытаний и получили допуск, имеют право вырабатывать и поставлять потребителям холодильные масла.

Вязкость относится к наиболее контролируемым показателям масел. Современные инструментальные методы позволяют с высокой точностью определять кинематическую вязкость в капиллярных вискозиметрах по ГОСТ 33–2000 и динамическую вязкость по ГОСТ 1929–87 в коаксиальных цилиндрических ячейках. На практике кинематическую вязкость определяют для всех масел при положительных температурах, при отрицательных температурах – преиму-

щественно для маловязких масел. Динамическую вязкость определяют при положительных и отрицательных температурах для масел любой вязкости. Существуют современные приборы, определяющие как кинематическую, так и динамическую вязкость в автоматическом режиме.

В соответствии с КМКО химическая стабильность смесей масел с фреонами определяется по методу ВНИИ НП. Образец масла, хладагент и пластины из углеродистой стали и меди помещают в автоклав из нержавеющей стали и выдерживают при температуре 200 °С в течение 14 суток. Автоклав разгружают и оценивают изменения вязкости и кислотного числа масла, а также состояние пластин. На пластинах не должно быть следов коррозии и лаковых отложений. Изменение вязкости и кислотного числа масла не должно быть выше установленного предела. По результатам испытаний делается вывод: стабильно или нестабильно испытываемое холодильное масло в смеси с данным хладагентом.

Для воздушных холодильных машин, например открытого типа, в компрессорах используют масла, обладающие высокой термоокислительной стабильностью. В маслах обязательно присутствуют антиокислительные присадки. Термоокислительную стабильность масел определяют по ГОСТ 23797–79 методом окисления образца масла воздухом в течение 50 ч при температурах в зависимости от уровня напряженности деталей компрессора, т. е. от 150 до 200 °С, в присутствии в качестве катализаторов окисления железной, медной и алюминиевой пластинок. Для масел контролируется и нормируется изменение вязкости, кислотного числа, а для пластинок – наличие или отсутствие коррозии весовым методом. Для стали и алюминия обычно нормируется отсутствие коррозии. Для меди устанавливаются предельные величины в соответствии с согласованными требованиями.

Во время эксплуатации средних и крупных холодильных машин на предприятиях, независимо от используемого хладагента, осуществляется контроль за состоянием масла в соответствии с руководящими документами. В них нормируется изменение вязкости масла и кислотного числа. При превышении установленных норм масло подлежит замене.

Растворимость масла с хладагентом оценивается визуально. В толстостенные стеклянные градуированные цилиндрические сосу-

ды заливаются масло и хладагент в заданном соотношении. Все перемешивается и помещается в термостат. После выдержки при определённой температуре в течение 2 ч в сосуде наблюдают: а) полное растворение; б) полное расслоение смеси; в) частичное растворение. Наблюдения осуществляют при разных температурах и различных соотношениях компонентов. По результатам наблюдений строят кривую растворимости масла в хладагенте в зависимости от температуры.

Кривая растворимости позволяет судить о принципиальной возможности или эффективности применения того или иного сочетания компонентов раствора в холодильной машине.

Вблизи температуры застывания вязкость масел резко повышается. Синтетические масла застывают без образования кристаллических фрагментов вследствие значительного увеличения вязкости при отрицательных температурах и потери текучести.

Температуру застывания масел определяют по ГОСТ 20287–91 путем охлаждения испытуемого образца масла в пробирке, снабженной термометром, со скоростью, обеспечивающей разницу температур между образцом масла и жидкостью в охлаждающей бане не более 7 °С, периодически наклоняя пробирку на 45°, до температуры, при которой образец масла останется при наклоне неподвижным.

Помимо температуры застывания для холодильных масел определяется подвижность масел в U-образной трубке при низких температурах и давлении 10 мм рт. ст. Этот показатель характеризует текучесть масел в испарителе, т. е. их склонность к возврату из испарителя независимо от растворимости в хладагентах.

Нефтяные масла содержат нормальные парафины, которые при низкой температуре могут выпадать на деталях дроссельных клапанов или поверхностях испарителя. Важно, чтобы температура хлопьеобразования маслофреоновой смеси была ниже температуры кипения, тогда парафины не будут выпадать и холодильный цикл не будет нарушаться. Нефтяное масло в качестве холодильного масла проходит тест на определение температуры хлопьеобразования. Температура хлопьеобразования определяется по ГОСТ 5546–86.

В холодильных машинах присутствуют припои, эмали обмоток электродвигателей, резины уплотнений. В ходе стендовых испытаний оценивают визуально изменение состояния этих материалов, замеряют изменение объёма резиновых уплотнений. Для резиновых уплотнений желательное небольшое увеличение объёма – до 10 %.

Изменение объёма резин уплотнений в холодильном масле определяется на этапе КМКО.

Смазывающие свойства холодильных масел, оцениваемые по ГОСТ 9490 на четырехшариковой машине, характеризуют способность масла снижать трение и задир трущихся поверхностей и таким образом уменьшать их износ. По указанному стандарту определяют следующие показатели смазывающих свойств: индекс задира – показатель способности масла уменьшать повреждения трущихся поверхностей вследствие задира; критическую нагрузку заедания – показатель способности масла предотвращать возникновение задира трущихся поверхностей; нагрузку сваривания – показатель предельной работоспособности масла; показатель износа (диаметр пятна износа), характеризующий влияние масла на износ трущихся поверхностей.

Смазывающие свойства масел зависят от вязкости и химического состава. Испытание масел по показателю «смазывающие свойства» по ГОСТ 9490–75 входит в КМКО. Трибологические характеристики холодильных масел не ограничиваются только этим показателем. В каждом типе холодильных компрессоров имеются свои детали и узлы, наиболее подверженные износу и в критических случаях – задиру. Наиболее полно трибологические характеристики холодильных масел определяются в ходе стендовых или эксплуатационных испытаний по результатам осмотра состояния трущихся поверхностей и замера размеров деталей, подвергаемых максимальному напряжению.

При разработке трибологических пар компрессоров задача преодоления износа трущихся поверхностей решается подбором смазочного масла исходя из расчетов толщины смазочной пленки. Эти расчеты проверяются и корректируются в ходе стендовых испытаний. Хлорсодержащие хладагенты улучшают противоизносные свойства маслофреоновой смеси. Фторуглероды и фторуглеводороды не провоцируют износ, но и не оказывают положительного действия на противоизносные свойства масел. Углеводородные хладагенты резко уменьшают вязкость раствора и ухудшают противоизносные свойства масел.

Практически все холодильные масла классов вязкости 22 и выше не содержат противоизносных присадок. В маслах классов вязкости 10 и 15, предназначенных в основном для небольших компрес-

соров, работающих, например, на изобутане, используют беззольные противоизносные присадки.

Способность холодильных масел образовывать пену в процессе их применения в холодильных машинах оценивается показателем «пенообразующие свойства». Излишняя пенообразующая способность масла нежелательна. В компрессоре пена препятствует обновлению смазочных пленок и подаче хладагента, а в испарителе из-за пены ухудшается теплопередача. Пенообразование нефтяных масел связано со степенью их очистки, т. е. чем выше вязкость, тем пенообразование больше. Для предотвращения пенообразования в холодильные масла добавляют антипенные присадки. Пенообразующие свойства холодильных масел определяют методом ASTM D 892. Известный объем масла помещают в вертикальный термостатируемый цилиндр, через него пропускают воздух со скоростью 94 мл/с до установления постоянного уровня пены. Не прекращая подачи воздуха, измеряют высоту столба образовавшейся пены. После прекращения подачи воздуха фиксируют высоту столба пены, оставшейся спустя 10 мин. Такие испытания проводят при 25, 94 °С и еще раз при 25 °С после 94 °С.

В герметичных холодильных машинах для удаления влаги применяются патроны с цеолитами. На заводах при производстве герметичных холодильных агрегатов масло перед заливкой в компрессор обезвоживается. Содержание воды в холодильных маслах определяется по ГОСТ 1547–84 путем нагревания образца масла до температуры 120 °С. При наличии в масле воды (примерно 300 ppm) слышится потрескивание. Содержание свободной воды в маслах определяется по ГОСТ 14870–70. Сущность метода заключается в кипячении пробы масла с нерастворимым в воде растворителем и измерении объема сконденсированной воды (об. %) в приемнике-ловушке. Содержание воды в холодильных маслах по этим методам нормируется как «отсутствие». Метод определения воды реактивом Фишера по ГОСТ 24614–81 дает наиболее точные результаты по содержанию воды в маслах при определении массовых долей воды от 0,008 % (50 ppm). Он применяется при контроле данного показателя у синтетических сложноэфирных и полиалкиленгликолевых масел.

Содержание механических примесей – показатель, характеризующий чистоту масла и наличие в нем твердых частиц. Механические примеси в маслах вызывают повышенный износ деталей ком-

прессоров, засоряют фильтры. Содержание механических примесей определяют количественно по ГОСТ 6370–83 путем определения массы механических примесей, задерживаемых бумажным фильтром «белая лента» при фильтровании через него определенного объема испытуемого масла. Для холодильных масел содержание механических примесей нормируется как «отсутствие».

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Бадылькес И.С.** Рабочие вещества и процессы холодильных машин. – М.: Госторгиздат, 1962. – 280 с.
2. Озонобезопасные альтернативы и заменители. Пропелленты, хладагенты, вспениватели, растворители, огнегасящие средства /В.Г. Барабанов, О.В. Блинова, В.С. Зотиков и др. – СПб.: ХИМИЗДАТ, 2003. – 304 с.
3. Холодильные компрессоры. 2-е изд./ А.В. Быков, Э.М. Бежанцшвили, И.М. Калнишь и др.; Под ред. А.В. Быкова. – М.: Колос, 1992. – 304 с.
4. Разработка и исследование новых масел для холодильных машин / В.И. Сапронов, Т.И. Дремлюх, Д.В. Назаров и др.// Холодильная техника. 1974. № 2. С. 26–32.
5. **Малкин Л.Ш., Колик В.Л.** Осушка и очистка малых холодильных машин. – М.: Лег. и пищ. пром-сть, 1982. – 152 с.
6. **Железний В.П.** Термодинамічні властивості озононеруїнівних холодоагентів та їх розгинів з мастилами (Експеримент, методи прогнозування, проблеми екології): Дис. докт. техн. наук: 05.14.06 – Одесса. 2002. – 441 с.
7. **Цветков О.Б., Лаптев Ю.А.** Современные холодильные масла // Холодильная техника. 2005. № 1. С. 19.
8. **Цветков О.Н.** Поли- α -олефиновые масла: химия и технология и применение. – М.: Техника, 2016. – 192 с.
9. Экспериментальное исследование теплофизических свойств компрессорных масел: MOGUL ONF 46, Planetelt АСД 100 FУ, ХМИ АЗМОЛ, Lonaria FR32, ХС 15, ХС40 // В.П. Железний, В.В. Сеченых, Ю.В. Семениук, С.Н. Анчербак, О.Н. Цветков // Вестник МАХ. 2007. № 2. С. 23–30.
10. **Филаткин В.Н.** Термодинамика растворов: Учеб. пособие. – СПб.: СПбГУНиПТ, 2000. – 187 с.
11. **Мельцер Л.З.** Смазка фреоновых холодильных машин. – М.: Госторгиздат, 1962. – 100 с.
12. **Бабакин Б.С.** Хладагенты, масла, сервис холодильных систем: Моногр. – Рязань: Узорочь, 2003. – 470 с.
13. **Вейнберг Б.С., Вайн Л.Н.** Бытовые компрессорные холодильники. – М.: Пищ. пром-сть, 1974. – 272 с.
14. **Цветков О.Б.** Холодильные агенты. Изд. перераб. и доп. – СПб: СПбГУНиПТ, 2004. – 220 с.
15. Влияние примесей масла на величину энтальпии рабочего тела в испарителе/В.П. Железний, Д.А. Проценко, С.Н. Ангербак, П.В. Скрипов// Вестник МАХ. 2004. № 3. С. 10–15.

16. Теплообменные аппараты холодильных установок/ Г.Н. Данилова, С.Н. Богданов, О.П. Иванов, Н.М. Медникова, Э.И. Крамской; Под общ. ред. Г.Н. Даниловой. – Л.: Машиностроение. Ленингр. отд-е, 1986. – 303 с.

17. **Heide R.** Über die Dichte von Kohlenwasserstoff Öl-Gemischen// Luft und Kältetechnik. 1999. № 11. S. 580–583.

18. Холодильная техника. Теплофизические основы применения искусственного холода: Справ. / Под ред. А.В. Быкова. – М.: Пищ. пром-сть, 1980. – 232 с.

19. **Кириллин В.А., Шейдлин А.Е.** Термодинамика растворов. – М.-Л.: Госэнергоиздат, 1956. – 272 с.

20. **Пригожин И., Дефэй Р.** Химическая термодинамика. – Новосибирск: Наука, 1966. – 510 с.

21. **Heide R., Fals S.** Mischbarkeit vor Schmierölen mit Kohlendioxid// Luft und Kältetechnik. 2001. № 10. S. 466–470.

22. **Gebhardt D., Heide R., Schenk S.** Untersuchungen an CO₂/Öl – Systemen// Luft und Kältetechnik, 2004. № 3. S. 92–97.

23. **Fahl J. Weidner E.** Polyalkulenether Schierstoffe für CO₂–PKW–Klimaanlagen// Luft und Kältetechnik. 2000. № 10. S. 478–480.

24. **Heide R.** Determination of the foam characteristics of refrigerant oil mixtures// Luft und Kältetechnik. 2000. № 10. S. 482–485.

СОДЕРЖАНИЕ

ОСНОВНЫЕ УСЛОВНЫЕ ОБОЗНАЧЕНИЯ	3
ВВЕДЕНИЕ.....	5
1. ХОЛОДИЛЬНЫЕ МАСЛА. НАЗНАЧЕНИЕ И КЛАССИФИКАЦИЯ	6
2. ФИЗИКО-ХИМИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА МАСЕЛ	22
3. ВЫБОР МАСЕЛ ДЛЯ НИЗКОТЕМПЕРАТУРНЫХ СИСТЕМ	30
4. СИСТЕМЫ ХЛАДАГЕНТ–МАСЛО.....	37
5. МЕТОДЫ СТАНДАРТИЗАЦИИ МАСЕЛ	47
СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ.....	53

Цветков Олег Борисович
Цветков Олег Николаевич
Лаптев Юрий Александрович

МАСЛА НИЗКОТЕМПЕРАТУРНЫХ УСТАНОВОК

Учебно-методическое пособие

Ответственный редактор
Т.Г. Смирнова

Титульный редактор
Е.О. Трусова

Компьютерная верстка
Ю.А. Лаптев

Дизайн обложки
Н.А. Потехина

*Печатается
в авторской редакции*

Подписано в печать 21.12.2016. Формат 60x84 1/16
Усл. печ. л. 3,26. Печ. л. 3,5. Уч.-изд. л. 3,25
Тираж 70 экз. Заказ № С 55

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

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