



**Железный, В. П.** Теплофизические свойства растворов хладагентов в компрессорных маслах [Текст] : монография / Железный Виталий Петрович, Семенюк Юрий Владимирович ; Одес. нац. акад. пищевых технологий. - Одесса : Фенікс, 2013. - 419 с. : табл., рис. - Библиогр.: с. 347-382. - ISBN 978-966-438-692-7.

В монографии приведены результаты экспериментально-расчетных исследований теплофизических свойств растворов альтернативных хладагентов в компрессорных маслах, которые были выполнены на кафедре инженерной теплофизики Одесской национальной академии пищевых технологий. Значительное внимание уделено оценке влияния примесей масла в хладагенте на показатели эффективности компрессорной системы. Рассмотрены перспективы применения нанотехнологий в холодильной промышленности.

Монография предназначена для научных сотрудников и инженеров, которые занимаются проектированием, созданием и эксплуатацией холодильного оборудования, а также для аспирантов и студентов холодильных, энергетических специальностей.

## ПРЕДИСЛОВИЕ

Реальными рабочими телами пароконденсаторных холодильных машин являются растворы хладагентов в маслах (РХМ). Поэтому влияние примесей масла в хладагенте на его теплофизические свойства и контроль за циркуляцией РХМ по контуру компрессорной системы следует рассматривать как важные факторы, определяющие энергетическую эффективность холодильного оборудования и интенсивность теплообмена в испарителе и конденсаторе [1].

Указанные факторы имеют не меньшее значение, чем выбор альтернативного хладагента. Корректный анализ возможностей повышения энергетической эффективности холодильного оборудования, использующего новые озоноразрушающие хладагенты, возможен только при наличии информации о теплофизических свойствах РХМ.

Для таких сложных термодинамических систем, как раствор хладагентов в компрессорных маслах, наиболее надежным способом получения достоверных данных об их теплофизических свойствах остается

эксперимент. Вместе с тем в условиях непрерывно расширяющейся номенклатуры хладагентов и марок выпускаемых промышленностью компрессорных масел возможности экспериментального изучения РХМ весьма ограничены. Поэтому для достижения дальнейшего прогресса в развитии холодильной техники повышения ее эффективности приоритетным научным направлением является развитие методов расчета и прогнозирования теплофизических свойств мультикомпонентных термодинамических систем. К таким системам в полной мере могут быть отнесены растворы экологически безопасных хладагентов в новых минеральных и синтетических компрессорных маслах.

Выполненный авторами анализ опубликованных работ, посвященных переводу холодильного оборудования на экологически безопасные рабочие тела, показывает, что в большинстве источников информации содержатся данные о теплофизических свойствах чистых и смесевых хладагентов либо результаты эксплуатационных испытаний компрессоров, теплообменных аппаратов или холодильных машин. При этом вопросы влияния примесей компрессорного масла на теплофизические свойства рабочего тела и показатели энергетической эффективности компрессорных систем остаются недостаточно изученными. До сих пор в периодической печати и справочной литературе практически отсутствуют данные о свойствах компрессорных масел в интервале параметров работы холодильного оборудования. Информация о поверхностном натяжении, плотности, фазовых равновесиях жидкость-жидкость, жидкость-пар и энтальпии для большинства применяемых сейчас альтернативных рабочих тел крайне ограничена. Вплоть до настоящего времени остаются не разработанными, а, следовательно, не используются на практике диаграммы давление - энтальпия для реальных рабочих тел. Отсутствие этих диаграмм превращает анализ перспективности применения альтернативных хладагентов в практически бесполезное термодинамическое упражнение [2]. Указанные выше факторы, несомненно, сдерживают технологический прогресс в холодильном машиностроении.

С учетом указанных проблем авторы сочли необходимым опубликовать монографию, в которой приводятся результаты экспериментальных и теоретических исследований теплофизических свойств компрессорных масел, растворов различных экологически безопасных хладагентов в маслах.

В предлагаемой читателю работе значительное внимание уделено методическим вопросам изучения свойств РХМ. Приложения монографии содержат справочные данные о свойствах нескольких масел, корреляции для расчета теплофизических свойств широко применяемых на практике реальных рабочих тел и разработанные диаграммы давление - энтальпия для некоторых объектов исследования. С использованием этих диаграмм выполнена оценка влияния примесей масла на показатели энергетической эффективности компрессорных систем.

Рассмотренным выше вопросам внедрения альтернативных хладагентов всегда уделялось довольно большое внимание ученых. В многочисленных статьях и материалах конференций, проводимых Международным

институтом холода (ИР) и Международной академии холода (IAR), приводятся результаты изучения теплофизических свойств новых хладагентов и их растворов с компрессорными маслами, рассматриваются вопросы теплообмена при кипении и конденсации альтернативных рабочих тел. Различными авторами излагаются результаты изучения эффективности холодильного оборудования, в котором используются альтернативные хладагенты. В последние годы опубликован ряд монографий [2-7], учебных пособий и справочников [8, 9], разрабатываются информационные базы данных о свойствах хладагентов [10] и т.п. Однако, несмотря на высокую активность специалистов, вопросы экспериментального и теоретического исследования теплофизических свойств РХМ, научно обоснованного выбора альтернативных хладагентов остаются актуальными.

Среди большого числа исследователей, плодотворно работавших в рамках вышеуказанных научных направлений, на работы которых авторы опирались при решении рассмотренных в монографии задач, следует назвать имена таких известных ученых как Анисимов М.А., Бадылькес И.С., Барбоса Дж. Р. мл. (Barbosa J. R. Jr.), Вамлинг Л. (Vamling L.), Ватанабе К (Watanabe K.), Геллер В.З., Йоби-Идрисси М. (Youbi-Idrissi M.), Йокозеки А. (Yokozeki A.), Крузе Х. (Kruse H.), Лавренченко Г.К., Лоттин О. (Lottin O.), Мазур В.А., Мельцер Л.З., Молдовер М.Р. (Moldover M.R.). Рабинович В.А Сенджерс Дж. В. (Sengers J.V.), Тессер Р. (Tesser R.), Филиппов Л.П. и многие других.

Необходимо подчеркнуть, что при проведении исследований, анализе и обобщении полученных экспериментальных данных авторы использовали опыт, накопленный в работах по изучению свойств компрессорных масел РХМ, которые выполнялись в Одесском технологическом институте пищевой холодильной промышленности (с 1971 г. - Одесском технологическом институте холодильной промышленности) в 1960 - 1980-х годах по руководством профессора Мельцера Леонида Зиновьевича. Научные работы этого замечательного ученого, посвященные теоретическим основам холодильной техники, развитию термодинамических методов анализа реальных циклов холодильных машин и проблемам их эксплуатации, остаются актуальными и востребованными.

Основной целью предлагаемой читателю работы являлось подробное изложение результатов исследований, которые были получены за последние двадцать лет в лаборатории кафедры инженерной теплофизики Одесской государственной академии холода (с 2012 г. - Одесской национальной академии пищевых технологий). Авторы предприняли попытку системного анализа проблем, возникающих при экспериментальном и теоретическом изучении теплофизических свойств растворов хладагентов в компрессорных маслах, этой целью в монографии приводятся и анализируются результаты экспериментальных исследований плотности, вязкости, фазовых равновесий жидкость-жидкость и жидкость-пар, энтальпии и поверхностного натяжения для различных РХМ. Авторы предлагают новые методики, в рамках которых традиционно применяемые для чистых веществ структурные методы уравнения расширенного скейлинга адаптированы к расчету свойств РХМ. В

монографии получила развитие трехфазная модель растворов хладагентов/масло, с использованием которой разработаны новые методы прогнозирования поверхностного натяжения РХМ, установлена зависимость между поверхностным натяжением и давлением насыщенных паров для мультикомпонентных растворов неопределенного состава.

По глубокому убеждению авторов, выбор альтернативных хладагентов должен основываться на новых принципах эколого-энергетического анализа [2] с использованием информации о теплофизических свойствах реальных рабочих тел - растворов хладагент/компрессорное масло. Поэтому в одном из разделов монографии приводятся результаты расчета показателей энергетической эффективности компрессорных систем, выполненного с учетом влияния примесей масла на термодинамические свойства рабочего тела.

Ввиду того, что в последние годы появилось большое количество публикаций, посвященных влиянию наночастиц на свойства хладагентов, масел и РХМ, а также на интенсивность теплообмена, в монографии проанализированы перспективы применения нанотехнологий в холодильной технике.

Авторы выражают искреннюю благодарность профессору В.В. Калининскому и профессору М.Г. Хмельнику, взявшим на себя труд рецензирования рукописи книги. Авторы признательны к.т.н. Т.Л. Лозовскому, а также аспирантам кафедры инженерной теплофизики Т.Д. Шестовой и А.Г. Никулину за большую помощь при подготовке рукописи к печати.

## СОДЕРЖАНИЕ

СПИСОК УСЛОВНЫХ ОБОЗНАЧЕНИЙ.....	7
ПРЕДИСЛОВИЕ.....	9
<b>1. ОБЗОР ВЫПОЛНЕННЫХ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ ТЕПЛОФИЗИЧЕСКИХ СВОЙСТВ КОМПРЕССОРНЫХ МАСЕЛ И РАСТВОРОВ ХЛАДАГЕНТ/МАСЛО.....</b>	<b>13</b>
<b>1.1. Теплофизические свойства компрессорных масел.....</b>	<b>13</b>
<b>1.2. Теплофизические свойства растворов хладагентов с         компрессорными маслами.....</b>	<b>16</b>
<b>2. ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ ТЕПЛОФИЗИЧЕСКИХ СВОЙСТВ КОМПРЕССОРНЫХ МАСЕЛ И РАСТВОРОВ ХЛАДАГЕНТ/МАСЛО.....</b>	<b>27</b>
<b>2.1. Экспериментальные исследования теплофизических свойств         компрессорных масел.....</b>	<b>29</b>
<b>2.1.1. Исследование капиллярной постоянной и определение</b>	

псевдокритической температуры компрессорных масел.....	31
2.1.2. Исследование плотности компрессорных масел.....	35
2.1.3. Исследование поверхностного натяжения компрессорных масел.....	38
2.1.4. Исследование показателя преломления компрессорных масел.....	39
2.1.5. Исследование вязкости компрессорных масел.....	42
2.1.6. Исследование давления насыщенных паров компрессорных масел на линии кипения.....	44
2.1.7. Определение средней молярной массы компрессорных масел.....	48
2.2. Экспериментальные исследования теплофизических свойств растворов хладагентов с компрессорными маслами.....	52
2.2.1. Аппаратура и методика исследования теплофизических свойств растворов хладагент/масло.....	52
2.2.1.1. Установка для измерения плотности и параметров фазовых равновесий растворов хладагент/масло.....	54
2.2.1.2. Установки для измерения плотности, давления насыщенных паров и капиллярной постоянной растворов хладагент/масло.....	58
2.2.1.3. Установка для измерения растворимости газов в жидкостях.....	63
2.2.1.4. Установка для исследования калорических свойств масел и растворов хладагент/масло.....	68
2.2.1.5. Установка для исследования вязкости масел и растворов хладагент/масло.....	77
2.2.2. Результаты экспериментальных исследований теплофизических свойств растворов хладагентов с компрессорными маслами.....	83
2.2.2.1. Фазовые равновесия жидкость-жидкость растворов хладагент/масло.....	85
2.2.2.2. Фазовые равновесия жидкость-пар растворов хладагент/масло.....	89
2.2.2.3. Плотность растворов хладагент/масло.....	94
2.2.2.4. Капиллярная постоянная и поверхностное натяжение растворов хладагент/масло.....	98
2.2.2.5. Калорические свойства растворов хладагент/масло.....	103
2.2.2.6. Вязкость растворов хладагент/масло.....	105
2.3. Методические аспекты экспериментальных исследований теплофизических свойств растворов хладагент/масло.....	109
<b>3. МЕТОДЫ ПРОГНОЗИРОВАНИЯ ТЕПЛОФИЗИЧЕСКИХ СВОЙСТВ ХЛАДАГЕНТОВ И РАСТВОРОВ ХЛАДАГЕНТ/МАСЛО.....</b>	<b>118</b>
3.1. Анализ существующих методов расчета термодинамических свойств веществ на линии насыщения.....	120
3.2. Принципы скейлинга в прогнозировании физико-химических свойств веществ на линии насыщения.....	123
3.3. Методы прогнозирования калорических свойств веществ на характерных кривых.....	145

<b>3.4.</b>	Методика прогнозирования поверхностного натяжения галоидопроизводных хладагентов и растворов хладагент/масло.....	159
<b>3.4.1.</b>	Методика прогнозирования поверхностного натяжения галоидопроизводных хладагентов.....	159
<b>3.4.2.</b>	Методика прогнозирования поверхностного натяжения растворов хладагент/масло.....	176
<b>3.5.</b>	Методы прогнозирования псевдокритических параметров растворов хладагент/масло.....	187
<b>3.5.1.</b>	Методика прогнозирования псевдокритической плотности растворов хладагент/масло.....	189
<b>3.5.2.</b>	Определение псевдокритической температуры растворов хладагент/масло из данных по плотности на линии кипения.....	191
<b>3.5.3.</b>	Определение псевдокритической температуры растворов хладагент/масло из данных по капиллярной постоянной.....	192
<b>3.5.4.</b>	Определение псевдокритического давления растворов хладагент/масло из данных по давлению насыщенных паров.....	195
<b>3.6.</b>	Методы прогнозирования вязкости хладагентов и их растворов с компрессорными маслами.....	199
<b>3.6.1.</b>	Анализ существующих методов прогнозирования вязкости хладагентов и растворов хладагент/масло.....	199
<b>3.6.1.1.</b>	Модель жестких сфер для расчета вязкости жидкостей.....	200
<b>3.6.1.2.</b>	Метод самоотнесения для расчета вязкости хладагентов и растворов хладагент/масло.....	202
<b>3.6.1.3.</b>	Теория трения для расчета вязкости хладагентов и растворов хладагент/масло.....	202
<b>3.6.1.4.</b>	Модель свободного объема для расчета вязкости хладагентов и растворов хладагент/масло.....	204
<b>3.6.1.5.</b>	Корреляции для расчета вязкости хладагентов и растворов хладагент/масло.....	205
<b>3.6.1.6.</b>	Выводы.....	206
<b>3.6.2.</b>	Моделирование температурно-концентрационной зависимости динамической вязкости хладагентов и растворов хладагент/масло на линии кипения.....	209
<b>3.7.</b>	Модель SP-QSPR для прогнозирования физико-химических свойств хладагентов и растворов хладагент/масло на линии кипения.....	221
<b>3.7.1.</b>	Основные структурно-аддитивные свойства.....	223
<b>3.7.2.</b>	Модель SP-QSPR для прогнозирования теплофизических свойств веществ.....	229
<b>3.8.</b>	Зависимость поверхностного натяжения хладагентов и растворов хладагент/масло от давления насыщенных паров.....	240
<b>4.</b>	<b>ОБЗОР СУЩЕСТВУЮЩИХ МЕТОДОВ МОДЕЛИРОВАНИЯ ФАЗОВЫХ РАВНОВЕСИЙ РАСТВОРОВ ХЛАДАГЕНТ/МАСЛО.....</b>	<b>246</b>
<b>4.1.</b>	Краткий обзор используемых подходов к моделированию фазовых равновесий растворов хладагент/масло.....	246
<b>4.2.</b>	Методические проблемы расчетных методов исследования свойств	

растворов хладагент/масло.....	255
<b>5. МОДЕЛИРОВАНИЕ ФАЗОВЫХ РАВНОВЕСИЙ РАСТВОРОВ ХЛАДАГЕНТ/МАСЛО С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ КУБИЧЕСКИХ УРАВНЕНИЙ СОСТОЯНИЯ.....</b>	<b>263</b>
<b>5.1. Модификация кубического уравнения состояния для моделирования         фазовых равновесий жидкость-пар растворов хладагент/масло.....</b>	<b>264</b>
<b>5.2. Моделирование фазовых равновесий жидкость-пар растворов         хладагент/масло модифицированными кубическими         уравнениями состояния.....</b>	<b>269</b>
<b>5.3. Результаты термодинамического моделирования фазовых         равновесий растворов хладагент/масло.....</b>	<b>274</b>
<b>5.3.1. Результаты термодинамического моделирования фазовых                 равновесий модельной системы RE170/TEG.....</b>	<b>275</b>
<b>5.3.2. Результаты термодинамического моделирования фазовых                 равновесий растворов R410A/Reniso Triton SEZ 32.....</b>	<b>279</b>
<b>6. ВЛИЯНИЕ ПРИМЕСЕЙ МАСЛА В ХЛАДАГЕНТЕ НА ПОКАЗАТЕЛИ ЭФФЕКТИВНОСТИ КОМПРЕССОРНОЙ СИСТЕМЫ.....</b>	<b>284</b>
<b>6.1. Разработка диаграмм <math>lgP - h</math> и <math>h - W_R</math> для реальных рабочих тел.....</b>	<b>290</b>
<b>6.2. Оценка влияния примесей масла в хладагенте на теоретические         показатели эффективности компрессорной системы.....</b>	<b>299</b>
<b>6.3. Влияние примесей масла в хладагенте на теоретические показатели         эффективности компрессорной системы с регенеративным         теплообменником.....</b>	<b>309</b>
<b>6.4. Анализ выполненных расчетов показателей энергетической         эффективности компрессорных систем.....</b>	<b>315</b>
<b>6.4.1. Сравнение расчетных характеристик эффективности                 компрессорных систем с литературными данными.....</b>	<b>316</b>
<b>6.4.2. Сравнение рассчитанных показателей эффективности                 компрессорной системы с результатами эксплуатационных                 испытаний ЗАО «Атлант» (г. Минск).....</b>	<b>320</b>
<b>6.4.3. Сравнение результатов теоретического расчета эффективности                 холодильного оборудования с данными эксплуатационных                 испытаний АО "Холодмаш" (г. Ярославль).....</b>	<b>323</b>
<b>7. АНАЛИЗ ПЕРСПЕКТИВ ПРИМЕНЕНИЯ НАНОТЕХНОЛОГИЙ В ХОЛОДИЛЬНОЙ ТЕХНИКЕ.....</b>	<b>330</b>
<b>ЗАКЛЮЧЕНИЕ.....</b>	<b>344</b>
<b>СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ.....</b>	<b>347</b>
<b>ПРИЛОЖЕНИЕ А.....</b>	<b>383</b>
<b>ПРИЛОЖЕНИЕ Б.....</b>	<b>386</b>
<b>ПРИЛОЖЕНИЕ В.....</b>	<b>391</b>
<b>ПРИЛОЖЕНИЕ Г.....</b>	<b>411</b>