

Авторефер
х17

проф. Турману И.В.

ОДЕССКИЙ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЙ ИНСТИТУТ ХОЛОДИЛЬНОЙ ПРОМЫШЛЕННОСТИ

На правах рукописи

Для служебного пользования :

Экз. 000020

ХАЛАЙДЖИ Владислав Николаевич

УДК 536.23:532.133:621.564

ТЕРМОДИНАМИЧЕСКИЕ И ПЕРЕНОСНЫЕ СВОЙСТВА МНОГОКОМПОНЕНТНЫХ
РАБОЧИХ ТЕЛ КРИОГЕННЫХ СИСТЕМ ОХЛАЖДЕНИЯ И МЕТОДИКА
РАСЧЕТА ИХ ВЯЗКОСТИ И ТЕПЛОПРОВОДНОСТИ

05.14.05 -- теоретические основы теплотехники

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Одесса - 1988

xv 1027

Институт холода
ОНАХТ
бібліотека

Работа выполнена в Одесском технологическом институте пищевой промышленности им. М.В. Ломоносова.

Научный руководитель - доктор технических наук,
профессор В.Ф. Чайковский

Официальные оппоненты: доктор технических наук,
старший научный сотрудник
А.Д. Козлов

кандидат технических наук,
доцент В.П. Железный

Ведущая организация - Физико-химический институт АН УССР
им. А.В. Богатского, г. Одесса

Защита диссертации состоится "4" марта 1988 г.
в 10 час. на заседании специализированного совета
К.068.27.01 при Одесском технологическом институте холодильной
промышленности. 270057, г. Одесса, ул. Петра Великого, I/3.
ОТИХП.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке института.

Автореферат разослан " " 1988 года.

Ученый секретарь
специализированного совета
К.Т.Н., доцент

Р.К. Никульшин

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность тем. Одним из эффективных путей совершенствования холодильной и криогенной техники является использование в качестве рабочих веществ сложных хладагентов, позволяющих получать холод на нескольких температурных уровнях, уменьшать металлоемкость и улучшать энергетические характеристики холодильных установок.

Для проектирования и расчета холодильных дроссельных систем, работающих на сложных хладагентах, необходима информация об их термодинамических и теплофизических свойствах (p, v, T -данных, коэффициентах динамической вязкости η и теплопроводности λ). Сведения такого рода в литературе достаточно скудны и ограничиваются отрывочными данными по некоторым бинарным и многокомпонентным смесям, составленным преимущественно из хладонов метанового ряда.

Вместе с тем, весьма перспективными являются смеси, включающие хладоны, углеводороды и инертные газы. Одной из таких смесей, разработанной в Одесском технологическом институте холодильной промышленности для охлаждения в дроссельных системах на уровне температур 100-110 К, является трехкомпонентная смесь дифторхлорметана (R22), метана (R50) и аргона (R740) с мольными концентрациями компонентов $x_1=0,62$ и $x_2=0,32$, для которой данные о теплофизических свойствах вообще отсутствуют.

Настоящая работа выполнена в соответствии с координационными планами научно-исследовательских работ по комплексным проблемам "Теплофизика и теплоэнергетика" АН СССР и "Разработка достоверных данных и создание массива стандартных справочных данных о теплофизических свойствах технически важных газов и жидкостей" проводимых вузами страны в 1986-1990 гг.

Цель работы состояла в исследовании комплекса термодинамических и теплофизических свойств смеси R22-R50-R740 фиксированного состава и разработке методики расчета коэффициентов динамической вязкости и теплопроводности многокомпонентных смесей на основе хладонов, углеводородов и инертных газов.

Научная новизна. Разработана методика экспериментальных исследований термодинамических и теплофизических свойств многокомпонентных смесей с существенно отличающимися критическими

параметрами компонентов, исключая возможность изменения концентрации смеси в процессе опыта.

Впервые получены экспериментальные данные о ρ, ν, T - свойствах, вязкости и теплопроводности смесей R22-R50-R740 ($x_1 = 0,62; x_2 = 0,32$) в диапазоне температур 250...380 К и давлений 0,4...15 МПа.

Показано, что излом "квазизохор", полученных в эксперименте по термическим свойствам методом пьезометра постоянного объема, позволяет проверить достоверность данных о фазовом равновесии жидкость-пар.

Установлено, что однопараметрический закон соответственных состояний (ОЗСС) может быть успешно применен для обобщения данных о свойствах переноса как индивидуальных веществ с различной формой и размерами молекул (хладоны, углеводороды, инертные газы), так и смесей на их основе.

Разработана методика расчета λ и Λ многокомпонентных смесей в диапазоне приведенных температур $0,5 < T < 3,0$ и приведенных плотностей $\omega < 2,0$ на основе минимальной исходной информации.

Основные научные положения, защищаемые в работе.

При создании обобщенной методики расчета коэффициентов вязкости и теплопроводности смесей, состоящих из хладонов, углеводородов и инертных газов, на основе ЗСС необходимо и достаточно использование только одного определяющего параметра.

Достоверность информации о фазовом равновесии жидкость-пар для смесей может быть проверена обработкой данных о плотности смеси, полученных методом пьезометра постоянного объема в одно- и двухфазной областях.

Основные результаты работы:

1. Получены экспериментальные данные о ρ, ν, T - свойствах, вязкости и теплопроводности смеси R22-R50-R740 в диапазоне температур 250...380 К и давлений 0,4...15,0 МПа.

2. Предложена методика расчета вязкости и теплопроводности многокомпонентных смесей, включающих хладоны, углеводороды и инертные газы, в области разреженного, плотного газа и жидкости в диапазоне $0,5 < T < 3,0$ и $\omega < 2,0$ на основе минимальной исходной информации.

Практическая ценность работы. Экспериментальные данные о

плотности, вязкости и теплопроводности рекомендуются в качестве справочных материалов, которые могут быть использованы при термодинамической оптимизации циклов, расчете и проектировании оборудования холодильных дроссельных систем.

Предложенные в работе методики расчета вязкости и теплопроводности многокомпонентных смесей и результаты измерений использованы НПО микрокриогенной техники (г. Омск) и ОТИП для проектных расчетов теплообменных аппаратов криогенных систем и установок на многокомпонентных хладагентах. Расчетные методики приняты ВНИИ МВ Госстандарта СССР для их аттестации в качестве Рекомендуемых расчетных методик ГСССД.

Апробация работы. Основные положения и результаты работы докладывались на IV Всесоюзной научно-технической конференции по метрологическому обеспечению теплофизических измерений при низких температурах (г. Хабаровск, 1985 г.), на Всесоюзной научной конференции по путям интенсификации производства и применения искусственного холода в отраслях агропромышленного комплекса (г. Ташкент, 1985 г.), на Всесоюзной научно-практической конференции по интенсификации производства и применения искусственного холода (г. Ленинград, 1986), на 45-й, 46-й, 47-й отчетных научно-технических конференциях ОТИП им. М.В. Ломоносова (г. Одесса, 1985-1987 гг.).

По материалам диссертации опубликовано 8 работ.

Структура и объем работы.

Диссертация состоит из введения, трех глав и заключения. Объем работы 151 с. текста (включая 16 рис., 33 табл. и приложения). Библиография содержит 125 наименований.

СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении обоснована актуальность работы, сформулированы цель и задачи исследований, научная новизна и практическая ценность полученных результатов.

В первой главе проведен обзор и анализ данных о термодинамических и теплофизических свойствах компонентов, входящих в состав исследуемой смеси. Выбраны наиболее надежные основные параметры этих веществ в характерных точках, а также уравнения, по которым рассчитаны значения свойств, принятые в качестве опорных

при разработке расчетных методик.

Во второй главе приведены краткие описания экспериментальных установок, методики проведения опытов, результаты измерений и их обработка, оценка погрешностей.

Учитывая особенности свойств исследуемой смеси и ее компонентов (в частности, при комнатной температуре R22 находится в жидкой фазе, R50 и R740 – в газообразной; давление насыщенных паров R50 и R740 весьма велико; температура плавления R740 близка к температуре нормального кипения азота, применяемого для перекомденсации компонентов), были разработаны специальные методики составления смеси заданного состава весовым способом, основанные на использовании уравнений состояния компонентов и калибровке объема коммуникаций стенда для составления смеси по показаниям образцового манометра. Использование этих методик позволило составлять смесь фиксированного состава с погрешностью не более 0,1 % по каждому компоненту.

Для измерения плотности применена установка, реализующая метод пьезометра постоянного объема. Цилиндрический пьезометр с наружным диаметром 80 мм, внутренним 40 мм запрессован в криостат, снабженный регулирующим электронагревателем, змеевиком для прокачки жидкого азота, измерительным и регулирующим платиновыми термометрами сопротивления и пятиспайной медь-константановой термопарой для контроля равномерности температуры по его высоте. Запорный вентиль пьезометра и мембранный нуль-индикатор термостатировались при комнатной температуре. Температура опыта измерялась образцовым термометром сопротивления типа ТСНН-3 в комплекте с потенциометром постоянного тока типа РЗ63/1 класса 0,001. Измерение давления в опытах с погрешностью не более 10^2 Па осуществлялось путем создания при помощи грузопоршневых манометров МП-60 и МП-600 класса 0,05 над мембраной нуль-индикатора, давления, равного давлению вещества в пьезометре.

Заполнение пьезометра и методика проведения опытов исключали возможность изменения состава смеси в процессе измерений. Исследование ρ, ν, T -зависимости проведено в интервале температур 250...380 К и давлений 0,4...15,0 МПа. Опытные данные представлены в табл. 1. Погрешность определения плотности не превышала 0,3 %. Для описания экспериментальных данных применено

уравнение состояния в вириальной форме

$$Z = \frac{p}{\rho R_{cm} T} = 1 + \sum_{i=1}^4 \sum_{j=0}^4 \alpha_{ij} (\omega^*)^i \tau^{-j}, \quad (1)$$

где $\omega^* = \rho/100$; $\tau = T/T_{кр}$.

Коэффициенты уравнения (1) приведены в табл. 2. Средняя квадратическая погрешность S_p описания опытных данных не превышает 0,5 %.

Для измерения вязкости использована экспериментальная установка с вискозиметром конструкции И.Ф. Голубева и В.А. Петрова (V вариант). Конструкция мембранного нуль-индикатора и его расположение позволили уменьшить объем вещества под мембраной и в коммуникациях до величины менее 5 % от объема измерительной ячейки. Подводящие линии термостатировались при температуре опыта, что позволило исключить неизомеричность в различных частях установки. Температура опыта измерялась образцовым платиновым термометром сопротивления типа ПТС-10 при помощи цифрового вольтметра Ш-31 класса 0,02/0,001 с погрешностью не более 0,02 К. Время истечения через капилляр измерялось автоматически с помощью частотомера-хронометра Ф-5041. В опытах применялся капилляр радиусом $4,857 \cdot 10^{-5}$ м и длиной $57,46 \cdot 10^{-3}$ м. Опыты проводились по "квазиизохорам". Погрешность определения η не превышала 1,5 %. Результаты измерений, приведенные в табл. 3, аппроксимированы уравнением

$$\ln(\eta_{p,T}/\eta_{o,T}) = \sum_{i=1}^4 \sum_{j=0}^2 \alpha_{ij} \omega^i \tau^{-j}, \quad (2)$$

где $\eta_{p,T}$ – вязкость при параметрах опыта; $\eta_{o,T}$ – вязкость разреженного газа при той же температуре; $\omega = \rho/\rho_{кв}$.

Коэффициенты уравнения (2), описывающего опытные данные с S_η не более 0,4 %, приведены в табл. 4.

Теплопроводность исследовалась стационарным методом нагретой нити. Конструкция измерительной ячейки из тонкостенного платинового капилляра (наружный диаметр 0,6 мм, внутренний – 0,5 мм), который выполнял функцию наружного термометра сопротивления, и платиновой нити диаметром 0,1 мм, служащей одновременно нагревателем и внутренним термометром сопротивления, дала возможность избежать образования конвекции, искажающей результаты измерений. Для сокращения длины коммуникаций при измерении

давления применен мембранный нуль-индикатор.

Опыты проводились по "квазизохорам" с погрешностью, не превышающей 1,7 %. Результаты измерений λ , приведенные в табл. 5, аппроксимированы уравнением

$$\ln(\lambda_{p,T}/\lambda_{o,T}) = \sum_{i=1}^4 \sum_{j=0}^2 a_{ij} \omega^i \tau^{-j}, \quad (3)$$

где $\lambda_{p,T}$ - теплопроводность при параметрах опыта; $\lambda_{o,T}$ - теплопроводность разреженного газа при той же температуре.

Коэффициенты уравнения (3), описывающего опытные данные с S_λ не более 0,3 %, приведены в табл. 4.

В третьей главе приведены краткий анализ существующих методик расчета свойств переноса смесей, результаты обобщения экспериментальных данных и методики расчета и прогнозирования η и λ смесей, состоящих из хладонов, углеводородов и инертных газов в состоянии разреженного и плотного газа и жидкости. Показано, что одна из важнейших задач современной теплофизики - разработка обоснованных методов расчета и прогнозирования свойств веществ и материалов для однокомпонентных веществ в принципе решена. Основой решения этой задачи является использование ОЗСС.

На основании краткого обзора уравнений состояния для смесей делается вывод о том, что эти уравнения представляют собой, как правило, модификации известных эмпирических уравнений для индивидуальных веществ. Основной задачей адаптации этих уравнений для смесей является отыскание комбинационных правил определения коэффициентов уравнений. В том случае, когда не удается с помощью статистически обоснованных или "классических" правил получить качественное описание свойств смесей, они модифицируются с привлечением экспериментальных данных введением "подготовочных" поправок при неизменности формы выбранного уравнения.

Что касается свойств переноса, то вопрос о методиках расчета η и λ смесей разработан недостаточно несмотря на многочисленные попытки его решения. В диссертации проведен краткий обзор и анализ существующих методик и сделан вывод, что большинство из них основано на введении соответствующих поправок в правило аддитивности. Для смесей со значительно отличающимися критическими параметрами компонентов такой подход принципиально неприемлем, поскольку для них существует довольно

большая область параметров, в которой сама смесь и один из ее компонентов находятся в разных фазах.

В связи с этим, методологической основой при обобщении и разработке методик расчета свойств переноса смесей был выбран ОЗСС и поставлена задача выяснить необходимость и достаточность применения только одного определяющего параметра (критерия подобия) для обобщения данных о вязкости и теплопроводности смесей на основе хладонов, углеводородов и инертных газов.

Для обобщения температурной зависимости вязкости смесей в состоянии разреженного газа был составлен массив исходных данных, включающих более 400 опытных точек по данным для аргона, неона, криптона, ксенона, метана, этана, пропана, хладонов R12, R13, R14, R21, R22, R23, R142, смесей R12-R22 ($x_1 = 0,20$; $0,52$; $0,74$), R12-R22-R142 ($x_1 = 0,24$; $x_2 = 0,24$), R22-R50-R740 ($x_1 = 0,62$; $x_2 = 0,32$). В результате получено уравнение

$$\eta_{o,T}^* = \sum_{i=1}^2 a_i \tau^i, \quad (4)$$

где $\eta_{o,T}^* = \eta_{o,T}/\eta_{o,T=1}$; $\eta_{o,T}$ и $\eta_{o,T=1}$ - вязкость разреженного газа, соответственно, при температуре T и $T_{кр}$; $a_1 = 1,082$; $a_2 = -0,082$.

Для всех веществ, включенных в обработку, S_{η} не превышает 1,0 %. Дополнительная проверка предлагаемой методики по опытным данным для 30 смесей показала, что в диапазоне $0,75 < \tau < 3,8$ S_{η} не более 1-2 %, т.е. находится в пределах погрешности эксперимента.

Обобщение данных о коэффициентах теплопроводности выполнено с учетом анализа температурной зависимости фактора Эйнена $f = \lambda M / \eta C_v$ (где M - молекулярная масса, C_v - изохорная теплоемкость) для многоатомных газов. В результате обработки массива данных о теплопроводности для указанных выше веществ и смесей, включающего более 100 значений λ , получено уравнение

$$\lambda_{o,T}^* = (\lambda/C_v)_{o,T} / (\lambda/C_v)_{o,T=1} = \sum_{i=1}^2 a_i \tau^i, \quad (5)$$

где $\lambda_{o,T}$ и $\lambda_{o,T=1}$ - теплопроводность разреженного газа, соответственно, при температуре T и $T_{кр}$; $C_{v,o,T}$ и $C_{v,o,T=1}$ - изохорные теплоемкости, соответственно, при температуре T и $T_{кр}$;

$$\alpha_1 = 1,067; \quad \alpha_2 = -0,067.$$

Введение в комплекс $\lambda_{\rho,T}^*$ значений изохорной теплоемкости учитывает влияние внутренних степеней свободы на диффузионный перенос энергии. Для всех веществ, включенных в обработку, $S_{\lambda,T}$ не превышает 1,5 %. Дополнительная проверка предлагаемой методики для смесей R22-R115 ($x_1 = 0,20; 0,41; 0,60$ и $0,76$), R22-R13B1 ($x_1 = 0,26; 0,59$ и $0,73$) и R14-R22 ($x_1 = 0,58$) показала, что в диапазоне $0,70 < T < 1,26$ $S_{\lambda,T}$ составляет 1,4–2,6 %.

Для разработки методики расчета η и λ смесей в состоянии плотного газа и жидкости были построены зависимости приведенной избыточной вязкости $\Delta\eta^* = \Delta\eta / \Delta\eta_{\omega=1}$ и приведенной избыточной теплопроводности $\Delta\lambda^* = \Delta\lambda / \Delta\lambda_{\omega=1}$ (где $\Delta\eta = \eta_{\rho,T} - \eta_{o,T}$ и $\Delta\lambda = \lambda_{\rho,T} - \lambda_{o,T}$ — избыточные свойства переноса; $\Delta\eta_{\omega=1} = \eta_{\omega=1} - \eta_{o,T}$ и $\Delta\lambda_{\omega=1} = \lambda_{\omega=1} - \lambda_{o,T}$ — избыточные свойства переноса при $\omega = 1$ без учета особенностей поведения свойств вблизи критической точки) от ω . Для вязкости такая зависимость представлена на рис. 1. Из рис. 1 видно, что кривые $\Delta\eta^*(\omega)$ расходятся, причем для каждого из веществ получена своя обобщенная зависимость. Установлено, что для обобщения этих данных достаточно ввести только один фактор, учитывающий отклонение потенциалов межмолекулярного взаимодействия от условий подобия. Для этих целей нами выбран определяющий параметр Л.П. Филиппова, представляющий собой $A = 100 \rho / \rho_c$ при $T = 0,625$ на кривой давления насыщенных паров. Для веществ, включенных в обработку, общий диапазон изменения A весьма широк (от 1,8 до 4,1), что позволило учесть его влияние на свойство переноса.

На рис. 2 представлены изохорные сечения комплекса $\Delta\eta^*(A)$. В результате обработки массива опытных данных о вязкости, состоящего из более, чем 400 значений в диапазоне $\omega = 0,5 \dots 2,0$ и $A = 1,8 \dots 4,1$ получено обобщающее уравнение в виде

$$\Delta\eta_{\rho,T}^* = \sum_{i=1}^4 \sum_{j=0}^2 \alpha_{ij} \omega^i A^j, \quad (6)$$

где $\alpha_{10} = -0,48128$; $\alpha_{11} = 0,19620$; $\alpha_{12} = -0,27626 \cdot 10^{-1}$; $\alpha_{20} = 0,26128 \cdot 10^{-1}$; $\alpha_{21} = -0,66374 \cdot 10^{-1}$; $\alpha_{22} = -0,91717 \cdot 10^{-2}$; $\alpha_{30} = -0,14605 \cdot 10^{-1}$; $\alpha_{31} = -0,26812$; $\alpha_{32} = 0,58195 \cdot 10^{-1}$; $\alpha_{40} = 0,55297$.

Аналогичная обработка массива данных о теплопроводности

позволила получить обобщающее уравнение в виде

$$\Delta\lambda_{\rho,T}^* = \sum_{i=1}^4 \sum_{j=0}^2 \alpha_{ij} \omega^i A^j, \quad (7)$$

где $\alpha_{10} = 0,35226$; $\alpha_{11} = 0,15079$; $\alpha_{12} = -0,19206 \cdot 10^{-1}$; $\alpha_{20} = 0,10453 \cdot 10^{-1}$; $\alpha_{21} = -0,24163$; $\alpha_{22} = 0,18637 \cdot 10^{-1}$; $\alpha_{30} = -0,40608$; $\alpha_{31} = -0,10966 \cdot 10^{-2}$; $\alpha_{32} = 0,19599 \cdot 10^{-1}$; $\alpha_{40} = 0,76196 \cdot 10^{-1}$.

Средняя квадратическая погрешность расчета вязкости и теплопроводности для всех включенных в обработку веществ составила 3,4 %.

Исходной для расчета η и λ с помощью уравнений (6) и (7) информацией является плотность вещества при необходимых параметрах, величины критической плотности и определяющего параметра A , а также избыточные свойства $\Delta\eta_{\omega=1}$ и $\Delta\lambda_{\omega=1}$ либо одно значение свойства в любой точке.

ВЫВОДЫ

1. Методика проведения опытов и модификация экспериментальных установок для измерения термических свойств, вязкости и теплопроводности многокомпонентных смесей с учетом их особенностей, вызванных существенно отличающимися критическими параметрами компонентов, позволяют исключить возможность изменения состава смеси в процессе исследований.

2. Впервые получены экспериментальные данные о плотности, вязкости и теплопроводности трехкомпонентной смеси R22-R50-R740 ($x_1 = 0,62$; $x_2 = 0,32$) в диапазоне температур 250...380 К и давлений 0,4...15,0 МПа.

3. Анализ и обработка опытных данных о плотности смеси, полученных методом пьезометра постоянного объема в одно- и двухфазных областях, показали возможность получения информации о фазовом равновесии жидкость-пар.

4. В результате обработки опытных данных с помощью ЭВМ получен набор уравнений, описывающих результаты измерений плотности со средней квадратической погрешностью не более 0,5 %, вязкости — 1,5 %, теплопроводности — 1,7 %.

5. Проведенные обобщения имеющихся в литературе опытных данных, а также результатов собственных измерений, позволяют на

базе ОЗСС разработать методики расчета и прогнозирования вязкости и теплопроводности многокомпонентных смесей, состоящих из хладонов, углеводородов и инертных газов, на основе минимальной исходной информации. Обобщения описывают область разреженного газа в диапазоне приведенных температур $0,5 < T < 3,0$ со средней квадратической погрешностью 1-2 %, а область плотного газа и жидкости до приведенной плотности $\omega < 2,0 - 3-4$ %.

Методики расчета вязкости и теплопроводности смесей приняты ВНИЦ МВ Госстандарта СССР для их аттестации в качестве Рекомендуемых расчетных методик ГСССД.

Основное содержание диссертации изложено в работах:

1. Разработка рекомендуемых справочных данных о теплопроводности и вязкости хладонов и их смесей /В.З. Геллер, Г.В. Запорожан, С.И. Лозовский, В.Н. Халайджи //Тезисы докл. IV Всесоюз. науч.-техн. конф. "Метрологическое обеспечение теплофизических измерений при низких температурах". -Хабаровск: 1985. -С.102.

2. Теплофизические свойства новых рабочих веществ холодильных машин /В.З. Геллер, Г.В. Запорожан, С.И. Лозовский, В.Н. Халайджи //Тезисы докл. Всесоюз. конф. "Пути интенсификации производства и применение искусственного холода в отраслях АПК". -М.: 1985. -С.37.

3. Лозовский С.И., Халайджи В.Н. Вязкость многокомпонентного хладагента R22-R50-R740; ОТИП им. М.В. Ломоносова. -Одесса, 1986. -7 с. -Библиогр.: 4 назв. -Деп. в УкрНИИТИ 23.09.86 № 2297.

4. Халайджи В.Н., Рыжая И.З. Термодинамические свойства смеси аргон-метан-хладон R22 //Тезисы докл. Всесоюз. науч.-практ. конф. "Интенсификация производства и применения искусственного холода". -Л.: 1986. -С.45.

5. Геллер В.З., Запорожан Г.В., Халайджи В.Н. Методика расчета коэффициентов вязкости и теплопроводности смесей углеводородов и их галоидопроизводных //Теплофизические свойства веществ и материалов. -М.: Стандарты. -1987. Вып.24. -С.15-27.

6. Халайджи В.Н. Методика расчета коэффициентов вязкости и теплопроводности многокомпонентных хладагентов в состоянии разреженного газа; ОТИП им. М.В. Ломоносова. -Одесса, 1987. -12 с. -Библиогр.: 12 назв. -Деп. в УкрНИИТИ 07.07.87, № 1898.

7. Обобщение данных о вязкости одно- и многокомпонентных хладагентов /В.Ф. Чайковский, В.З. Геллер, Г.В. Запорожан, В.Н. Халайджи, С.И. Лозовский //Изв. вузов. Энергетика. -1987. -№ 11. -С.89-92.

8. Термодинамические свойства смеси хладонов R22-метан-аргон /Г.К. Лавренченко, В.З. Геллер, В.Н. Халайджи, Г.Е. Бондарь, Г.З. Шевченко; ОТИП, -Одесса, 1987. -10 с. -Библиогр.: 5 назв. Реф. Вопросы радиоэлектроники. -Сер. ОБТ. -1987. -С.10. (ДСП).

Таблица I
Экспериментальные значения плотности, кг/м³

Р, МПа	Т, К	ρ	Р, МПа	Т, К	ρ
0,8442	372,34	18,24	4,206	371,18	109,6
0,8138	360,22	18,26	3,981	358,32	109,7
0,7090	319,19	18,30	3,779	347,32	109,8
0,6504	297,35	18,33	3,557	335,25	109,9
0,5858	276,14	18,35	3,215	316,80	110,0
0,4750	257,20	18,37	4,535	372,30	114,8
1,904	372,32	42,66	4,301	360,18	114,8
1,826	360,22	42,70	4,101	349,85	115,0
1,652	331,96	42,77	3,790	333,99	115,1
1,568	319,21	42,81	3,590	325,02	115,2
1,409	297,36	42,87	3,377	319,44	115,2
1,205	285,00	42,91	3,330	318,00	115,3
3,024	372,39	72,33	4,569	371,21	115,9
2,891	360,31	72,40	4,317	358,34	116,0
2,575	332,05	72,53	4,008	342,90	116,2
2,421	319,20	72,59	3,560	320,25	116,4
2,183	307,32	72,64	5,393	372,31	144,6
2,050	302,70	72,67	5,083	360,18	144,7
3,173	372,31	74,19	4,819	349,86	144,9
3,034	360,22	74,25	4,390	333,97	145,0
2,713	331,96	74,40	4,297	331,16	145,1
2,559	319,45	74,46	3,995	325,03	145,2
2,389	309,01	74,52	3,915	323,30	145,2
2,325	306,75	74,53	5,945	369,34	160,2

Продолжение таблицы 1

P, МПа	T, К	ρ	P, МПа	T, К	ρ
5,466	353,14	160,5	7,679	354,95	255,2
5,185	343,92	160,6	7,393	349,81	255,4
4,945	336,22	160,7	6,951	342,13	255,6
4,858	333,78	160,8	6,882	340,89	255,6
4,740	330,00	160,8	6,870	340,70	255,6
6,597	371,18	175,4	10,41	373,25	323,8
6,336	363,43	175,6	9,457	360,33	324,3
6,081	355,95	175,7	9,071	355,17	324,5
5,573	341,35	176,0	8,681	350,03	324,7
5,388	336,24	176,1	8,293	344,90	324,9
6,729	372,28	192,0	8,175	343,35	325,0
6,314	360,15	192,1	14,32	368,60	419,5
5,927	349,85	192,4	12,93	358,29	419,8
5,682	343,43	192,5	11,91	350,60	420,0
5,350	335,20	192,6	10,90	342,90	420,4
8,654	373,23	254,7	10,30	338,15	420,7
7,957	360,07	255,1			

Таблица 2

Коэффициенты уравнения (1)

i	α_{ij} при j				
	0	1	2	3	4
1	-0,936215	-0,243610	0,352429	-0,225194	0,053522
2	-0,380043	1,465013	-2,099286	1,322343	-0,308299
3	-0,284360	1,277281	-2,141707	1,589814	-0,441004
4	-0,019913	0,072008	-0,095079	0,053697	-0,010714

Таблица 3

Экспериментальные значения вязкости, мПа·с

T, К	P, МПа	η	T, К	P, МПа	η
302,40	0,22	13,72	325,98	0,24	14,65

Продолжение таблицы 3

T, К	P, МПа	η	T, К	P, МПа	η
346,32	0,26	15,46	338,17	2,89	15,53
373,02	0,28	16,52	353,97	3,06	16,21
297,34	0,59	13,63	372,41	3,26	17,00
321,71	0,64	14,63	323,67	3,77	15,40
352,25	0,71	15,85	342,88	4,10	16,29
372,84	0,76	16,67	363,80	4,54	17,24
317,16	1,91	14,38	374,87	4,73	17,69
325,90	1,97	14,75	333,68	5,04	16,43
345,45	2,10	15,59	344,03	5,29	16,92
364,38	2,24	16,42	353,58	5,52	17,37
323,64	2,73	14,91	370,96	5,93	18,14

Таблица 4

Коэффициенты уравнений (2) и (3)

Коэффициент	Вязкость уравнение (2)	Теплопроводность уравнение (3)
α_{10}	-0,16147	0,14798
α_{11}	$0,22696 \cdot 10^{-1}$	-0,75114
α_{12}	0,16982	$0,12147 \cdot 10^1$
α_{20}	$0,63873 \cdot 10^1$	-0,11041
α_{21}	$-0,46502 \cdot 10^1$	$0,18323 \cdot 10^1$
α_{22}	$-0,12357 \cdot 10^1$	$-0,17091 \cdot 10^1$
α_{30}	$-0,88366 \cdot 10^1$	-0,18691
α_{31}	$0,45817 \cdot 10^1$	-0,62335
α_{32}	$0,51681 \cdot 10^1$	0,38273
α_{40}	$-0,19450 \cdot 10^1$	0,14433

Таблица 5

Экспериментальные значения теплопроводности 10^4 , Вт/(м·К)

T, К	P, МПа	λ	T, К	P, МПа	λ
280,0	0,529	205	322,8	0,660	253
281,8	0,535	206	350,2	0,763	281
321,6	0,656	251	350,8	0,769	283

XV 1027

Продолжение таблицы 5

T, К	P, МПа	λ	T, К	P, МПа	λ
375,5	0,845	309	343,3	7,037	357
376,1	0,849	310	344,2	7,042	358
303,8	1,453	242	361,8	7,541	368
304,6	1,457	243	375,8	7,950	382
318,2	1,530	258	376,4	7,955	382
326,0	1,602	266	346,4	7,187	359
346,9	1,685	287	347,4	7,193	360
348,1	1,688	287	361,4	7,622	369
378,0	1,851	319	376,3	8,060	382
379,2	1,857	320	377,5	8,068	382
328,0	3,740	296	347,5	11,141	394
329,0	3,747	298	348,1	11,147	394
343,4	3,949	310	362,9	12,010	407
344,5	3,954	311	363,6	12,014	406
360,1	4,177	321	377,1	12,730	417
374,2	4,371	340	377,6	12,787	418
375,2	4,374	340			

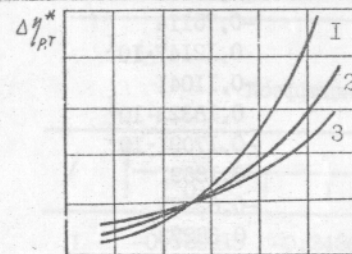


Рис. 1. Зависимость $\Delta \eta_{PT}^*$ от ω
 1 - ксенон ($A=4,1$); 2 - этан
 ($A=2,39$); 3 - хладон R23 ($A=1,77$)

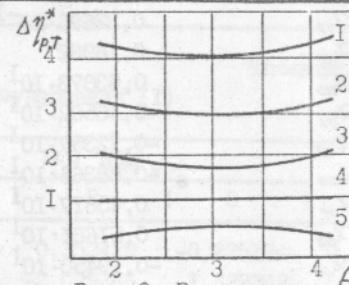


Рис. 2. Зависимость $\Delta \eta_{PT}^*$ от A
 1 - $\omega=2,0$; 2 - $\omega=1,75$;
 3 - $\omega=1,5$; 4 - $\omega=1,0$;
 5 - $\omega=0,5$

Винт