

УДК 167.2:544.537

А.А. Вассерман

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

e-mail: avas@paco.net

АНАЛИТИЧЕСКОЕ ОПИСАНИЕ ТЕПЛОФИЗИЧЕСКИХ СВОЙСТВ ВОЗДУХА И ЕГО КОМПОНЕНТОВ И СОСТАВЛЕНИЕ ТАБЛИЦ СПРАВОЧНЫХ ДАННЫХ

Данные о теплофизических свойствах воздуха и его компонентов — азота, кислорода и одноатомных газов — необходимы для развития криогенной и космической техники, химической промышленности и ряда других отраслей техники. Накопление экспериментальных данных о свойствах упомянутых веществ позволило составить уравнения, описывающие эти данные, рассчитать таблицы свойств и построить диаграммы состояния. Рассматриваются основные работы, посвящённые составлению таких уравнений, и наиболее известные таблицы теплофизических свойств воздуха и его компонентов, охватывающие широкую область параметров.

Ключевые слова: Воздух. Азот. Кислород. Гелий. Неон. Аргон. Криптон. Ксенон. Теплофизические свойства. Уравнения состояния.

A.A. Vasserman

ANALYTICAL DESCRIPTION OF THERMOPHYSICAL PROPERTIES OF AIR AND ITS COMPONENTS AND DEVELOPMENT OF REFERENCE DATA TABLES

Data on thermophysical properties of air and its components — nitrogen, oxygen and one-atomic gases — are necessary for development of cryogenic and cosmic technique, chemical industry and some other branches of technique. Accumulation of experimental data on properties of mentioned substances has allowed to compile equations describing these data, to calculate tables of properties and to build diagrams of state. The main papers of compiling such equations and the most known tables of thermophysical properties of air and its components covering wide range of parameters are considered.

Keywords: Air. Nitrogen. Oxygen. Helium. Neon. Argon. Krypton. Xenon. Thermophysical properties. Equations of state.

1. ВВЕДЕНИЕ

Промышленным предприятиям, проектно-конструкторским и научно-исследовательским организациям необходимы данные о свойствах веществ и материалов в широких интервалах изменения температуры и давления. Не менее 50 % от общего объёма такой информации составляют данные о теплофизических свойствах (ТФС) газов, жидкостей и их смесей. Поэтому исследования ТФС веществ имеют большое научное и практическое значение.

В важнейших отраслях народного хозяйства широко используются воздух и продукты его разделения, поэтому непрерывно возрастает выпуск криогенных воздухоразделительных установок. Для их проектирования, а также в целом для развития криогенной и космической техники, химической и газовой промышленности, энергетики и ряда других отраслей техники необходимы надёжные данные о ТФС воздуха и его компонентов, включая аргон и другие одноатомные газы. Этим обусловлен интерес, проявляемый учёны-

ми и специалистами к данным о свойствах указанных веществ.

В настоящей статье отражены основные этапы получения данных о термодинамических свойствах, вязкости и теплопроводности воздуха и его компонентов и уравнений, описывающих эти данные. Рассмотрены наиболее известные таблицы ТФС, охватывающие широкую область параметров состояния, причём особое внимание уделено таблицам, используемым в криогенной технике и в химической промышленности. Отмечена видная роль московских и одесских учёных в обеспечении науки и техники достоверными справочными данными о свойствах воздуха и его компонентов.

2. ТАБЛИЦЫ ТЕПЛОФИЗИЧЕСКИХ СВОЙСТВ ВОЗДУХА И ЕГО КОМПОНЕНТОВ

Экспериментальные исследования термодинамических свойств (ТДС) воздуха и его компонентов начаты ещё в конце XIX века, а вязкости и теплопровод-

ности — в начале прошлого века. С тех пор такие исследования проводились в крупнейших лабораториях мира. Анализ опытных данных о свойствах этих веществ выполнен в монографиях [1-7], поэтому в настоящей статье не указаны многочисленные публикации, содержащие такие данные.

Процесс накопления и обобщения данных о свойствах реальных газов, в том числе воздуха и его компонентов, можно условно разделить на три этапа. На первом, охватывающем вторую половину XIX-го века и первую четверть XX-го века, в основном, накапливались экспериментальные термические данные. На втором этапе (примерно 1925-1970 гг.) были получены более надёжные опытные данные о всех ТФС, что позволило составить таблицы свойств и диаграммы состояния для ряда веществ. Третий этап, продолжающийся и сейчас, связан с разработкой более точных уравнений для расчёта ТФС и уточнённых таблиц.

Научные представления о термодинамическом поведении веществ созданы ещё в XIX веке. Важными событиями были опыты *Эндрюса* по сжатию двуокиси углерода (1857-1869 гг.) и сжижение кислорода, осуществлённое одновременно *Кальете* и *Пикте* в 1877 г. Вскоре *Ольшевский* и *Вроблевский* получили данные о давлении насыщенного пара и плотности кипящей жидкости для азота, кислорода и воздуха. Большинство опытных данных, полученных до 1925 г., охватывало узкие интервалы температуры и давления. Однако *Амага* в 1880-1893 гг. измерил сжимаемость воздуха, его компонентов и некоторых других газов до давления 3000 атм. Эти эксперименты получили высокую оценку учёных, и Амага был избран членом Французской академии наук.

Уже на первом этапе исследований свойств выяснилось, что классическое уравнение состояния (УС) реального газа, предложенное *Ван-дер-Ваальсом*, не описывает опытные p, v, T -данные с точностью эксперимента. Многие учёные пытались совершенствовать это уравнение, но большинство попыток не привело к существенным результатам. Особое место среди УС, предложенных в начале XX-го века, занимает уравнение *Камерлинг-Оннеса* [8], представленное в виде двойного разложения коэффициента сжимаемости по степеням плотности и температуры. Такая форма УС опирается на математическое положение о том, что непрерывная функция двух переменных может быть описана полиномом от одной из них, коэффициенты которого — функции второй переменной. Она обоснована позднее теоретически *Дж. Майером* и *Н.Н. Боголюбовым* [9,10] для умеренно сжатого газа и явилась прототипом эмпирических УС воздуха и его компонентов [1-7]. Обзор уравнений состояния выполнен в [1-4,11] и в монографии *М.П. Вукловича* и *И.И. Новикова* [12]. В настоящей статье из многочисленных УС для рассматриваемых в ней веществ

Таблица 1. Влияние точности данных о теплофизических свойствах на результаты расчётов характеристик криогенных процессов

Наименования процессов	Наименования свойств				
	p, v, T -данные	фазовое равновесие	калорич. свойства	критические параметры	свойства переноса
Ректификация	2	1	2	1	2
Сжатие и расширение	1	1	1	1	2
Теплообмен	3	1	1	2	2
Измерение количества	1	2	2	2	3
Хранение	2	1	1	2	3
Техника безопасности	2	1	1	2	3

Примечание: 1 — весьма значительное влияние; 2 — значительное; 3 — менее значительное.

упомянуты только те, которые использовались для расчёта таблиц справочных данных.

До анализа справочных данных, полученных на втором этапе изучения свойств, следует отметить, что разные их категории оказывают различное влияние на точность инженерных расчётов. Влияние точности данных о ТФС на результаты расчётов процессов, протекающих в криогенных установках, иллюстрирует табл. 1, составленная американскими авторами [11]. Из таблицы видно, что данные о термодинамических свойствах, как правило, существенно влияют на точность расчётов, чем данные о свойствах переноса. Наибольшее влияние на характеристики криогенных процессов оказывают данные о фазовом равновесии и калорических свойствах.

В 20-ых гг. XX в. начато составление таблиц ТДС и построение диаграмм состояния наиболее важных для техники газов, в том числе воздуха и его компонентов. Ввиду невысокой точности имевшихся УС первые таблицы и диаграммы чаще всего составлялись графоаналитической обработкой опытных термических и калорических данных на основании известных дифференциальных соотношений термодинамики. Начиная с 1950-ых годов, для расчёта таблиц стали использовать УС. В большинстве случаев таблицы и диаграммы охватывали довольно узкие области параметров.

Перечень наиболее известных таблиц теплофизических свойств воздуха и его компонентов (как реальных газов), предложенных на втором этапе разработки справочных данных, приведён в табл. 2. Там указаны интервалы температур и давлений, охваченные таблицами, и наименования представленных свойств и диаграмм, прилагавшихся ко многим таблицам. Интервалы параметров указаны для однофазной области, но в большинстве таблиц имеются также данные для кривой насыщения от тройной точки до критической. В табл. 2 упомянуты также построенные во Все-союзном НИИ кислородного машиностроения (ВНИИ-КИМАШ) *И.П. Ишкиным* и *М.Г. Каганером* [14], а также *В.И. Епифановой* и соавторами [21] диаграммы состояния для воздуха и его компонентов, однако точность этих диаграмм невысока в связи с недостаточной надёжностью исходных данных.

Сотрудники Московского энергетического института (МЭИ) *Н.В. Цедерберг, В.Н. Попов* и *Н.А. Морозова* опубликовали две монографии, посвящённые теплофизическим свойствам гелия-4 [17,23]. Они использовали для расчёта термодинамических свойств уравнения состояния с двумя вириальными коэффициентами, составленные на основании ограниченной экспериментальной информации. Приведённые в [17,23] таблицы не охватывают важную для криогенной техники область температур ниже 0 °С.

Анализ таблиц и диаграмм для воздуха и его компонентов, предложенных в 1925-1970 гг., выполнен в монографиях [1-3,7].

В табл. 2 не упомянута обстоятельная монография *В. Кеззома* [25], участвовавшего в первых работах по изучению гелия. Она содержит описание многих оригинальных работ, но её нельзя рассматривать как справочник ввиду отсутствия соответствующих таблиц. Последнее замечание можно отнести и к монографии *Б.Н. Есельсона* и соавторов [26], где приведены экспериментальные данные разных исследователей о ТДС гелия-3 и гелия-4 в жидком и твёрдом состояниях.

В рассматриваемой таблице не указаны также монографии зарубежных авторов [27-30], опубликованные в 1959-1969 гг. и обобщающие многочисленные экспериментальные данные, накопленные к тому времени. Эти монографии менее доступны отечественным специалистам, чем изданные в тот же период книги *Н.В. Цедерберга* и соавторов [17,23]. Заметим, что свойства гелия изучаются уже свыше 100 лет. Он является наиболее исследованным веществом, поэтому библиография по его ТФС превысила бы объём данной статьи.

Из таблиц, составленных в этот период в дальнем зарубежье, таблицы *Хильзенрата* и соавторов [13] для четырёх рассматриваемых веществ рассчитаны по уравнению состояния в вириальной форме. Они охватывают весьма широкий интервал температур, но более узкий по сравнению с другими таблицами диапазон давлений. К тому же значения коэффициентов вязкости и теплопроводности и числа Прандтля для этих веществ представлены только при атмосферном давлении. Таблицы *Дина* [15], полученные графоаналитической обработкой опытных данных, ввиду несовершенства этого метода и ограниченности использованных опытных данных при низких температурах неточны, и погрешность значений удельного объёма достигает 2 %. Данным *Баера* и *Швиера* для воздуха [16], рассчитанным с помощью двух уравнений состояния, при температурах ниже –150 °С и выше 200 °С также свойственны погрешности, отмеченные в [1,5] и достигающие 1 % по удельному объёму.

Отчёты Национального бюро стандартов США содержат таблицы термодинамических свойств азота [18], кислорода [19] и аргона [20], рассчитанные по модифицированному уравнению состояния *Бенедикта, Вебба, Рубина*.

В период до 1970 г. получены также экспериментальные данные о вязкости и теплопроводности воздуха и его компонентов в широкой области параметров. Эти данные обобщены в монографиях *И.Ф. Голубева* [31], *Н.В. Цедерберга* [32] и в известном справочнике *Н.Б. Варгафтика* [33].

В середине XX-го века стало очевидным, что наиболее рациональный способ составления таблиц ТДС — их расчёт по уравнению состояния, полученному на основании накопленных p, v, T -данных. В этот пе-

Таблица 2. Наиболее известные таблицы теплофизических свойств и диаграммы состояния воздуха и его компонентов как реальных газов, составленные в 1955-1970 гг.

Год	Авторы и источники	Вещества	Интервалы параметров		Представленные свойства	Диаграммы	
			ΔT , К	Δp , МПа			
1955	Хильзенрат и соавторы [13]	N ₂ , O ₂ , Ar, Air	100...3000	0,001-10	$Z, \rho, h, s, c_p, c_p/c_v, \omega, \eta, \lambda, Pr$	—	
1956	Ишкин и Каганер [14]	N ₂ Air	75...300	0,05...5 0,05...20	—	$T, s; h, s; Z, p;$ Z, T	
1956	Дин [15]	Air Ar	70...450 80...600	0,1...122 0,1...507	v, h, s, c_v, c_p	T, s	
1961	Дин [15]	N ₂	80...700	0,1...1013			
1961	Баер и Швиер [16]	Air	63...1523	0,05...450			$T, s; h, s$
1961	Цедерберг и соавт. [17]	He	273...1273	0,1...20			$Z, v, \rho, h, \eta, \lambda$
1962	Стробридж [18]	N ₂	64...300	0,01...20	ρ, h, u, s	—	
1963	Стюарт и соавторы [19]	O ₂	55...300	0,01...30		—	
1964	Госман и соавторы [20]	Ar	86...700	0,01...101		—	
1964	Епифанова и соавторы [21]	N ₂ , O ₂ , Ar, Air	$T_{тр}...320$	0,02...50	—	T, s	
1966	Вассерман, Казавчинский, Рабинович [1]		$T_{тр}...1300$	0,025...100	$v, h, s, c_p, \eta, \lambda$	$T, s; h, s$	
1968	Вассерман и Рабинович [2]		$T_{тр}...180$	0,1...50	$\rho, v, h, s, c_p, \beta_T, \eta, \lambda$	$\rho, T; h, p; s, p$	
1968	Бестужев [22]	N ₂ , O ₂ , Air	1000...6000	0,01...100	$v, h, s, c_p, k, \omega, \eta, \lambda$	h, s	
1969	Цедерберг и соавт. [23]	He	273...3273	0,02...20	$Z, v, \rho, h, s, \eta, \lambda$		
1970	Таран [24]		2,4...300	0,1...100	v, h, s, c_p	—	

риод, до широкого внедрения ЭВМ в практику научных исследований, эффективно решить такую задачу позволили работы профессора Я.З. Казавчинского и его учеников. Я.З. Казавчинский [34] предложил форму УС реального газа, основанную на изучении конфигурации термодинамической поверхности. Он разработал оригинальный метод составления УС, представленного через так называемые элементарные функции, зависящие от плотности и температуры. Это позволило аппроксимировать опытные p, v, T -данные в широкой области параметров с высокой точностью и, как следствие, обеспечить точность рассчитываемых значений калорических свойств. В 1955-1968 гг. Я.З. Казавчинский и его сотрудники в Одесском институте инженеров морского флота (ОИИМФ) составили УС и таблицы свойств около 30 газов, в том числе воздуха и его компонентов. Надёжности УС способствовало использование при их составлении точных p, v, T -данных для ряда газов при высоких давлениях, полученных Михельсом и сотрудниками в известной лаборатории имени Ван-дер-Ваальса (Амстердам).

Результаты проведённых в ОИИМФ исследований ТФС газообразного воздуха и его компонентов обобщены в монографии А.А. Вассермана, Я.З. Казавчинского и В.А. Рабиновича [1] — одной из первых отечественных монографий, посвящённых свойствам реальных газов. В монографии описан метод составления уравнения состояния и выполнен анализ данных о ТФС азота, кислорода, аргона и воздуха, полученных до 1965 г. Приведены УС этих газов, уравнения для свойств переноса, подробные таблицы свойств и диаграммы T, s и h, s для широкой области параметров, указанной в табл.2.

Продолжением этих работ явилось обобщение данных о ТФС жидкого воздуха и его компонентов в монографии А.А. Вассермана и В.А. Рабиновича [2]. В ней обоснована рациональная форма УС для жидкости и проанализированы данные о свойствах четырёх веществ, накопленные до 1967 г. С помощью составленных УС и уравнений для свойств переноса рассчитаны таблицы, которые содержат помимо величин, приведённых в [1], значения плотности и изотермической сжимаемости. Для каждого вещества построены диаграммы $p, T; h, p$ и s, p .

Таблицы, приведённые в [1,2], в течение многих лет использовались специалистами по криогенной технике и химической технологии. Часть этих таблиц включена во второе издание справочника Н.Б. Варгафтика [35]. Обе монографии в 1970 г. переведены на английский язык и изданы по заказу Национального научного фонда США.

Форму УС, предложенную Я.З. Казавчинским, использовал также В.Н. Таран. Он составил единое уравнение состояния для газообразного и жидкого гелия-4 [24] и рассчитал таблицы термодинамических свойств для области низких температур, не охваченной таблицами Н.В. Цедерберга и соавторов [17,23].

К особой группе относятся не указанные в табл. 2 работы московских учёных, опубликованные в 1957-1962 гг. Они посвящены расчёту ТДС воздуха при

весьма высоких температурах в идеально-газовом приближении, но с учётом диссоциации и ионизации его компонентов. А.С. Предводителев и сотрудники опубликовали таблицы ТДС воздуха, содержащие значения плотности, энтальпии, внутренней энергии, энтропии, теплоёмкостей c_v и c_p , показателя адиабаты и скорости звука для интервалов температур 6000-20000 К и давления 0,001-1000 атм [36,37] и 200-6000 К и 0,00001-100 атм [38].

Л.В. Гурвич и соавторы [39] рассчитали ТДС многих индивидуальных веществ в идеально-газовом состоянии при температурах до 6000 К. В дальнейшем опубликованы дополненные издания этого фундаментального справочника, а его ведущие авторы в 1984 г. удостоены Государственной премии СССР. Справочник переиздан в США в 1989-1994 гг. издательствами Hemisphere и Begell House. Аналогичные работы, например, таблицы [40], появились за рубежом, что было обусловлено потребностями космической техники.

В конце рассматриваемого этапа исследований выполнены расчёты свойств воздуха и его компонентов при высоких температурах и давлениях как реальных газов. А.С. Бестужев [22] определил ТДС и свойства переноса диссоциированных азота, кислорода и воздуха при температурах 1000-6000 К и давлениях 0,01-100 МПа. Он применил методику П.М. Кессельмана [41], основанную на использовании потенциала межмолекулярного взаимодействия Леннарда-Джонса (12-6) с параметрами, зависящими от температуры. Рассчитанные А.С. Бестужевым значения удельного объёма, энтальпии и энтропии азота и кислорода, а также значения скорости звука и показателя адиабаты для воздуха приведены в справочнике Н.Б. Варгафтика [35].

Следует упомянуть также опубликованные в этот период таблицы свойств и диаграммы состояния влажного воздуха для области параметров -30 – $+60$ °С, 500-1000 мм рт. ст. [42], необходимые для расчёта процессов осушения воздуха.

Дальнейшему развитию исследований свойств веществ способствовал разработанный в 1963 г. Международным союзом по теоретической и прикладной химии (IUPAC) проект создания международных таблиц ТДС газов и жидкостей, важных для техники. В связи с этим Научный совет АН СССР по проблеме «Высокотемпературная теплофизика» в 1964 г. организовал комиссию по теплофизическим таблицам газов и жидкостей под председательством В.В. Сычева. В составе комиссии были созданы несколько рабочих групп, среди них группы по свойствам воздуха, азота и кислорода (председатель А.А. Вассерман) и по свойствам инертных газов (председатель В.А. Рабинович).

В 1971 г. составлены международные таблицы ТДС аргона [43] на основе советского и американского проектов после согласования на заседании рабочей группы IUPAC. К сожалению, в дальнейшем Проектный центр IUPAC, находившийся в Лондоне, представлял комиссии АН СССР проекты таблиц, огова-

ривая весьма краткие сроки для согласования. Это обстоятельство практически исключало участие советских учёных в такой работе ввиду сложности их прямого общения с зарубежными коллегами в тот период и отсутствия к тому же электронной почты. Поэтому комиссия сосредоточила основное внимание на создании общесоюзных таблиц ТФС веществ.

Через год после создания упомянутой комиссии Госстандарт СССР организовал Государственную службу стандартных справочных данных (ГСССД). Первоначально ГСССД функционировала как отдел Всесоюзного НИИ физико-технических и радиоизмерений (ВНИИФТРИ), а позже вошла в состав созданного Госстандартом Всесоюзного научно-исследовательского центра по материалам и веществам (ВНИЦ МВ). Создание центра активизировало аттестацию данных и издание многочисленных таблиц стандартных справочных данных (ССД), утверждённых Госстандартом в качестве официальных и обязательных к применению во всех отраслях народного хозяйства.

В 70-ых гг. XX в. наступил третий этап разработки справочных данных о свойствах веществ, для которого характерно широкое использование ЭВМ. Благодаря применению ЭВМ Бендер [44], Стюарт и Джекобсен [45] продолжали модифицировать известное уравнение состояния Бенедикта-Вебба-Рубина, увеличив число коэффициентов (до 33-ёх) и повысив его точность. В работах [44,45] они привели новые УС для азота и кислорода в указанной форме.

Отечественные исследователи [46,47] также стали использовать ЭВМ для составления УС. Развивая это направление, А.А. Вассерман [48] разработал методику составления единого УС для газа и жидкости, надёжно описывающего опытные данные о термических и калорических свойствах и удовлетворяющего фундаментальным условиям равновесия фаз. Г.А. Спиридонов, А.Д. Козлов и В.В. Сычев [49] предложили метод расчёта таблиц ТДС с помощью системы УС, эквивалентных по точности описания опытных данных. Метод позволил оценивать случайные погрешности рассчитываемых значений свойств.

Одновременно развивались экспериментальные исследования ТФС газов и жидкостей. В 1965-1976 гг. рядом авторов опубликованы p, v, T -данные для азота, кислорода и аргона до давлений 2200, 1013 и 1667 МПа соответственно при температурах 87-673 К и для азота до 800 МПа при 473-2073 К. Эти данные, помимо оригинальных работ, приведены в монографии Д.С. Циклиса [50] и обобщены там с помощью УС Тэйта, действующего в области высоких давлений. Была измерена плотность воздуха в интервалах 288-873 и 78-199 К до давлений 72 и 59 МПа. Появились новые данные об изохорной теплоёмкости азота и аргона и о скорости звука в этих веществах. Определены также вязкость и теплопроводность воздуха и его компонентов в газообразном и жидком состояниях в широкой области параметров (до 1200 К и 440 МПа).

Существенное расширение области параметров,

изученной экспериментально, и создание эффективных расчётных методов позволили комиссии АН СССР, Советскому национальному комитету по сбору и оценке численных данных в области науки и техники Президиума АН СССР и Государственной службе ССД выдвинуть задачу уточнения таблиц ТДС наиболее важных газов. Эту работу выполнил коллектив московских и одесских учёных, подготовивший серию монографий ГСССД. Они содержат описание новых методов составления УС и расчёта свойств и новые таблицы ТДС одноатомных газов [3,7], азота [4], кислорода [6], воздуха [5], а также метана, этана, этилена и пропана при температурах от кривой насыщения до 1500 К и до давления 100 МПа. Таблицы [4-7] и таблицы свойств четырёх углеводородных газов рассчитаны по УС, коэффициенты которых для каждого из веществ получены усреднением коэффициентов уравнений, описывающих опытные данные практически с одинаковой точностью. Число таких равнозначных уравнений лежит в пределах от 53 (для воздуха) до 172 (для гелия), что позволило достаточно строго оценить погрешности табулированных значений ТДС.

Перечень основных таблиц теплофизических свойств воздуха и его компонентов, составленных на третьем этапе разработки уравнений состояния и справочных данных, приведен в табл. 3. Как и ранее, интервалы параметров указаны для данных в однофазной области. Таблицы, охватывающие докритические температуры, содержат также данные для кривой насыщения, а таблицы [3-7,11] — дополнительно данные для кривой затвердевания.

В таблицах [3] приведены значения удельного объёма, энтальпии, энтропии и изобарной теплоёмкости, а в остальных [1,2,4-7], помимо этих свойств, значения коэффициента сжимаемости, теплоёмкости c_p , скорости звука, адиабатного дроссель-эффекта, показателя адиабаты, летучести, коэффициента объёмного расширения и термического коэффициента давления. В [3] имеются также значения коэффициентов динамической вязкости и теплопроводности и данные о свойствах четырёх одноатомных веществ в кристаллическом состоянии. Для аргона в [3] приведены значения ТДС из международных таблиц [43]. Упомянутая серия монографий ГСССД в 1987 г. была переведена на английский язык и выпущена в свет издательством Hemisphere (Нью Йорк).

Авторы монографий ГСССД сопоставили рассчитанные значения свойств с опытными данными и оценили возможные погрешности этих значений. На основе монографий [4-7] разработаны таблицы ССД [67-70] о плотности, энтальпии, энтропии и изобарной теплоёмкости азота, воздуха, кислорода и гелия в жидком и газообразном состояниях при давлениях 0,1-100 МПа и температурах 70-1500 К (для кислорода — до 1000 К, для гелия от 2,2 до 450 К). Средние квадратические случайные погрешности значений свойств, представленных в таблицах, в основном лежат в пределах 0,02-0,25 % для плотности и энтропии, 0,2-1,6 кДж/кг для энтальпии и 0,1-3 % для изобарной теплоёмкости, возрастая при повышении дав-

ления и уменьшении температуры.

Позднее А.Д. Козлов и соавторы составили новые уравнения для расчёта динамической вязкости и теплопроводности воздуха и его основных компонентов, описывающие большинство опытных данных со средними квадратическими отклонениями 0,5-3 %; они составили также новое единое УС для аргона. По этим уравнениям рассчитаны таблицы ССД для широкой области параметров [54,55,58,63]. Данные о теплопроводности многих газов и жидкостей, в том числе воздуха и его компонентов, в интервале от температуры нормального кипения до 1000-1500 К (для азота до 2500 К) при давлениях до 100-200 МПа представлены в монографиях Н.Б. Варгафтика и соавторов [71-73]. Таблицы ССД о вязкости и тепло-

проводности одноатомных газов при атмосферном давлении и температурах до 2500 и 5000 К соответственно приведены в [74,75].

Монографии [1-7,33,35,72] и таблицы ССД [54,55,67-70,74] явились составной частью комплексной системы оперативного обеспечения народного хозяйства нормативно-справочными данными о теплофизических свойствах технически важных газов и жидкостей. За разработку системы ряд ведущих теплофизиков, включая многих авторов этих монографий и таблиц, в 1987 г. был удостоен Премии Совета Министров СССР. В 1996 г. группа видных российских учёных удостоена Государственной Премии Российской Федерации за исследования теплофизических свойств веществ, важных для энергетики; часть этих

Таблица 3. Основные таблицы теплофизических свойств, составленные в 1971-2000 гг.

Год	Авторы и источники	Вещество	Интервалы параметров		Представленные свойства
			$\Delta T, K$	$\Delta p, MPa$	
1971	Ангус и соавторы [43]	Ar	84...1100	0,1...100	v, h, s, c_p
1973	МакКарти [51]	He	2,2...1500	0,01...100	$\rho, \partial\rho/\partial p, \partial\rho/\partial T, u, h, s, c_v, c_p, \omega$
1976	Рабинович, Вассерман, Недоступ, Векслер[3]	Ne	26...1300	0,1...100	$v, h, s, c_p, \eta, \lambda$
		Ar	85...1300		
		Kr	120...1300		
		Xe	165...1300		
1977	Ангус и соавторы [52]	He	2,5...1400	0,1...70	$\rho, u, h, s, c_v, c_p, \omega$
1977	Сычев, Вассерман, Козлов, Спиридонов, Цымарный [4]	N ₂	65...1500	0,1...100	$\rho, Z, h, s, c_v, c_p, \omega, \alpha_h, k, f, \partial v/\partial T, \partial\rho/\partial T$
1979	Ангус и соавторы [53]	N ₂	63...1100	0,02..100	$v, Z, h, u, s, \omega, c_v, c_p, c_p/c_v, f, \alpha_h$
1981	Сычев и соавторы [6]	O ₂	55...1500	0,1...100	$\rho, Z, h, s, c_v, c_p, \omega, \alpha_h, k, f, \partial v/\partial T, \partial\rho/\partial T$
1984	Сычев и соавторы [7]	He	2,2...1500	0,01...100	
1986	Козлов и соавторы [54]	N ₂	65...1000	0,1...200	η, λ
1986	Козлов и соавторы [55]	O ₂	70...500	0,1...100	
1986	Алтунин и соавторы [56]	Kr	120...1300	0,1...100	ρ, h, s, c_p, ω
1987	Вагнер и де Реук [57]	O ₂	54...300	0,02...80	$v, Z, h, u, s, \omega, c_v, c_p, c_p/c_v, f, \alpha_h$
1988	Козлов и соавторы [58]	Air	150...1000	0,1...100	η, λ
1989	Зубарев и соавторы [59]	N ₂ , O ₂ , Ar, Air	500...2500	0,1...300	$\rho, Z, h, s, c_v, c_p, \omega, \alpha_h, k, f, \eta, \lambda, Pr$
1990	Недоступ, Галькевич, Каминский [60]	N ₂ , O ₂ , Ar, He	1000...20000	100...40000	ρ, h, s, F, c_v, c_p
1991	Стюарт и соавторы [61]	O ₂	54...300	0,02...80	$\rho, u, h, s, c_v, c_p, \omega$
1995	Рабинович, Бекетов [62]	N ₂ , O ₂ , Ar, Air	200...400	0,1...10	$\phi, \mu, v, h, s, c_p, p_n, d$
1997	Козлов и соавторы [63]	Ar	85...1300	0,1...1000	$\rho, h, s, c_v, c_p, \omega, \eta, \lambda$
1997	Джекобсен, Пенонселло, Леммон [11]	N ₂	63...2000	0,1...1000	$\rho, u, h, s, c_v, c_p, \omega$ и диаграммы p, h и T, s
		O ₂	54...300	0,1...50	
		Air	60...850	0,1...50	
		He	2,2...1500	0,1...100	
		Ne	25...650	0,1...500	
		Ar	84...1200	0,1...1000	
		Kr	116...800	0,1...200	
Xe	161...800	0,1...200			
1999	Тегелер и соавторы [64]	Ar	84...700	0,1...1000	$\rho, u, h, s, c_v, c_p, \omega$
2000	Шпан и соавторы [65]	N ₂	63...1000	0,1...1000	
2000	Леммон и соавторы [66]	Air	60...2000	0,1...2000	

исследований отражена в монографиях [3-7].

Одновременно с авторами таблиц [54,55] *В.В. Алтунин, В.А. Рабинович* и *М.А. Сахабетдинов* [56] опубликовали таблицы ССД о термодинамических свойствах жидкого и газообразного криптона. Эти таблицы, в отличие от ранее опубликованных [3], рассчитаны не по двум локальным УС, а по единому УС для газа и жидкости с 47-ью коэффициентами, составленному в [76].

В.Н. Зубарев и соавторы [59] разработали метод составления теоретически обоснованного УС и уравнений для свойств переноса, опираясь, как ранее *А.С. Бестужев*, на потенциал Леннарда-Джонса (12-6), но полагая его параметры постоянными. Эти параметры они определяли с помощью ЭВМ по данным о коэффициенте сжимаемости, вязкости и теплопроводности. В монографии [59] приведены таблицы свойств 12 газов, в том числе воздуха и его компонентов, при высоких температурах и давлениях. Таблицы содержат примерно тот же набор ТДС, что и таблицы [4-7], и значения динамической вязкости, теплопроводности и числа Прандтля.

В.И. Недоступ, Е.П. Галькевич и *Е.С. Каминский* [60] с помощью разработанного ими метода идеальных кривых составили УС для группы технически важных газов, включающей азот, кислород и аргон. Эти УС содержат небольшое число коэффициентов, найденных по опытным данным для высоких давлений, и благодаря рациональной форме позволяют проводить широкую экстраполяцию в область параметров, не исследованную экспериментально. По уравнениям рассчитаны значения ТДС, включая энергию Гельмгольца F , при экстремальных значениях параметров (1000-20000 К и 100-40000 МПа). Данные [60] полезны для решения геофизических и астрофизических проблем и изучения ударно-волновых процессов.

Следует упомянуть также монографию *В.А. Рабиновича* и *В.Г. Бекетова* [62], посвящённую ТДС влажных газов при повышенных давлениях с учётом реальности свойств компонентов и смеси. В монографии имеются данные о свойствах влажного аргона, азота, кислорода и воздуха, на основе которых подготовлены таблицы рекомендуемых справочных данных, утверждённые ВНИЦ МВ. Недавно *А.А. Александров* и *К.А. Орлов* [77] разработали программу для расчёта ТДС влажного воздуха в более широком интервале температур (200-2000 К) до давления 100 МПа при семи сочетаниях параметров. Они рассматривали сухой воздух и водяной пар как реальные газы, а влажный воздух — как идеальную смесь.

После издания монографий [4-7] и таблиц ССД [67-70] в дальнем зарубежье появились новые экспериментальные данные для рассматриваемых нами веществ, в частности, были измерены плотность, изохорная теплоёмкость, вязкость воздуха и скорость звука в нём, а также теплопроводность азота, аргона и воздуха. Были составлены новые уравнения состояния и таблицы ТДС воздуха и его компонентов. Эти УС, названные фундаментальными, представляют

свободную энергию Гельмгольца как функцию плотности и температуры. Достоинства такой формы УС — возможность расчёта всех термодинамических свойств путём дифференцирования свободной энергии, более высокая точность описания свойств в критической области и удобство включения УС в программы для расчёта химических процессов.

Активно работали в указанном направлении *Стюарт* и *Джекобсен* в университете штата Айдахо (США) и *Вагнер* в Рурском университете (Германия). Результаты их исследований использованы при подготовке международных таблиц ТДС азота и кислорода [53,57]. Но, несмотря на указанные публикации, зарубежные учёные продолжили составление уточнённых УС и таблиц. Поэтому ниже рассмотрены только новейшие таблицы свойств воздуха и его компонентов, упомянутые в табл. 3.

В монографии *Джекобсена, Пенонселло* и *Леммона* [11] приведены таблицы ТДС 15 криогенных веществ, включающие значения плотности, внутренней энергии энтальпии, энтропии, теплоёмкостей c_v и c_p и скорости звука. Свойства азота, аргона и воздуха рассчитаны по УС, опубликованным *Джекобсеном, Стюартом* и соавторами в 1986-1992 гг., свойства кислорода — по уравнению *Шмидта* и *Вагнера* [78], а четырёх одноатомных газов — по более старым УС других авторов (1968-1976 гг.). В монографии [11] даны коэффициенты всех УС, представленных в фундаментальной форме. Для каждого вещества построены диаграммы h,p и T,s , причём максимальное значение температуры для диаграмм T,s в большинстве случаев равно 300 К (для гелия и неона 10 К и 80 К соответственно).

Уравнение [78] использовали также *Стюарт, Джекобсен* и *Вагнер* [61], рассчитавшие таблицы ТДС кислорода для интервала температуры 54...300 К до давления 80 МПа. Позднее *Тегелер, Шпан* и *Вагнер* [64] предложили УС, с помощью которого рассчитали свойства аргона от кривой плавления до 700 К и 1000 МПа. Вскоре *Шпан* и соавторы [65] рассчитали таблицы свойств азота [65] для интервала температуры от тройной точки до 1000 К и до давления 1000 МПа по составленному ими УС, действующему до 2200 МПа [79]. Одновременно *Леммон* и соавторы [66] опубликовали таблицы ТДС воздуха для интервала температуры 60-2000 К до давления 2000 МПа. В таблицах [61,64-66] представлены те же свойства, что и в монографии [11]. Высокая точность новых уравнений и таблиц подтверждена подробным сопоставлением с опытными данными. Погрешности большинства рассчитанных значений свойств лежат в пределах 0,02-0,1 % для плотности и 0,1-2 % для теплоёмкостей c_v и c_p .

В табл. 3 не упомянута подготовленная по инициативе IUPAC коллективом авторов монография [80], посвящённая свойствам переноса газов и жидкостей. В ней приведены, в частности, уравнения для расчёта динамической вязкости и теплопроводности аргона и азота, основанные на экспериментальных данных, полученных до 1995 г. Уравнения для теплопроводности

описывают резкий рост этого свойства в критической области точнее, чем составленные ранее.

Также не указана в таблице обстоятельная публикация *Доннели и Баренги* [81], посвящённая ТФС жидкого гелия-4 при давлении насыщения и подводная итог тридцатилетним исследованиям авторов. В этой работе обобщены результаты экспериментов и составлены таблицы рекомендуемых данных о давлении насыщенного пара, плотности, энтальпии, энтропии, теплоёмкости вдоль линии насыщения, теплоте парообразования, скорости звука, динамической и кинематической вязкости, теплопроводности и ряде других свойств. Таблицы во многих случаях охватывают интервал 0,1-5 К, но данные о скорости звука и коэффициентах переноса представлены в более узком интервале температуры.

В последнее время сократилось число публикаций по ТФС воздуха и его компонентов. Это объясняется тем, что имеющиеся данные в основном обеспечивают потребности науки и техники. К тому же многие учёные, занимавшиеся свойствами этих веществ, переключились на исследования новых перспективных хладагентов и их смесей, о чем свидетельствуют публикации в научных журналах и материалы международных конференций.

Большинство публикаций последних лет, относящихся к ТФС воздуха и его компонентов, касается коэффициентов переноса. Новые экспериментальные данные о теплопроводности азота, вязкости и теплопроводности аргона и вязкости криптона и ксенона даже в совокупности охватывают сравнительно узкий интервал температуры 200...423 К до давления 20 МПа. Однако составленные недавно Леммоном и Джекобсеном [82] уравнения для расчёта вязкости и теплопроводности воздуха и трёх его основных компонентов в газообразном и жидком состояниях справедливы в весьма широкой области параметров, изученной экспериментально многими исследователями. В частности, уравнения для теплопроводности азота и аргона описывают опытные данные в интервалах температуры 68...974 К и 87...978 К соответственно до давления 1000 МПа. Помимо упомянутых уравнений для специалистов может быть полезен приведённый в [82] список использованных работ, насчитывающий 292 наименования.

На состоявшемся в июне 2009 г. в Булдере (США) 17-ом симпозиуме по теплофизическим свойствам были представлены три доклада, посвящённые измерению вязкости ксенона в критической области и плотности и вязкости азота, причём плотность азота определена в интервале 265...450 К до давления 200 МПа. Интересно, что вязкость ксенона измерялась на борту космического корабля Шаттл для исключения влияния гравитационного поля Земли на результаты эксперимента. Из работ расчётного плана следует отметить сообщение *Леммона и Арпа* [83] о новом уравнении состояния для газообразного и жидкого гелия-4, действующем вплоть до λ -кривой. *Кретчмар* и соавторы [84] доложили о методике расчёта ТДС влажного воздуха как реальной газовой смеси в об-

ласти давлений от 0,01 кПа до 10 МПа и температур 143...623 К в широком интервале изменения влагосодержания. Указанные максимальные значения параметров существенно меньше, чем в работе [77], но достоинством методики является учёт реальности смеси.

Накопление экспериментальных и расчётных данных позволило создать в последние четыре десятилетия банки данных и автоматизированные информационные системы, обеспечивающие пользователей сведениями о свойствах веществ и материалов. Обзор многочисленных банков и систем, содержащих данные о ТФС воздуха и его компонентов, приведён в работе [85].

3. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Благодаря плодотворной деятельности многих учёных, занимавшихся экспериментальными и расчётно-теоретическими исследованиями ТФС воздуха и его компонентов, свойства этих важных для техники веществ изучены и описаны аналитически в широкой области температур и давлений. Новые УС и уравнения для расчёта вязкости и теплопроводности описывают достоверные опытные данные с точностью, соответствующей точности эксперимента. Составленные с помощью этих уравнений таблицы справочных данных о ТФС обеспечивают надёжность результатов научных и инженерных расчётов.

ЛИТЕРАТУРА

1. **Вассерман А.А., Казавчинский Я.З., Рабинович В.А.** Теплофизические свойства воздуха и его компонентов. — М.: Наука, 1966. — 375 с.
2. **Вассерман А.А., Рабинович В.А.** Теплофизические свойства жидкого воздуха и его компонентов. — М.: Изд-во стандартов, 1968. — 239 с.
3. 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.
4. 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.
5. 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.
6. 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.
7. 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.
8. **Camerlingh Onnes H.** Expression of the equation of state of gases and liquids by means of series// Comm. Leiden. — 1901. — No 71. — P. 1-25.
9. **Mayer J.E.** The statistical mechanics of condensed systems// J. Chem. Phys. — 1937. — V. 5. — No 1. — P. 67-74.

10. **Боголюбов Н.Н.** Проблемы динамической теории в статистической физике. — М.: Гостехиздат, 1946. — 118 с.
11. **Jacobsen R.T., Penoncello S.G., Lemmon E.W.** Thermodynamic Properties of Cryogenic Fluids. — Kluwer Academic Publ., 1997. — 312 p.
12. **Букалович М.П., Новиков И.И.** Уравнение состояния реальных газов. — М.-Л.: Госэнергоиздат, 1948. — 340 с.
13. Tables of Thermal Properties of Gases/ **J. Hilsenrath, C.W. Beckett, W.C. Benedict and oth.** NBS Circ. 564, 1955. — 473 p.
14. **Ишкин И.П., Каганер М.Г.** Исследование термодинамических свойств воздуха и азота при низких температурах под давлением// Журн. технической физики. — 1956. — Т. 26. — № 10. — С. 2329-2347.
15. **Din F.** Thermodynamic Functions of Gases. — London: Butterworths. V. 2, 1956. — 201 p.; V. 3, 1961. — 161 p.
16. **Baehr H.D., Schwier K.** Die thermodynamischen Eigenschaften der Luft im Temperaturbereich zwischen -210°C und $+1250^{\circ}\text{C}$ bis zu Drucken von 4500 bar. — Berlin/Gottingen/Heidelberg: Springer-Verlag, 1961. — 136 S.
17. **Цедерберг Н.В., Попов В.Н., Морозова Н.А.** Теплофизические свойства гелия. — М.-Л.: Госэнергоиздат, 1961. — 120 с.
18. **Strobridge T.R.** The Thermodynamic Properties of Nitrogen from 64 to 300 °K between 0,1 and 200 Atmospheres// Nat. Bur. Standards Tech. Note 129. — 1962. — 108 p.
19. **Stewart R.B., Hust J.G., McCarty R.D.** Interim Thermodynamic Properties for Gaseous and Liquid Oxygen at Temperatures from 55 to 300 K and Pressures to 300 Atm.// NBS Report 7922. — 1963. — 99 p.
20. **Gosman A.L., Hust J.G., McCarty R.D.** Interim Thermodynamic Properties of Liquid and Gaseous Argon from 86 to 300 K with Pressures to 1000 Atmospheres// NBS Report 8293. — 1964. — 119 p.
21. Разделение воздуха методом глубокого охлаждения. Т.1./ **В.И. Епифанова, Л.С. Аксельрод, А.И. Мороз и др.** — М.: Машиностроение, 1964. — 479 с.
22. **Бестужев А.С.** Термодинамические и транспортные свойства воздуха и его компонентов при высоких температурах. Автореф. дисс. ... канд. техн. наук. — Одесса: ОТИ им. М.В. Ломоносова, 1968. — 32 с.
23. **Цедерберг Н.В., Попов В.Н., Морозова Н.А.** Термодинамические и теплофизические свойства гелия. — М.: Атомиздат, 1969. — 276 с.
24. **Таран В.Н.** Исследование термодинамических свойств гелия как низкотемпературного хладагента. Автореф. дисс. ... канд. техн. наук. — Одесса: ОТИХП, 1970. — 28 с.
25. **Кеезом В.** Гелий. — М.: ИИЛ, 1949. — 542 с.
26. Свойства жидкого и твердого гелия/ **Б.Н. Есельсон, В.Н. Григорьев, В.Н. Иванцов, Э.Я. Фудавский и др.** — М.: Изд-во стандартов, 1978. — 127 с.
27. **Atkins K.R.** Liquid Helium. — Cambridge: Cambr. University Press, 1959. — 312 p.
28. Argon, Helium and Rare Gases. V. 1. Ed. **Cook.** — NY: Intersci. Publ., 1961. — 394 p.
29. **Wilks J.** The Properties of Liquid and Solid Helium. — Oxford: Clarendon Press, 1967. — 703 p.
30. **Kellner W.E.** Helium-3 and Helium-4. — NY: Plenum Press, 1969. — 431 p.
31. **Голубев И.Ф.** Вязкость газов и газовых смесей. — М.: Физматгиз, 1959. — 375 с.
32. **Цедерберг Н.В.** Теплопроводность газов и жидкостей. — М.: Госэнергоиздат, 1963. — 408 с.
33. **Варгафтик Н.Б.** Справочник по теплофизическим свойствам газов и жидкостей. — М.: Физматгиз, 1963. — 708 с.
34. **Казавчинский Я.З.** Об одном методе определения постоянных вириальной формы уравнения состояния реального газа// Докл. АН СССР. — 1954. — Т. 95. — С. 1005-1008.
35. **Варгафтик Н.Б.** Справочник по теплофизическим свойствам газов и жидкостей. Изд. второе. — М.: Наука, 1972. — 720 с.
36. Таблицы термодинамических функций воздуха (для температур от 6000 до 12000 °K и давлений от 0,001 до 1000 атм)/ **А.С. Предводителев, Е.В. Ступоченко, Е.В. Самуйлов и др.** — М.: Изд-во АН СССР, 1957. — 302 с.
37. Таблицы термодинамических функций воздуха (для температур от 12000 до 20000 °K и давлений от 0,001 до 1000 атм)/ **А.С. Предводителев, Е.В. Ступоченко, А.С. Плешанов и др.** — М.: Изд-во АН СССР, 1959. — 230 с.
38. Таблицы термодинамических функций воздуха (для температур от 200 до 6000 °K и давлений от 0,00001 до 100 атм)/ **А.С. Предводителев, Е.В. Ступоченко, Е.В. Самуйлов и др.** — М.: Изд-во АН СССР, 1962. — 268 с.
39. Термодинамические свойства индивидуальных веществ/ **Л.В. Гурвич, Г.Ф. Хачкурузов, В.А. Медведев и др.;** Под ред. **В.П. Глушко**, т.1, т.2. — М.: Изд-во АН СССР, 1962. — 1162 с., 916 с.
40. Thermodynamische Funktionen idealer Gase fuer Temperaturen bis 6000 K/ **H.D. Baehr, H. Hartmann, H.C. Pohl, H. Schomacker.** — Berlin: Springer-Verlag, 1968. — 415 S.
41. **Кессельман П.М.** К вопросу расчета теплофизических свойств реальных газов при высоких температурах// Теплофизика высоких температур. — 1964. — Т.2. — № 6. — С. 879-883.
42. **Щербань А.Н., Кремнев О.А., Титова Н.М.** Свойства влажного воздуха при давлениях 500÷1000 мм рт. ст. (Таблицы и диаграммы). — М.: Госгортехиздат, 1960. — 184 с.
43. International Thermodynamic Tables of the Fluid State. Argon, 1971/ Edited by **S. Angus, B. Armstrong** from tables, prepared by **A.L. Gosman, R.D. McCarty, J.G. Hust, A.A. Vasserman, V.A. Rabinovich.** — London: Butterworths, 1972. — 102 p.
44. **Bender E.** Equations of state exactly representing the phase behavior of pure substances// Proc. Fifth Sympos. on Thermophys. Prop./ Amer. Soc. Mech. Eng. — NY, 1970. — P. 227-235.
45. **Stewart R.B., Jacobsen R.T.** The determination of equation of state for nitrogen and oxygen// Cryogenics. — 1973. — V. 13. — No 9. — P. 526-534.
46. **Букалович М.П., Алтунин В.В., Спиридонов Г.А.** Об одном методе построения уравнений состояния сжатых газов по экспериментальным термодинамическим данным с

применением ЭЦВМ// Теплофизика высоких температур. — 1967. — Т. 5. — № 3. — С. 528-531.

47. **Вассерман А.А., Крейзерова А.Я., Сердюк Л.С.** Об одном способе составления уравнения состояния на электронной цифровой вычислительной машине// Журн. физической химии. — 1969. — Т. 43. — № 2. — С. 465-467.

48. **Вассерман А.А.** О составлении единого уравнения состояния для газа и жидкости с помощью ЭВМ// Сб. ГСССД «Теплофизические свойства веществ и материалов». — М.: Изд-во стандартов, 1976. — Вып. 10. — С. 7-34.

49. **Спиридонов Г.А., Козлов А.Д., Сычев В.В.** Определение термодинамических функций газов по данным p, v, T -измерений методом математического эксперимента на ЭВМ// Сб. ГСССД «Теплофизические свойства веществ и материалов». — М.: Изд-во стандартов, 1976. — Вып. 10. — С. 35-53.

50. **Циклис Д.С.** Плотные газы. — М.: Химия, 1977. — 165 с.

51. **McCarty R.D.** Thermodynamic Properties of Helium-4 from 2 to 1500 K at Pressures to 10^8 Pa// J. Phys. Chem. Ref. Data. — 1973. — V. 2. — No 4. — P. 923-1041.

52. **Angus S., de Reuck K.M., McCarty R.D.** Helium. International Thermodynamic Tables of the Fluid State. — Vol. 4. — Oxford: Pergamon Press, 1977. — 265 p.

53. International Thermodynamic Tables of the Fluid State. Volume 6: Nitrogen/ **S. Angus, K.M. de Reuck, R.T. Armstrong, R.T. Jacobsen, R.B. Stewart.** — Oxford: Pergamon Press, 1979. — 136 p.

54. 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.

55. 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.

56. ГСССД 95-86. Криптон жидкий и газообразный. Плотность, энтальпия, энтропия, изобарная теплоёмкость и скорость звука при температурах 120-1300 К и давлениях 0,1-100 МПа: Таблицы стандартных справочных данных. — М.: Изд-во стандартов, 1986. — 26 с.

57. **Wagner W., de Reuck K.M.** Oxygen. International Thermodynamic Tables of the Fluid State-9; based on surveys and equations by **W. Wagner, R. Schmidt, J. Ewers, R.B. Stewart, R.T. Jacobsen.** — Oxford: Blackwell Scient. Publ., 1987. — 114 p.

58. 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, 1988. — 15 с.

59. 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.

60. **Недоступ В.И., Галькевич Е.П., Каминский Е.С.** Термодинамические свойства газов при высоких температурах и давлениях. — Киев: Наукова думка, 1990. — 196 с.

61. **Stewart R.B., Jacobsen R.T., Wagner W.** Thermodynamic Properties of Oxygen from the Triple Point to 300 K with Pressures to 80 MPa// J. Phys. Chem. Ref. Data. — 1991. — V. 20. — No 5. — P. 917-948.

62. **Rabinovich V.A., Beketov V.G.** Moist Gases: Thermodynamic Properties. — NY: Begell House Inc, 1995. — 294 p.

63. ГСССД 179-96. Аргон жидкий и газообразный. Термодинамические свойства, динамическая вязкость и теплопроводность при температурах 85...1300 К и давлениях 0,1...1000 МПа: Таблицы стандартных справочных данных. — М.: Депонированы во ВНИИ МВ 5.01.97. № 771-кк97.

64. **Tegeler 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.

65. A Reference Equation of State for the Thermodynamic Properties of Nitrogen for Temperatures from 63,151 to 1000 K and Pressures to 2200 MPa/ **R. Span, E.W. Lemmon, R.T. Jacobsen, W. Wagner, A. Jokozeki**// J. Phys. Chem. Ref. Data. — 2000. — V. 29. — No 6. — P. 1361-1433.

66. 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.

67. ГСССД 4-78. Плотность, энтальпия, энтропия и изобарная теплоёмкость жидкого и газообразного азота при температурах 70-1500 К и давлениях 0,1-100 МПа: Таблицы стандартных справочных данных. — М.: Изд-во стандартов, 1978. — 12 с.

68. ГСССД 8-79. Плотность, энтальпия, энтропия и изобарная теплоёмкость жидкого и газообразного воздуха при температурах 70-1500 К и давлениях 0,1-100 МПа: Таблицы стандартных справочных данных. — М.: Изд-во стандартов, 1980. — 11 с.

69. ГСССД 19-81. Кислород жидкий и газообразный. Плотность, энтальпия, энтропия и изобарная теплоёмкость при температурах 70-1500 К и давлениях 0,1-100 МПа: Таблицы стандартных справочных данных. — М.: Изд-во стандартов, 1982. — 11 с.

70. ГСССД 70-84. Гелий жидкий и газообразный. Плотность, энтальпия, энтропия и изобарная теплоёмкость при температурах 2,5-450 К и давлениях 0,05-100 МПа: Таблицы стандартных справочных данных. — М.: Изд-во стандартов, 1985. — 27 с.

71. Теплопроводность газов и жидкостей: Справочные данные/ **Н.Б. Варгафтик, Л.П. Филиппов, А.А. Тарзиманов, Р.П. Юрчак.** — М.: Изд-во стандартов, 1970. — 155 с.

72. Теплопроводность жидкостей и газов: Справочные данные/ **Н.Б. Варгафтик, Л.П. Филиппов, А.А. Тарзиманов, Е.Е. Тоцкий.** — М.: Изд-во стандартов, 1978. — 472 с.

73. Справочник по теплопроводности газов и жидкостей/ **Н.Б. Варгафтик, Л.П. Филиппов, А.А. Тарзиманов, Е.Е. Тоцкий.** — М.: Энергоатомиздат, 1990. — 352 с.

74. ГСССД 17-81. Динамическая вязкость и теплопроводность гелия, неона, аргона, криптона и ксенона при атмосферном давлении в интервале температур от нормальных точек кипения до 2500 К: Таблицы стандартных спра-

вочных данных. — М.: Изд-во стандартов, 1982. — 28 с.

75. ГСССД 138-89. Гелий, неон, аргон, криптон, ксенон. Динамическая вязкость и теплопроводность при атмосферном давлении (0,101325 МПа) в диапазоне температур от нормальных точек кипения до 5000 К: Таблицы стандартных справочных данных. — М.: Изд-во стандартов, 1992. — 23 с.

76. Сахабетдинов М.А., Алтунин В.В. Результаты статистической обработки экспериментальных данных о теплофизических свойствах жидкого и газообразного криптона// Сб. ГСССД «Теплофизические свойства веществ и материалов». — М.: Изд-во стандартов, 1980. — Вып. 14. — С. 32-51.

77. Александров А.А., Орлов К.А. Расчет свойств влажного воздуха при повышенных давлениях с учетом реальности свойств компонентов// Материалы XI Российской конф. по теплофиз. свойствам веществ, т. II. — С.-П.: Изд-во СПГУНПТ, 2005. — С. 82.

78. 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.

79. A Reference Quality Equation of State for Nitrogen// R. Span, E.W. Lemmon, R.T. Jacobsen, W. Wagner// Int. J. Thermophys. — 1998. — V. 19. — No 4. — P. 1121-1130.

80. 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.

81. Donnelly R.J., Barenghi C.F. The Observed Properties of Liquid Helium at Saturated Vapor Pressure// J. Phys. Chem. Ref. Data. — 1998. — V. 27. — No 6. — P. 1217-1274.

82. Lemmon E.W., Jacobsen R.T. Viscosity and Thermal Conductivity Equations for Nitrogen, Oxygen, Argon, and Air// Int. J. Thermophys. — 2004. — V. 25. — No 1. — P. 21-69.

83. Lemmon E.W., Arp V. An Equation of State for the Calculation of the Thermodynamic Properties of Helium-4// CD ROM of the Seventeenth Symp. on Thermophys. Prop. — Boulder, Colorado, USA. — 2009. — File 598.

84. Kretzschmar H.-J., Herrmann S., Gatley D.P. Thermodynamic Properties of Real Moist Air// CD ROM of the Seventeenth Symp. on Thermophys. Prop. — Boulder, Colorado, USA. — 2009. — File 529.

85. Вассерман А.А., Мальчевский В.П. Банки данных и автоматизированные информационные системы по теплофизическим свойствам газов и жидкостей// Технические газы. — 2009. — № 5. — С. 59-66.

АВТО ГАЗО ЗАПРАВочный КОМПЛЕКС

+ Альтернативное топливо



ISSN 2073-8323

**МЕЖДУНАРОДНЫЙ
НАУЧНО-ТЕХНИЧЕСКИЙ
ЖУРНАЛ**

Информационное издание
газотворной отрасли

Издаётся с января 2002 г.

Зарегистрирован в Министерстве РФ по делам печати в 2002 г
Свидетельство о регистрации ПИ № 77-15873
Подписной индекс Роспечати 84180
Периодичность издания – 6 выпусков в год, объём каждого выпуска – 92 стр.
Международный стандартный серийный номер (ISSN) 2073-8323





Журнал предназначен для руководителей и специалистов НИИ, вузов, заводов, автопредприятий, газовых хозяйств, компаний и фирм, занимающихся переводом транспортных средств на альтернативные виды топлива, для научных работников, аспирантов и студентов высших учебных заведений, а также для всех, кого интересуют вопросы перехода на газотворное топливо. Журнал состоит из двух разделов.

Раздел «Наука»: материалы научных разработок в газотворной отрасли, исследования, диссертации, конструирование.

Раздел «Информация»: новости газотворной отрасли в России и за рубежом, законодательство, нормативная документация, проектирование и строительство, оборудование – всё о жизни и развитии газотворной отрасли.

Журнал доставляется в администрации регионов (комитеты ТЭК), в Государственную Думу и Совет Федерации РФ. По подписке поступает читателям России, стран СНГ и зарубежных стран, открыты представительства на Украине (г. Киев, Севастополь) и в Аргентине (г. Буэнос-Айрес).

Подписка осуществляется через Роспечать и в редакции журнала по адресу:
127254, Москва, ул. Яблочкова, д.10А
Тел./фак. (495) 639-80-81, 639-81-34;
Email: info@agzk-at.ru, www.agzk-at.ru



