

А.А. Вассерман*, **С.В. Козловский**, **В.П. Мальчевский****

Одесский национальный морской университет, ул. Мечникова, 34, г. Одесса, Украина, 65029

*e-mail: avas@paco.net

**e-mail: valikm@te.net.ua

АВТОМАТИЗИРОВАННАЯ СИСТЕМА ПО ТЕПЛОФИЗИЧЕСКИМ СВОЙСТВАМ РАБОЧИХ ВЕЩЕСТВ НИЗКОТЕМПЕРАТУРНОЙ ТЕХНИКИ

Рассмотрены автоматизированные информационные системы, обеспечивающие пользователей данными о теплофизических свойствах веществ. Описана автоматизированная система для расчёта теплофизических свойств криогенных веществ, хладагентов и их смесей в газообразном и жидком состояниях, разработанная авторами статьи. Система позволяет рассчитывать коэффициент сжимаемости, плотность, энтальпию, энтропию, изохорную и изобарную теплоёмкости, скорость звука, адиабатный дроссель-эффект, вязкость, теплопроводность и ряд других свойств. Эти свойства могут быть определены в однофазной и двухфазной областях и на линии насыщения при температуре от тройной точки до 400...1500 К и давлении до 35...100 МПа при двенадцати комбинациях независимых переменных.

Ключевые слова: Автоматизированная система. Криогенные вещества. Хладагенты. Газы. Жидкости. Теплофизические свойства.

A.A. Vasserman, S.V. Kozlovsky, V.P. Malchevsky

AUTOMATED SYSTEM ON THERMOPHYSICAL PROPERTIES OF WORKING FLUIDS FOR LOWTEMPERATURE TECHNICS

Automated information systems were considered which provide users of data on thermophysical properties of fluids. An automated system for calculating the thermophysical properties of cryogenic fluids, refrigerants and their mixtures in gaseous and liquid states, developed by authors of paper, has been described. It allows the calculation of compressibility factor, density, enthalpy, entropy, isochoric and isobaric specific heats, speed of sound, Joule-Thomson coefficient, viscosity, thermal conductivity, and some other properties. These properties can be determined in the single-phase and two-phase regions and on the phase-equilibrium lines at temperature from the triple point up to 400...1500 K and at pressure 35...100 MPa for twelve combinations of independent variables.

Keywords: Automated system. Cryogenic substances. Refrigerants. Gases. Liquids. Thermophysical properties.

1. ВВЕДЕНИЕ

Данные о термодинамических свойствах и коэффициентах переноса рабочих веществ криогенных и холодильных установок необходимы для их проектирования и исследования. Во многих случаях эти данные должны определяться при задании различных независимых переменных в широком диапазоне значений последних. В настоящее время созданы автоматизированные информационные системы (АИС), с помощью которых рассчитывают теплофизические свойства (ТФС) рабочих веществ по уравнениям состояния и уравнениям для свойств переноса.

В статье приведён обзор наиболее известных автоматизированных информационных систем по теплофизическим свойствам газов и жидкостей, причём

значительное внимание уделено системам, разработанным в России и Украине. Описана также созданная нами автоматизированная система для расчёта термодинамических и транспортных свойств одноатомных и двухатомных газов, воздуха, диоксида углерода, аммиака, ряда углеводородов и хладагентов и некоторых смесей, используемых в технике низких температур.

2. ОБЗОР АВТОМАТИЗИРОВАННЫХ ИНФОРМАЦИОННЫХ СИСТЕМ

Важными источниками информации о теплофизических свойствах веществ являются банки данных и автоматизированные информационные системы. Банки данных обеспечивают централизованное накопле-

ние в электронной форме и коллективное использование имеющихся экспериментальных и расчётных данных. Автоматизированные информационные системы, в отличие от банков данных, не хранят численные значения свойств, но с помощью включённых в них программных модулей и уравнений могут генерировать неограниченный объём информации при различных комбинациях независимых переменных.

Автоматизированные системы достаточно просты по структуре и в эксплуатации и могут применяться в персональных компьютерах пользователей. Они весьма эффективны в случаях использования данных о свойствах ограниченного числа веществ для решения прикладных задач. При этом можно обеспечить оперативное взаимодействие систем с прикладными программами. Краткие сведения о четырнадцати отечественных и зарубежных АИС представлены в табл. 1.

В России и Украине первоначально были разработаны системы АИСТ [1] (ВНИЦ МВ Госстандарта) и АВЕСТА [2] (ВНИИПКНефтехим, Киев). Система АИСТ рассчитывала теплофизические свойства технически важных газов, в том числе воздуха и его компонентов. АВЕСТА предоставляла пользователям информацию о свойствах многих веществ, включая углеводороды и нефтепродукты, а также экспериментальные и библиографические данные, т.е. сочетала особенности АИС и банка данных. Обе АИС входили в состав комплексной системы оперативного обеспечения народного хозяйства нормативно-справочными данными о теплофизических свойствах технически важных газов и жидкостей, отмеченной Премией Со-

вета Министров СССР в 1987 г.

В Одесском национальном морском университете (ОНМУ) и Одесской государственной академии холода (ОГАХ) разработана АИС Air-Pro для определения свойств азота, кислорода, аргона и воздуха [3]. Система обеспечивает расчёт 20-ти ТФС, в частности плотности, энтальпии, энтропии, изохорной и изобарной теплоёмкостей, скорости звука, адиабатного дроссель-эффекта, динамической вязкости и теплопроводности. Свойства могут быть определены в однофазной и двухфазной областях и на линиях фазового равновесия при температурах от тройной точки до 2500 К и давлениях до 100 МПа для 9-ти комбинаций независимых переменных. При этом используются уравнения из таблиц стандартных справочных данных и монографии [17], а также уравнения зарубежных авторов. Позднее те же авторы создали АИС Thermo-Pro [4], рассчитывающую ТФС 20-ти газов и жидкостей: одноатомных и двухатомных газов, воздуха, воды и водяного пара, диоксида углерода, аммиака, углеводородов метанового ряда и нескольких хладагентов.

В дальнейшем ряд программ из этих систем использован в АИС Cryo-Syst [5], предназначенной как для определения ТФС, так и для расчёта и исследования процессов криогенных установок. С её помощью можно рассчитывать процессы изотермического сжатия, адиабатного дросселирования, политропного расширения, теплообмена в теплообменных аппаратах, разделения смеси пара и жидкости в сосуде с жидкостью и ректификации в установке для разделе-

Таблица 1. Автоматизированные информационные системы по теплофизическим свойствам веществ

Наименование системы и публикация о ней	Организация-разработчик	Вещества, для которых рассчитываются свойства
АИСТ [1]	ВНИЦ МВ (Москва)	Технически важные газы и жидкости
АВЕСТА [2]	НПО «МАСМА» (Киев)	Технически важные вещества, включая углеводороды и нефтепродукты
Air-Pro [3]	ОНМУ-ОГАХ (Одесса)	Азот, кислород, аргон и воздух
Thermo-Pro [4]		Одно- и двухатомные газы, воздух, вода и водяной пар, диоксид углерода, углеводороды метанового ряда
Cryo-Syst [5]		12 криогенных веществ и программы для расчёта криогенных установок
Cryo-Refr [6]	ОНМУ	Криогенные вещества и альтернативные хладагенты
СТАРС [7]	ООО «НТП Трубопровод» (Москва)	1600 индивидуальных веществ, нефтяных фракций и смесей
Система Центра по свойствам веществ [8]	Империял-колледж (Лондон)	Технически важные газы и жидкости (по монографиям IUPAC)
NIST Chemistry WebBook [9]	NIST (Булдер, США)	74 вещества, в том числе криогенные
REFPROP [10,11]		100 веществ и смесей постоянного состава
Solkane [12]	Solvay Fluor GmbH (Германия)	21 хладагент и программы для расчёта циклов холодильных установок
Библиотеки свойств рабочих веществ [13,14]	Университет Зиттау (Германия)	25 газов и их смесей
CoolPack [15]	Технический университет Дании (Лингби)	45 хладагентов и программы для расчёта холодильных установок
PROPATH [16]	Университеты Нагасаки и Киушу (Япония)	Одно- и двухатомные газы, аммиак, вода, углеводороды и хладагенты

ния воздуха.

Опыт, накопленный при разработке систем [3,4], использован при создании АИС Cguo-Refg для расчёта свойств криогенных веществ и альтернативных хладагентов. Первоначальный вариант системы [6] позволял рассчитывать плотность, энтальпию, энтропию, изохорную и изобарную теплоёмкости и другие свойства 20-ти технически важных веществ: одноатомных газов, азота, кислорода, воздуха, диоксида углерода, аммиака, некоторых углеводородов и альтернативных хладагентов. Свойства определялись при температурах от тройной точки до 1500 К и давлениях до 100 МПа при 10-ти комбинациях независимых переменных. Для определения погрешностей значений свойств можно было использовать при расчётах уравнения разных авторов. Усовершенствованная версия этой системы, рассчитывающая дополнительно свойства 11-ти смесей хладагентов при 12-ти комбинациях переменных, описана ниже в разделе 3.

Недавно московские специалисты разработали систему термодинамических автоматизированных расчётов свойств «СТАРС» [7]. Система рассчитывает ТФС и фазовое состояние индивидуальных веществ, нефтяных фракций, смесей, в том числе смесей углеводородов с нефтяными фракциями. Рассчитываются плотность, коэффициент сжимаемости, энтальпия, изохорная и изобарная теплоёмкости, динамическая и кинематическая вязкости, теплопроводность и ряд других свойств газов и жидкостей. Программа позволяет находить некоторые величины, относящиеся к задачам фазового равновесия. База данных содержит информацию о 1600 индивидуальных веществах и нефтепродуктах.

Из АИС, разработанных в дальнем зарубежье и описанных в монографии [8], отметим систему центра по ТФС Империял-колледжа (Лондон). В систему включены уравнения состояния из монографий, опубликованных Международным союзом по теоретической и прикладной химии (IUPAC), а также уравнения для расчёта свойств переноса технически важных веществ.

Среди АИС, активно функционирующих в США, широко известны системы NIST Chemistry WebBook [9] и REFPROP [10,11]. Система [9] генерирует данные о плотности, удельном объёме, внутренней энергии, энтальпии, энтропии, теплоёмкостях c_v и c_p , адиабатном дроссель-эффекте, скорости звука, динамической вязкости, теплопроводности и поверхностном натяжении 74-ёх технически важных веществ, в том числе криогенных. Она представляет данные в табличном и графическом виде и определяет свойства в однофазной области на изотермах, изобарах, изохорах и в двухфазной области в координатах $T-x$ и $p-x$. Для построения диаграмм можно выбрать любые два свойства, имеющиеся в таблице результатов. Кроме таблиц свойств и диаграмм, система даёт ссылки на источники, из которых взяты уравнения для расчёта ТФС, и оценки погрешностей рассчитанных значений свойств. Система относится к бесплатным ресурсам Интернет; её адрес: <http://webbook.nist.gov>.

Коммерческая система REFPROP [10,11] позволяет рассчитывать ТФС хладагентов и их смесей, причём для каждого вещества можно использовать несколько уравнений, наиболее точное из которых — рекомендованное, а остальные — альтернативные. Свойства смесей система рассчитывает с привлечением функции взаимодействия, которая для исследованных смесей определяется по экспериментальным данным, а для неисследованных — по обобщённому уравнению. Версия системы 8.1 обеспечивает расчёт 49-ти теплофизических свойств 100 чистых хладагентов и смесей постоянного состава. Пользователи могут также определять термодинамические свойства смесей заданного ими состава, если модель расчёта, используемая в системе, применима для компонентов смеси. Система даёт возможность изображать процессы в диаграммах $T-s$; $T-h$; $p-h$.

В Германии компанией «Solvay Fluor GmbH» разработана система Solkane [12], рассчитывающая 15 свойств 21-го хладагента (в основном продуктов этой компании) в однофазной и двухфазной областях и на кривой насыщения. Возможен расчёт параметров характерных точек циклов одно- и двухступенчатых холодильных установок и размеров трубопроводов. Система обеспечивает пользователей диаграммами $p-h$ и $T-s$ для хладагентов, выпускаемых компанией, и по запросу выдаёт исчерпывающую информацию об этих веществах. Она размещена на сайте: www.solvay-fluor.com

Недавно немецкие исследователи разработали комплекс программ для расчёта ТФС 25-ти рабочих веществ энергетических и холодильных установок [13,14]. Среди этих веществ — влажный воздух и продукты сгорания, вода и водяной пар, диоксид углерода, аммиак, гелий, водород, метанол, некоторые углеводороды и хладагенты. Влажный воздух и продукты сгорания рассматриваются как идеальная смесь, а их компоненты — как реальные газы.

В техническом университете Дании создана система CoolPack [15] для проектирования и оптимизации холодильных установок. В ней есть программы для расчёта свойств 45-ти хладагентов, включая воздух и его компоненты, в однофазной области (при 8-ми сочетаниях независимых переменных) и в состоянии насыщения. В число свойств входят p, v, T -данные, энтальпия, энтропия, теплоёмкости c_v и c_p , скорость звука, показатель адиабаты, динамическая вязкость и теплопроводность. Система включает также программы для расчёта циклов одно- и двухступенчатых холодильных установок, энергетического анализа, расчёта холодильных систем, их вспомогательного оборудования и динамических расчётов, т.е. сочетает программы для определения свойств с прикладными программами (как и АИС [5]). Её адрес в Интернет: www.et.dtu.dk/CoolPack.

Японские учёные разработали систему PROPATN [16], рассчитывающую ТФС свыше 50-ти чистых веществ и смесей постоянного состава, включая воздух. Система обеспечивает расчёт тех же свойств, что и система CoolPack, и ряда других свойств, общее число

которых равно 25-ти. Возможен расчёт свойств смесей идеальных газов, влажного воздуха и свойств бинарных смесей по обобщённым уравнениям. Результаты расчётов могут быть представлены в табличном и графическом виде. Система доступна по адресу: <http://www2.mech.nagasaki-u.ac.jp/PROPATH/>.

в полиномиальной и фундаментальной формах. Иногда для большей надёжности предлагаются две формы уравнения состояния, и пользователь может выбрать любую из них. Для расчёта свойств переноса применяются зависимости вязкости и теплопроводности от температуры и плотности. Помимо указанных уравне-

3. СИСТЕМА, РАЗРАБОТАННАЯ ВО ННМУ

3.1. Общая характеристика системы

Автоматизированная система, разработанная нами, рассчитывает ТФС 20-ти технически важных газов и жидкостей: одноатомных газов, воздуха и его основных компонентов, диоксида углерода, аммиака, пяти углеводородов и шести альтернативных хладагентов, а также 11-ти смесей, используемых в технике низких температур. Перечень этих чистых веществ и смесей приведён в таблицах 2 и 3, соответственно. Свойства рассчитываются при задании значений двух независимых переменных для однофазной и двухфазной областей и одной переменной (температура либо давление) для кривой насыщения либо плавления. Теплофизические свойства могут быть рассчитаны по вариантам «Одиночный» (при заданных значениях независимых переменных) и «Серия» (при изменении значения температуры либо давления в определённом интервале с конкретным шагом). Набор свойств и единицы их измерения выбираются в соответствии с решаемой задачей. В системе поддерживаются два языка: английский и русский.

Вид рабочего окна с рассчитанными значениями свойств азота представлен на рис. 1. Оно состоит из строки основного меню, рабочих панелей, информационной панели и таблицы с результатами расчётов, которые можно сохранить в виде текстового файла либо электронной таблицы MS Excel. На рисунке показано также окно для выбора независимых переменных. На рис. 2 показано рабочее окно со значениями свойств смеси R32/R125 при массовых долях компонентов 0,5 вместе с окном для задания значений независимых переменных.

Расчёт термодинамических свойств проводится чаще всего на основе единых уравнений состояния

Таблица 2. Список чистых веществ; информация об уравнениях и интервалы параметров

Вещества	Информация об уравнениях		Интервал температур, К	Максимальная плотность, кг/м ³	Максимальное давление, МПа
	Для термодинамических свойств	Для свойств переноса			
Гелий	[18]		2-1500	300	100
	[19]		2,2-1500	307	100
		[20]	2-1000	300	100
Неон	[21]	[21]	25-1300	1400	100
	[22]		25-700	1248	700
Аргон	[23]		84-700	1830	1000
	[24]		84-1200	1830	1000
		[21]	84-1300	1500	100
Криптон	[25]	[21]	120-1300	2570	100
Ксенон	[21]	[21]	161-1300	3100	100
Азот	[26]		65-1500	920	100
	[27]		63-1000	1600	2200
		[28]	65-1000	920	200
Кислород	[29]		55-1500	1350	100
	[30]		55-300	1340	80
		[31]	70-500	1340	100
Воздух	[32]		70-1500	1020	100
	[33]		60-2000	1650	2000
		[34]	150-1000	850	100
Диоксид углерода	[35]	[35]	220-1300	1300	200
	[36]		216-1100	1450	800
Аммиак	[37]		195-700	850	1000
Метан	[38]		91-1000	480	100
	[39]		91-625	580	1000
		[40]	91-1000	480	100
Этан	[41]		91-700	660	80
	[42]	[42]	90-600	660	70
Этилен	[43]		110-600	700	300
	[44]		105-450	680	260
Пропан	[45]		100-700	720	100
n-Бутан	[46]		135-700	750	100
Трифторметан (R23)	[47]		118-475	1700	120
Дифторметан (R32)	[48,49]		180-500	1380	70
	[50]		180-500	1380	70
	[51]		136-435	1430	70
Фторметан (R41)	[52]		130-425	970	70
Пентафторэтан (R125)	[48,49]		180-500	1760	70
	[50]		180-500	1760	70
	[51]		172-480	1690	68
Тetraфторэтан (R134a)	[51]		170-455	1550	70
Трифторэтан (R143a)	[49,53]		165-433	1270	35
	[51]		161-433	1276	35

Таблица 3. Список смесей; информация об уравнениях состояния и интервалы параметров

Смеси	Информация об уравнениях состояния	Интервал температур, К	Максимальная плотность, кг/м³	Максимальное давление, МПа
R23/R744	[54]	254-353	1136	6
R32/R125	[51]	200-440	1475	35
R32/R134a	[51]	200-440	1484	35
R41/R744	[55]	192-400	1097	35
R125/R134a	[51]	200-413	1604	35
R125/R143a	[51]	200-413	1441	35
R125/R290	[56]	253-423	1150	7
R134a/R143a	[51]	243-413	1431	17
R134a/R290	[57]	255-400	1100	6
R170/R290	[58]	195-400	630	35
R170/R744	[59]	207-478	1150	70

ний, для каждого вещества заданы параметры критической точки и уравнения для расчёта идеально-газовых функций и давлений на кривых насыщения и плавления. Для большинства веществ использованы надёжные уравнения из таблиц стандартных справочных данных, описывающие экспериментальные данные о ТФС с высокой точностью.

Система обеспечивает расчёт коэффициента сжимаемости, удельного объёма, плотности, энтальпии, внутренней энергии, энтропии, изохорной и изобарной теплоёмкостей, скорости звука, адиабатного дроссель-эффекта, показателя адиабаты, коэффициента объёмного расширения, термического коэффициента давления, давления насыщения, теплоты парообразования, летучести, динамической и кинематической вязкостей, теплопроводности, температуропроводности и числа Прандтля. Свойства могут быть определены в однофазной области, на линиях равновесия фаз и в двухфазной области при температурах от тройной точки до 400...1500 К и давлениях до 35...100 МПа (для некоторых веществ — до более высоких давлений). Подробная информация об интервалах параметров для чистых веществ и смесей приведена в таблицах 2 и 3; там также даны ссылки на литературные источники, из которых взяты уравнения для расчёта свойств.

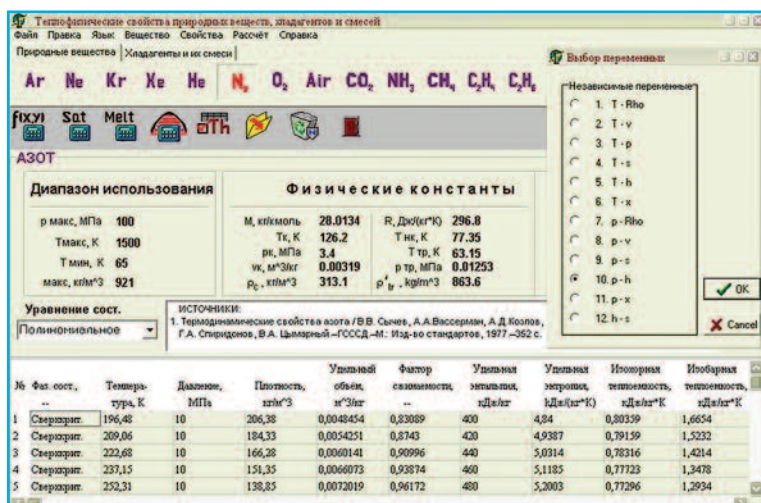


Рис. 1. Рабочее окно со значениями свойств азота, рассчитанными в координатах давление-энтальпия, и окно для выбора независимых переменных

3.2. Используемые уравнения

Как отмечено ранее, для расчета термодинамических свойств чистых веществ используются уравнения состояния в двух формах — полиномиальной и фундаментальной. Уравнения в полиномиальной форме, удобные для быстрого расчёта свойств, записываются в виде:

$$z = 1 + \sum_{i=1}^m \sum_{j=0}^{s_i} b_{ij} \frac{\omega^i}{\tau^j}, \quad (1)$$

где $z = p/(pRT)$ — коэффициент сжимаемости; b_{ij} — коэффициенты уравнения; $\omega = \rho/\rho_{кр}$ — приведённая плотность, $\tau = T/T_{кр}$ — приведённая температура; T, p, ρ, R — соответственно температура, давление, плотность и газовая постоянная; индекс «кр» обозначает свойства в критической точке.

Несмотря на простоту формы, эти уравнения состояния [18,21,26,29,32,35,38,41,43,45,46,50] обеспечивают вполне приемлемую точность расчёта термодина-

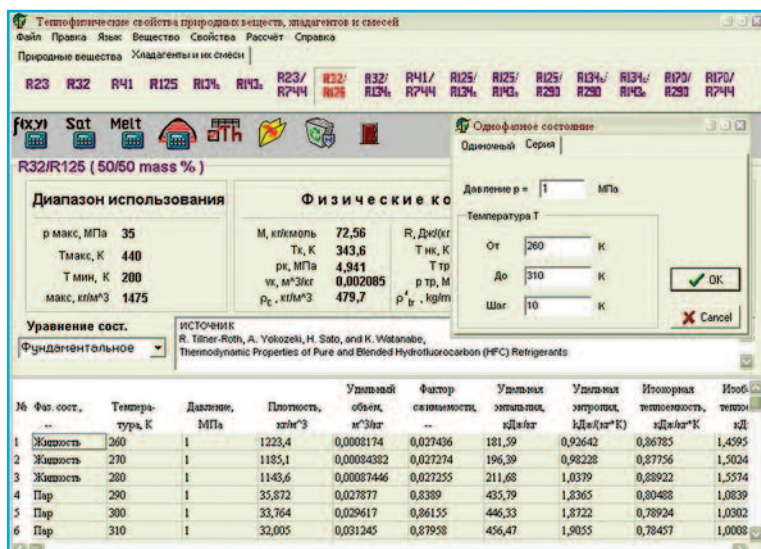


Рис. 2. Рабочее окно со значениями свойств смеси R32/R125, рассчитанными в координатах давление-температура, и окно для задания значений независимых переменных

мических свойств.

Наряду с полиномиальными уравнениями, в системе также широко используются так называемые фундаментальные уравнения состояния, имеющие форму:

$$\alpha(\omega, \tau) = \frac{A(\rho, T)}{RT} = \alpha^0(\omega, \tau) + \alpha^r(\omega, \tau), \quad (2)$$

где $\alpha(\omega, \tau) = A(\rho, T)/(RT)$ — безразмерная энергия Гельмгольца; α^0 — идеально-газовая часть α ; а α^r — реально-газовая.

Функция α^0 определяется по данным об изобарной теплоёмкости идеального газа и представлена зависимостью от приведённой температуры τ . Функция α^r может быть записана в виде:

$$\alpha^r(\omega, \tau) = \sum_{i=1}^m \sum_{j=0}^{s_i} b_{ij} \frac{\omega^i}{\tau^j} + \exp(-\gamma\omega^2) \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^{q_i} c_{ij} \frac{\omega^i}{\tau^j}, \quad (3)$$

где b_{ij} , c_{ij} , γ — коэффициенты уравнения состояния.

В некоторых случаях функция α^r выражается в более сложной форме, которая включает в себя различные степени при ω в экспоненциальной части.

Фундаментальные уравнения [19,22-24,27,30,33,36,37,39,42,44,47,48,49,51-61] обеспечивают более высокую точность в критической области, чем полиномиальные. Преимущество уравнения (2) — возможность расчёта всех термодинамических свойств только дифференцированием функции $\alpha(\omega, \tau)$. Уравнения состояния в обеих формах позволяют рассчитывать термодинамические свойства в однофазной области и на кривой насыщения, поскольку при их составлении учитывалось правило Максвелла.

Уравнения, описывающие данные о вязкости и теплопроводности, данные об идеально-газовых функциях, о давлениях насыщения и плавления имеют различные формы для разных веществ. Это обстоятельство было учтено при создании программ для системы.

Для расчёта термодинамических свойств смесей используются уравнения состояния в форме, предложенной Леммоном и Джекобсоном [60,61]:

$$\alpha_m(\omega, \tau, x) = \alpha_m^0(\omega, \tau, x) + \alpha_m^E(\omega, \tau, x), \quad (4)$$

где $\alpha_m^0(\omega, \tau, x)$ и $\alpha_m^E(\omega, \tau, x)$ — безразмерная энергия Гельмгольца реальной и идеальной смеси; $\alpha_m^E(\omega, \tau, x)$ — добавка к энергии Гельмгольца от смешения (функция взаимодействия).

Величины $\alpha_m^0(\omega, \tau, x)$ и $\alpha_m^E(\omega, \tau, x)$ для бинарной смеси рассчитывают по выражениям:

$$\alpha_m^0(\omega, \tau, x) = \sum_{k=1}^2 x_k [\alpha_k^0(\omega, \tau) + \alpha_k^r(\omega, \tau) + \ln x_k]; \quad (5)$$

$$\alpha^E(\omega, \tau, x) = x_1 x_2 \left[\sum_{i=1}^m \sum_{j=0}^r a_{ij} \omega^i \tau^{-j} + \exp(-\omega^2) \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^s b_{ij} \omega^i \tau^{-j} \right], \quad (6)$$

где $\alpha_k^0(\omega, \tau)$ и $\alpha_k^r(\omega, \tau)$ — идеально-газовая и реально-газовая части свободной энергии Гельмгольца компонента k ; x_k — мольные доли компонентов смеси; a_{ij} и b_{ij} — коэффициенты полиномиальной и экспоненциальной частей функции взаимодействия.

Уравнения состояния, использованные в системе, позволяют рассчитывать плотность газа и жидкости при давлениях до 10 МПа и температурах до 400 К с погрешностями $\pm 0,05$ %, а при более высоких значениях параметров с погрешностями $\pm 0,1$ %. Погрешности расчёта энтальпии газа и жидкости не превышают 0,5 и 1,5 кДж/кг, а теплоёмкости — 0,5 и 2,0 %. В критической области погрешность может быть в 2-3 раза выше максимальных из указанных величин.

3.3. Особенности расчета свойств

При проектировании установок низкотемпературной техники термодинамические свойства рассчитываются неоднократно для различных комбинаций независимых переменных. Рассчитанные значения свойств должны быть точными и согласованными между собой во всех точках термодинамической поверхности. Точность расчёта обеспечивается использованием надёжных уравнений состояния и уравнений для расчёта свойств переноса каждого вещества, а также заданием малых значений допустимых погрешностей в итерационных циклах.

При создании автоматизированной системы много внимания было уделено составлению алгоритма для расчёта теплофизических свойств с применением различных комбинаций независимых переменных, которыми могут быть как термические, так и калорические свойства. Расчёт возможен при следующих двенадцати комбинациях независимых переменных: температура-плотность (T - ρ), температура-удельный объём (T - v), температура-давление (T - p), температура-энтальпия (T - h), температура-энтропия (T - s), температура-степень сухости (T - x), давление-плотность (p - ρ), давление-удельный объём (p - v), давление-энтальпия (p - h), давление-энтропия (p - s), давление-степень сухости (p - x), энтальпия-энтропия (h - s).

Сложности расчёта теплофизических свойств при различных комбинациях независимых переменных обусловлены тем, что в уравнениях состояния плотность и температура имеют степени больше трёх и для определения этих параметров необходимо использовать итерационные методы.

Для расчёта свойств в двухфазной области и в координатах T - ρ и T - v при температурах ниже критической сначала рассчитываются свойства на линии насыщения. Их используют для определения фазового состояния, в котором находится вещество при данных значениях независимых параметров. Необходимые значения давления (или температуры) и плотностей насыщенных пара и жидкости в первом приближении рассчитываются по вспомогательным уравнениям, а затем по единому уравнению состояния с учётом пра-

вила Максвелла.

Для расчёта свойств в координатах $T-p$, $T-h$ и $T-s$ сначала необходимо определить плотность, которая наряду с температурой используется в уравнении состояния и в уравнениях для свойств переноса. Для расчёта плотности применяется один из двух итерационных методов (Ньютона либо половинного деления). После осуществления некоторого количества итераций достигается хорошая согласованность заданного значения давления, энтальпии или энтропии со значением, рассчитанным по уравнению состояния.

Для определения свойств в координатах $p-v$ и $p-p$ сначала находится температура итерацией на заданной изохоре методом половинного деления. После этого рассчитываются все свойства по известному алгоритму в соответствии с фазовым состоянием вещества.

В координатах $p-h$ и $p-s$ для расчёта термодинамических свойств необходимо определить температуру и плотность, для чего применяется двойной итерационный цикл. Сначала путём итерации на изобаре на базе известных термодинамических соотношений определяется температура. Затем для заданного давления находится значение плотности, необходимое для расчёта калорических свойств (h либо s). Итерационные циклы при определении T и p повторяются, пока погрешности нахождения плотности, энтальпии и энтропии не достигнут приемлемых значений.

При расчёте свойств в координатах $h-s$ не задан ни один из трёх термических параметров, связанных с уравнением состояния. Поэтому в этих координатах первоначально рассчитываются значения свойств на заданной изоэнтропе в некотором интервале температур, а затем путём итераций определяется значение температуры, соответствующее заданной величине энтальпии.

Для обеспечения согласования значений термодинамических свойств, которые рассчитываются в различных системах координат, были приняты следующие значения допустимых погрешностей: для давления и плотности — 0,001 %, для температуры — 0,0001 К, для энтальпии — 0,05 Дж/моль и для энтропии — 0,005 Дж/(моль·К).

Программное обеспечение автоматизированной системы имеет модульную структуру. Это позволяет достаточно просто увеличивать количество веществ, рассчитываемых свойств и независимых переменных. Программа предназначена для работы под руководством операционных систем Windows 98/2000/NT/Me/XP/7. При установке на жёсткий диск она занимает 10 Мегабайт.

4. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Автоматизированные системы позволяют оперативно определять теплофизические свойства веществ в различных координатах и заменять при расчётах диаграммы состояния. Они имеют существенные преимущества по сравнению с обычными справочниками.

Система, разработанная в ОНМУ, обеспечивает точность и внутреннее согласование значений

свойств, рассчитываемых при разных комбинациях независимых переменных. Информационные возможности этой системы шире возможностей имеющихся таблиц справочных данных.

Структура программного обеспечения системы позволяет увеличивать количество комбинаций независимых переменных и рассчитываемых свойств, а также пополнять систему уравнениями для расчёта свойств новых веществ.

ЛИТЕРАТУРА

1. Автоматизированная система стандартных справочных данных о теплофизических свойствах газов и жидкостей. Обзорная информация/ **В.П. Воронина, Н.Е. Пнездилов, А.Д. Козлов и др.** — М.: ГСССД, 1977. — 26 с.
2. Автоматизированная единая система теплофизического абонирования АВЕСТА. Технические условия на опытную эксплуатацию. — Киев: ВНИИПКНефтехим, 1974. — 49 с.
3. **Вассерман А.А., Бодюл С.В.** Автоматизированная система для определения теплофизических свойств воздуха и его компонентов// Технические газы. — 2001. — № 3. — С. 4-9.
4. **Вассерман А.А., Бодюл С.В.** Автоматизированная система для определения теплофизических свойств газов и жидкостей// Тезисы докл. X Российской конф. по теплофиз. свойствам веществ. — Казань: Изд-во «Бутлеровские сообщения», 2002. — С. 202-204.
5. **Vasserman A.A., Bodyul S.V., Bodyul E.S.** Automated System for Calculating Thermophysical Properties of Fluids and Thermal Processes of Cryogenic Plants// Int. J. Thermophys. — 2004. — V. 25. — No 2. — P. 371-377.
6. **Вассерман А.А., Мальчевский В.П.** Система для расчёта теплофизических свойств криогенных веществ и альтернативных хладагентов// Технические газы. — 2007. — № 5. — С. 54-58.
7. **Корельштейн Л.Б., Лисман В.Ф.** Система расчета теплофизических свойств веществ и фазовых равновесий «СТАРС»// Тезисы докл. XII Российской конф. по теплофиз. свойствам веществ. — М.: Изд-во «Интерконтакт Наука», 2008. — С. 260.
8. Transport Properties of Fluids. Their Correlation, Prediction and Estimation/ **M.J. Assael, E. Bich, R.J.B. Craven and oth.; Edited by J. Millat, J.H. Dymond, C.A. Nieto de Castro.** — Cambridge: Cambr. University Press, 1996. — 483 p.
9. **Linstrom P.J., Mallard W.G.** The NIST Chemistry WebBook: A Chemical Data Resource on the Internet// Abstracts of the Fourteenth Symposium on Thermophysical Properties, June 25-30, 2000, Boulder, Colorado, USA. — P. 315.
10. **Lemmon E.W., McLinden M.O., Huber M.L.** REFPROP, Thermodynamic and Transport Properties of Refrigerants and Refrigerant Mixtures. Standard Reference Database 23 — Version 7.0, NIST, USA, 2002.
11. **Lemmon E.W., Huber M.L., McLinden M.O.** REFPROP — Reference Fluid Thermodynamic and Transport Properties// CD ROM of the Seventeenth Symp. on Thermophys.

- Prop. — Boulder, Colorado, USA. 2009. — File p599.
12. Solkane Refrigerant Software — Version 6.0.0.3// Solvay Fluor GmbH Technical Service-Refrigerants-PO Box 220.
13. Property Database for Humid Combustion Gases, Humid Air, Water and Steam for Calculating Heat Cycles and Turbines/ **H.-J. Kretzschmar, I. Stocker, K. Knobloch and oth.**// Abstracts of the Sixteenth European Conference on Thermophysical Properties, 1-4 September 2002, London, UK. — P. 312-313.
14. Property Libraries for Working Fluids for Calculating Heat Cycles, Boilers, Turbines, Heat Pumps, and Refrigerating Processes/ **H.-J. Kretzschmar, I. Stoeker, M. Kunick, S. Herrmann**// CD ROM of the Seventeenth Symp. on Thermophys. Prop. — Boulder, Colorado, USA. 2009. — File p530.
15. CoolPack, A Collection of Simulation Tools for Refrigeration — Version 1.46/ **M.J. Skovrup, A. Jacobsen, B.D. Rasmussen, S.E. Andersen**// Technical Univ. of Denmark, Dept. of Mechanical Engineering, Lyngby, Denmark, 2000.
16. Development of Program Package for Thermophysical Properties of Fluids: PROPATH — Availabilities of Dynamic Link Library (DLL) in Windows Applications/ **T. Yamaguchi, R. Akasaka, T. Honda and oth.**// CD ROM of the Sixteenth Symp. on Thermophys. Prop. — Boulder, Colorado, USA. 2006. — File p1039.
17. Теплофизические свойства технически важных газов при высоких температурах и давлениях: Справочник/ **В.Н. Зубарев, А.Д. Козлов, В.М. Кузнецов и др.** — М.: Энергоатомиздат, 1989. — 232 с.
18. Термодинамические свойства гелия/ **В.В. Сычев, А.А. Вассерман, А.Д. Козлов, Г.А. Спиридонов, В.А. Цымарный.** — М.: Изд-во стандартов, 1984. — 320 с.
19. **McCarty R.D., Arp V.D.** A New Wide Range Equation of State for Helium// *Adv. Cryog. Eng.* — 1990. — V. 35. — P. 1465-1475.
20. ГСССД 92-86. Гелий-4. Динамическая вязкость и теплопроводность при температурах от 2,2 до 1000 К и давлениях от соответствующих разреженному газу до 100 МПа: Таблицы стандартных справочных данных. — М.: Изд-во стандартов, 1986. — 15 с.
21. Теплофизические свойства неона, аргона, криптона и ксенона/ **В.А. Рабинович, А.А. Вассерман, В.И. Недоступ, Л.С. Векслер;** Под ред. **В.А. Рабиновича.** — М.: Изд-во стандартов, 1976. — 636 с.
22. **Jacobsen R.T., Penoncello S.G., Lemmon E.W.** Thermodynamic Properties of Cryogenic Fluids. — NY: Plenum Press, — 1997. — 320 p.
23. **Tegele Ch., Span R., Wagner W.** A New Equation of State for Argon Covering the Fluid Region for Temperatures from the Melting Line to 700 K at Pressures up to 1000 MPa// *J. Phys. Chem. Ref. Data.* — 1999. — V. 28. — No 3. — P. 779-850.
24. **Stewart R.B., Jacobsen R.T.** Thermodynamic Properties of Argon from the Triple Point to 1200 K with Pressures to 1000 MPa// *J. Phys. Chem. Ref. Data.* — 1989. — V. 18. — No 3. — P. 639-798.
25. ГСССД 95-86. Криптон жидкий и газообразный. Плотность, энтальпия, энтропия, изобарная теплоемкость и скорость звука при температурах 120-1300 К и давлениях 0,1-100 МПа: Таблицы стандартных справочных данных. — М.: Изд-во стандартов, 1986. — 25 с.
26. Термодинамические свойства азота/ **В.В. Сычев, А.А. Вассерман, А.Д. Козлов, Г.А. Спиридонов, В.А. Цымарный.** — М.: Изд-во стандартов, 1977. — 352 с.
27. A Reference Quality Equation of State for Nitrogen/ **R. Span, E.W. Lemmon, R.T. Jacobsen, W. Wagner**// *Int. J. Thermophys.* — 1998. — V. 19. — P. 1121-1132.
28. ГСССД 89-85. Азот. Коэффициенты динамической вязкости и теплопроводности при температурах 65...1000 К и давлениях от состояния разреженного газа до 200 МПа: Таблицы стандартных справочных данных. — М.: Изд-во стандартов, 1986. — 21 с.
29. Термодинамические свойства кислорода/ **В.В. Сычев, А.А. Вассерман, А.Д. Козлов, Г.А. Спиридонов, В.А. Цымарный.** — М.: Изд-во стандартов, 1981. — 304 с.
30. **Schmidt R., Wagner W.** A New Form of Equation of State for Pure Substances and its Application to Oxygen// *Fluid Phase Equilibria.* — 1985. — V. 19. — No 1. — P. 175-200.
31. ГСССД 93-86. Кислород. Коэффициенты динамической вязкости и теплопроводности при температурах 70...500 К и давлениях от соответствующих разреженному газу до 100 МПа: Таблицы стандартных справочных данных. — М.: Изд-во стандартов, 1986. — 16 с.
32. Термодинамические свойства воздуха/ **В.В. Сычев, А.А. Вассерман, А.Д. Козлов, Г.А. Спиридонов, В.А. Цымарный.** — М.: Изд-во стандартов, 1978. — 276 с.
33. Thermodynamic Properties of Air and Mixtures of Nitrogen, Argon and Oxygen from 60 to 2000 K at Pressures to 2000 MPa/ **E.W. Lemmon, R.T. Jacobsen, S.G. Penoncello, D.G. Friend**// *J. Phys. Chem. Ref. Data.* — 2000. — V. 29. — No 3. — P. 331-385.
34. ГСССД 109-87. Воздух сухой. Коэффициенты динамической вязкости и теплопроводности при температурах 150...1000 К и давлениях от соответствующих разреженному газу до 100 МПа: Таблицы стандартных справочных данных. — М.: Изд-во стандартов, 1986. — 15 с.
35. **Алтунин В.В.** Теплофизические свойства двуокиси углерода. — М.: Изд-во стандартов, 1975. — 551 с.
36. **Span R., Wagner W.** A New Equation of State for Carbon Dioxide// *J. Phys. Chem. Ref. Data.* — 1996. — V. 25. — P. 1509-1596.
37. **Tillner-Roth R., Harms-Watzenberg F, Baehr H.D.** Eine neue Fundamentalgleichung fuer Ammoniak// *DKV-Tagsungsbericht.* — 1993. — V. 20. — S. 166-181.
38. Термодинамические свойства метана/ **В.В. Сычев, А.А. Вассерман, В.А. Загорученко, А.Д. Козлов, Г.А. Спиридонов, В.А. Цымарный.** — М.: Изд-во стандартов, 1979. — 348 с.
39. **Setzmann U., Wagner W.** A New Equation of State and Tables of Thermodynamic Properties of Methane Covering the Range from the Melting Line to 625 K at Pressures up to 1000 MPa// *J. Phys. Chem. Ref. Data.* — 1991. — V. 20. — P. 1061-1155.
40. ГСССД 94-86. Метан. Коэффициенты динамической вязкости и теплопроводности при температурах 91-1000 К и давлениях от соответствующих разреженному газу до 100 МПа: Таблицы стандартных справочных данных. — М.: Изд-во стандартов, 1986. — 16 с.
41. Термодинамические свойства этана/ **В.В. Сычев,**

А.А. Вассерман, А.Д. Козлов, Г.А. Спиридонов, В.А. Цымарный. — М.: Изд-во Стандартов, 1982. — 303 с.

42. **Friend D.G., Ingham H., Ely J.F.** Thermophysical Properties of Ethane// J. Phys. Chem. Ref. Data. — 1991. — V. 20. — P. 275-347.

43. Термодинамические свойства этилена/ **В.В. Сычев, А.А. Вассерман, Е.А. Головский, А.Д. Козлов, Г.А. Спиридонов, В.А. Цымарный.** — М.: Изд-во стандартов, 1981. — 280 с.

44. **Jahangiri M., Jacobsen R.T., Stewart R.B.** Thermodynamic Properties of Ethylene from the Freezing Line to 450 K at Pressures to 260 MPa// J. Phys. Chem. Ref. Data. — 1986. — V. 15. — P. 593-645.

45. Термодинамические свойства пропана/ **В.В. Сычев, А.А. Вассерман, А.Д. Козлов, В.А. Цымарный.** — М.: Изд-во стандартов, 1989. — 268 с.

46. Thermodynamic Properties of Butane/ **V.V. Sychev, A.A. Vasserman, A.D. Kozlov, V.A. Tsymarny.** — New York: Begell House inc., 1995. — 271 p.

47. A Fundamental Equation for Trifluoromethane (R23)/ **G. Penoncello, E.W. Lemmon, R.T. Jacobsen, Z. Shan**// J. Phys. Chem. Ref. Data. — 2003. — V. 32. — No 4. — P. 1473-1499.

48. **Vasserman A.A., Fominsky D.V.** Equations of State for Ozone-Safe Refrigerants R-32 and R-125// Int. J. Thermophys. — 2001. — V. 22. — No 4. — P. 1089-1098.

49. Фреоны озонобезпечні R32, R125, R143a. Рівняння стану і таблиці термодинамічних властивостей в інтервалах температури 200-460 К і тиску 0,1-20 МПа (СДД 10-2008). — Київ: Держспоживстандарт України, 2009. — 48 с.

50. **Вассерман А.А., Богданов А.В., Фоминский Д.В.** Единые уравнения состояния в полиномиальной форме для хладагентов R-32 и R-125// Технические газы. — 2002. — № 1. — С. 58-62.

51. Thermodynamic Properties of Pure and Blended Hydrofluorocarbon (HFC) Refrigerants/ **R. Tillner-Roth, A. Yokozeki, H. Sato, K. Watanabe.** — Tokyo: Japan Society of Refrigerating and Air Conditioning Engineers, 1998. — 843 p.

52. **Lemmon E.W., Span R.** Short fundamental equations of state for 20 industrial fluids// J. Chem. Eng. Data. — 2006. — V. 51. — No 4. — P. 785-850.

53. **Вассерман А.А., Мальчевский В.П.** Термодинамические свойства хладагента R143a// Наукові праці ОНАХТ, — 2009. — Вип. 35. — Т.І. — С. 92-97.

54. **Мальчевский В.П.** Уравнение состояния смеси хладагентов R23/R744// Холодильна техніка і технологія. — 2006. — № 6. — С. 66-69.

55. **Вассерман А.А., Мальчевский В.П.** Термодинамические свойства смеси хладагентов R41/R744// Вісник Одеського національного морського університету. — 2007. — Вип. 21. — С. 97-108.

56. **Вассерман А.А., Мальчевский В.П.** Уравнение состояния смеси хладагентов R125/R290// Холодильна техніка і технологія. — 2006. — № 1. — С. 78-82.

57. **Вассерман А.А., Мальчевский В.П.** Уравнение состояния смеси хладагентов R134a/R290// Проблемы техники. — 2006. — № 1. — С. 66-73.

58. **Вассерман А.А., Козловский С.В., Мальченко К.С.** Характеристики смеси этан-пропан как рабочего тела установок охлаждения природного газа// Технические газы. — 2010. — № 4. — С. 58-64.

59. **Вассерман А.А., Козловский С.В., Мальчевский В.П.** Уравнение состояния смеси этан-диоксид углерода// Холодильна техніка і технологія. — 2009. — № 6. — С. 55-59.

60. **Lemmon E.W., Jacobsen R.T.** A Generalized Model for the Thermodynamic Properties of Mixtures// Int. J. Thermophys. — 1999. — V. 20. — No 3. — P. 825-835.



Повышение квалификации по специальности "Криогенная техника и технология",

организуемое Украинской ассоциацией производителей технических газов "УА-СИГМА"
на базе Одесской государственной академии холода



- изучаемые дисциплины: термодинамические процессы, циклы и схемы криогенных воздухоразделительных установок; снижение энергопотребления при эксплуатации ВРУ и новые технологии разделения воздуха; современные приборы контроля и автоматизация криогенных ВРУ; компрессорное оборудование ВРУ; охрана труда при производстве и использовании продуктов разделения воздуха;
- форма обучения — очно-заочная;
- начало обучения — 14,15 марта 2011 г. (установочные занятия);
- период самостоятельного обучения по предоставленным слушателям методическим материалам и учебным пособиям — 16 марта-18 апреля 2011 г.;
- лекционно-лабораторная и экзаменационная сессия — 19-22 апреля 2011 г.;
- контингент — инженеры и техники;
- по окончании выдается свидетельство Министерства образования и науки Украины

Условия приёма по контактному тел./факсу: +380 (48) 777-00-87
и e-mail: uasigma@paco.net.

Наш сайт: www.uasigma.odessa.ua