

Авторефер.

К 18

ОДЕССКИЙ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЙ ИНСТИТУТ
им. М. В. ЛОМОНОСОВА

В. Р. КАМЕНЕЦКИЙ

**КОЭФФИЦИЕНТ ВЯЗКОСТИ СЖАТЫХ
ГАЗОВ**
(методы расчета и обобщенные
данные)

(274 — теоретические основы теплотехники)

Автореферат
диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Перечень 1987

Одесса — 1969

ОДЕССКИЙ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЙ ИНСТИТУТ
им. М. В. ЛОМОНОСОВА

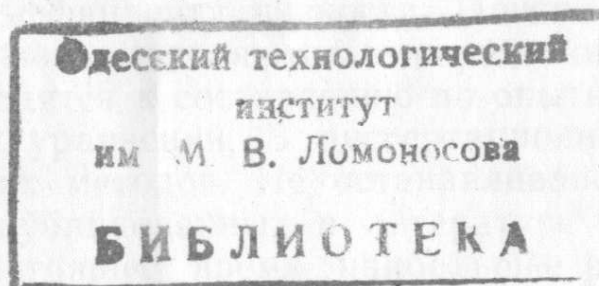
В. Р. КАМЕНЕЦКИЙ

КОЭФФИЦИЕНТ ВЯЗКОСТИ СЖАТЫХ
ГАЗОВ
(методы расчета и обобщенные
данные)

(274 — теоретические основы теплотехники)

Автореферат
диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

✓ 001706



Одесса — 1969

Работа выполнена на кафедре инженерной теплофизики Одесского технологического института им. М. В. Ломоносова.

Научный руководитель — доктор технических наук, профессор **П. М. Кессельман**.

Официальные оппоненты:

доктор технических наук, профессор **Н. Б. Варгафтик**,
кандидат технических наук, доцент **В. В. Алтунин**.

Ведущая организация — Государственный проектный и научно-исследовательский институт азотной промышленности.

Автореферат разослан 15 апреле 1969 г.

Защита диссертации состоится 23 мая 1969 г.
на заседании Ученого совета Одесского технологического института им. М. В. Ломоносова.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке института.

Просим Ваши отзывы в двух экземплярах прислать по адресу: г. Одесса-39, ул. Свердлова, 112, Технологический институт им. М. В. Ломоносова.

Ученый секретарь Совета института **Л. А. Запорожец**.

Бурное развитие энергетики, холодильного дела, химической технологии, а также ряда специальных отраслей техники требует знания теплофизических свойств большого количества веществ, используемых в качестве рабочих тел и теплоносителей.

Коэффициент вязкости является одной из важнейших теплофизических характеристик веществ, необходимой при решении широкого круга задач, связанных с расчетами гидравлических сопротивлений и теплообмена.

Экспериментальное исследование вязкости газов и жидкостей весьма трудоемко, а в некоторых случаях и вовсе невозможно. К тому же, охватываемый в опытах диапазон температур и давлений ограничен конструктивными особенностями той или иной экспериментальной установки. Так большинство экспериментальных данных по вязкости газов и жидкостей получено при максимальных температурах 250—280°C и давлениях 600—800 атм [1].

В силу этих причин экспериментальное исследование вряд ли может обеспечить получение необходимой информации о вязкости огромного количества веществ (порядка десятков тысяч), используемых в настоящее время в различных отраслях промышленности.

К сожалению, в связи с незавершенностью общей кинетической теории, определение коэффициента вязкости теоретическим путем может быть достаточно надежным лишь для газов малой плотности. Для газов высокой плотности и жидкостей нет строгих и теоретически обоснованных методов расчета коэффициента вязкости. Почти все существующие расчетные методы являются эмпирическими и полуэмпирическими и сводятся к составлению по опытным данным интерполяционных уравнений. В диссертационной работе приведен обзор этих методов. Не останавливаясь подробно на анализе всех опубликованных в литературе уравнений, отметим, что в настоящее время наибольшее распространение получили уравнения Н. Б. Варгафтика $\Delta\eta = f(\rho)$ и И. Ф. Голубева $\Delta\eta = f\left(\frac{\partial p}{\partial T}\right)_v$.

Указанные уравнения обладают достаточной точностью, удобны для использования и неоднократно применялись многими авторами для расчета коэффициента вязкости различных веществ.

Отметим, что каждое из них характеризуется своими границами применимости, что затрудняет их использование в широкой области параметров состояния, включающей газовую и жидкую фазы, а также линию насыщения.

Например, зависимость типа $\Delta\eta = f(\rho)$ в общем случае справедлива для области температур, превышающих критическую. В этом смысле указанные уравнения не являются едиными.

Значительную трудность представляет расчетное определение коэффициента вязкости неизученных веществ, т. к. существующие обобщенные методы являются приближенными и применимы не ко всем веществам.

В связи с этим нами преследуется цель создания методов, позволяющих обобщать имеющийся экспериментальный материал и рассчитывать коэффициент вязкости неизученных веществ в достаточно широкой области параметров.

Эти методы должны удовлетворять следующим требованиям:

1. Универсальность (применимость ко всем веществам).
2. Достаточная для практики точность.
3. Простота и доступность.

В свете изложенного в диссертации разработаны методы расчета коэффициента вязкости сжатого газа применительно к любым веществам для случаев:

1. По исследуемому веществу имеются экспериментальные данные по вязкости.
2. Экспериментальные данные по вязкости отсутствуют, но имеются сведения о термических свойствах.
3. Отсутствуют сведения как о вязкости, так и о термических свойствах исследуемого вещества.

Естественно, искомые методы должны быть аналитическими. Поэтому особое значение приобретает разработка формы уравнения для расчета η , способного адекватно описать газовую и жидкую фазы, включая линию насыщения.

В настоящей работе автором предпринята попытка получить такое уравнение и использовать его для решения поставленной задачи.

Диссертация состоит из введения, пяти глав и приложения, представляющего собой таблицы приведенного коэффициента вязкости для различных групп веществ в зависимости от приведенных температуры и давления и критического числа.

Рациональное уравнение для расчета вязкости сжатых газов

В настоящей работе преследуется цель получения единого уравнения, способного надежно описать зависимость коэффициента вязкости вещества как в газовой, так и жидкой фазах. Естественно, качества искомого уравнения в первую очередь определяются его структурой.

При решении вопроса о форме уравнения для расчета вязкости сжатого газа следует исходить из того, что искомое уравнение должно быть двухпараметрическим, т. е. оно должно представлять коэффициент вязкости сжатого газа функцией двух переменных — температуры и плотности.

Такой выбор независимых переменных диктуется простотой изохорно-изотермических сечений поверхности η по сравнению с изобарно-изотермическими.

Очевидно, что в общем случае вязкость сжатого газа можно представить в виде

$$\eta = \eta_0 \cdot \varepsilon, \quad (1)$$

где η — вязкость сжатого газа, η_0 — вязкость разреженного газа, а ε учитывает влияние давления на коэффициент вязкости.

Функцию ε можно представить в виде разложения по степеням плотности ρ , коэффициентами которого являются некоторые функции от температуры.

Иными словами, уравнение (1) может быть записано в «вириальной» форме:

$$\eta = \eta_0 [1 + B_\eta(T)\rho + C_\eta(T)\rho^2 \dots]. \quad (2)$$

Действительно, если исходить из того, что существующая связь между вязкостью реального газа и термическим уравнением состояния

$$\frac{pV}{RT} = z = 1 + B(T)\rho + C(T)\rho^2 + \dots \quad (3)$$

описывается некоторой рациональной функцией φ , т. е.

$$\eta/\eta_0 = \varphi(z), \quad (4)$$

то, сочетая уравнения (3) и (4), нетрудно прийти к вириальной форме уравнения (2). По аналогии с уравнением состояния реального газа коэффициенты $B_\eta(T)$, $C_\eta(T)$ и т. д. будем условно называть вириальными коэффициентами вязкости.

Теория еще не дает возможности рассчитывать вириальные коэффициенты вязкости, хотя некоторые попытки в этом

направлении предпринимаются [2]. Однако математически ясно, что коэффициенты B_η , C_η и т. д. являются рациональными функциями от вириальных коэффициентов B , C , ..., т. е.

$$B_\eta = R_1(B, C, \dots) \quad (5)$$

$$C_\eta = R_2(B, C, \dots).$$

.....

Это следует из (4).

В соответствии с теорией вириальные коэффициенты $B(T)$, $C(T)$ и т. д. могут быть представлены в виде рядов

$$B(T) = \sum_{i=0}^{\infty} \frac{b_i}{T^i} \quad (6)$$

$$C(T) = \sum_{i=0}^{\infty} \frac{c_i}{T^i}$$

.....

Следовательно, на основании (5), коэффициенты $B_\eta(T)$, $C_\eta(T)$... также можно представить в виде рядов, т. е.:

$$B_\mu = a_1 + \frac{b_1}{T} + \frac{c_1}{T^2} + \dots \quad (7)$$

$$C_\eta = a_2 + \frac{b_2}{T} + \frac{c_2}{T^2} + \dots$$

.....

Нами было использовано уравнение (2) для выделения обычными графическими методами второго и третьего вириальных коэффициентов вязкости из опытных данных по CO_2 , CH_4 , NH_3 , O_2 , CO , Ar , C_3H_8 .

Оказалось, что, действительно, температурная зависимость вириальных коэффициентов вязкости хорошо описывается уравнениями типа (7), в которых для достижения необходимой точности следует ограничиться конечным числом членов в правой части.

К сожалению, графически невозможно выделить все вириальные коэффициенты уравнения (2). В связи с этим представляется целесообразным перейти к другой, более рациональной форме уравнения для вязкости сжатых газов путем сочетания уравнений (2) и (7):

$$\eta/\eta_0 = 1 + \left(a_1 + \frac{b_1}{T} + \frac{c_1}{T^2} + \dots \right) \rho + \left(a_2 + \frac{b_2}{T} + \frac{c_2}{T^2} + \dots \right) \rho^2 + \dots \quad (8)$$

Собирая члены при одинаковых степенях $\frac{1}{T}$, получим:

$$\eta/\eta_0 = A_0(\rho) + A_1(\rho) \frac{1}{T} + A_2(\rho) \frac{1}{T^2} + \dots, \quad (9)$$

где A_1 , A_2 , и т. д. — полиномы по плотности, начинающиеся с первой степени ρ , а A_0 — с нулевой степени ($A_0 = 1 + a_1\rho + a_2\rho^2 + \dots$).

Если перейти к безразмерным координатам $\omega = \rho/\rho_k$ и $\tau = T/T_k$ (ρ_k и T_k — критическая плотность и температура), то уравнение (9) примет вид:

$$\eta/\eta_0 = P_0(\omega) + P_1(\omega) \frac{1}{\tau} + P_2(\omega) \frac{1}{\tau^2} + \dots \quad (10)$$

Таким образом, мы пришли к уравнению (10) для расчета коэффициента вязкости сжатых газов, для практического использования которого необходимо знать только функции $P_0(\omega)$, $P_1(\omega)$, $P_2(\omega)$ и т. д., являющиеся полиномами по степеням приведенной плотности ω . Для определения этих функций необходимо располагать экспериментальными данными по коэффициенту вязкости на нескольких изотермах, выбираемых в качестве базисных. Количество базисных изотерм определяется числом членов в правой части уравнения (10), которое следует выбирать, исходя из принципа наилучшего удовлетворения опытным данным в широком интервале температур.

Аппроксимируя базисные изотермы полиномами вида

$$\eta/\eta_0 = 1 + m_1\omega + m_2\omega^2 + \dots + m_n\omega^n,$$

и сочетая полученные полиномы с уравнениями этих же изотерм, представленными в форме (10), получим замкнутую систему уравнений для определения искомых функций

$$P_0(\omega) = 1 + \sum_{i=1}^n a_i \omega^i, \quad P_1(\omega) = \sum_{i=1}^n b_i \omega^i, \quad P_2(\omega) = \sum_{i=1}^n c_i \omega^i \text{ и т. д.}$$

Практика показала, что для описания коэффициента вязкости сжатого газа в широкой области температур вполне достаточно располагать экспериментальными данными на 3-х—4-х базисных изотермах.

Весьма желательно в состав базисных включить докритические изотермы. Последнее позволяет единым уравнением типа (10) охватить область параметров состояния, включающую газ, жидкость и линию насыщения [3]. Отметим, кстати, что уравнение (10) допускает обоснованную экстраполяцию расчетных значений η в область температур, превосходящих верхнюю температурную границу исходного

экспериментального материала. Это объясняется тем, что с ростом температуры при фиксированном максимальном давлении значения η_0 растут, а значения η/η_0 уменьшаются, стремясь в пределе к 1.

Уравнение (10) обеспечивает точность расчетных значений η в газовой и жидкой фазах, соизмеримую с точностью эксперимента. Последнее особенно важно при расчете коэффициента вязкости в околокритическом районе, где точность исходных экспериментальных данных невелика, а расчетное определение η другими методами весьма затруднено и чревато существенными ошибками. Отметим также, что подобная методика применима и к составлению уравнений для расчета коэффициента теплопроводности сжатых газов, что показано в [4].

На основании разработанной методики в диссертации составлены уравнения в форме (10) для таких технически важных газов как аргон, водород, азот, двуокись углерода, вода, аммиак, метиловый спирт, метан, этан, пропан, бутан, пентан, гексан, гептан, октан [5].

В качестве примера в таблице 1 приводятся коэффициенты уравнений для расчета вязкости двуокиси углерода, воды и октана. Сходимость опытных [12] и расчетных значений коэффициента вязкости октана на линии насыщения иллюстрируется рисунком 1.

При составлении уравнения для расчета η H_2O преследовалась цель возможно более точного описания данных Международной скелетной таблицы [6], включая и область аномальной зависимости коэффициента вязкости от давления.

Некоторым увеличением количества коэффициентов удалось получить уравнение, отвечающее этим требованиям.

В таблице 2 выборочно приводятся сопоставления расчетных значений η H_2O с данными Международной скелетной таблицы [6] при температурах 100, 200, 250, 450 и 600°C.

Результаты сопоставления свидетельствуют о том, что отклонения расчетных значений, как правило, значительно ниже величины допуска данных [6]. При этом воспроизводится аномальный ход зависимости η H_2O от давления при температурах до 300°C. Исключение составляют только значения η на изотерме 350°C, где максимальное значение отклонений достигает — 7% при давлении 200 бар.

Следует отметить, что хорошее согласие расчетных значений коэффициента вязкости H_2O с данными [6] как при более высоких, так и при более низких температурах, чем 350°C, наводит на мысль о необходимости уточнения данных скелетной таблицы на указанной изотерме.

Особый интерес представляет расчет коэффициента вязкости в околокритическом районе. Как известно, точность

Таблица 1

Коэффициенты уравнений для расчета вязкости CO_2 , H_2O и C_8H_{18}

Вещ- ство	i	a_i	b_i	c_i	d_i	e_i	f_i	g_i	h_i	Принято	
										$T_K, ^\circ\text{K}$	$\rho_{ж}, \frac{\text{г}}{\text{см}^3}$
CO_2	1	2,70447	- 8,62879	9,80378	- 3,36220						
	2	- 3,30487	8,64751	- 5,93377	1,21773						
	3	7,24725	-20,5413	19,0124	- 5,96351						
	4	- 2,63775	7,92972	- 7,58145	2,50485						304,19 0,4682
H_2O	1	-76,65443	286,6157	-332,9420	71,36639	61,38250	46,53245	-78,81710	22,57653		
	2	173,5944	-658,3166	773,3677	-155,6540	-150,1998	-130,3616	207,2337	58,88880		
	3	-89,61850	344,3672	-407,0044	77,46297	84,94742	72,49295	-116,0604	33,18516		
	4	15,39256	-58,80057	69,18507	-13,13629	-14,38700	-12,15363	19,53517	-5,594641		647,15 0,3067
C_8H_{18}	1	0,23129	0,32942	0,42710	-0,11282						
	2	0,024762	0,030217	0,045770	-0,012049						
	3	0,32909	0,45592	0,60980	-0,16123						
	4	-0,25692	-0,35775	-0,47580	0,12579						
	5	0,08151	0,11536	0,15051	-0,03979						569,35 0,2330

опытных данных в этой области параметров крайне невелика.

Так, в работе Михельса, Ботцена и Шурмана [7] обнаружено экстремальное возрастание вязкости CO_2 в окологритической области.

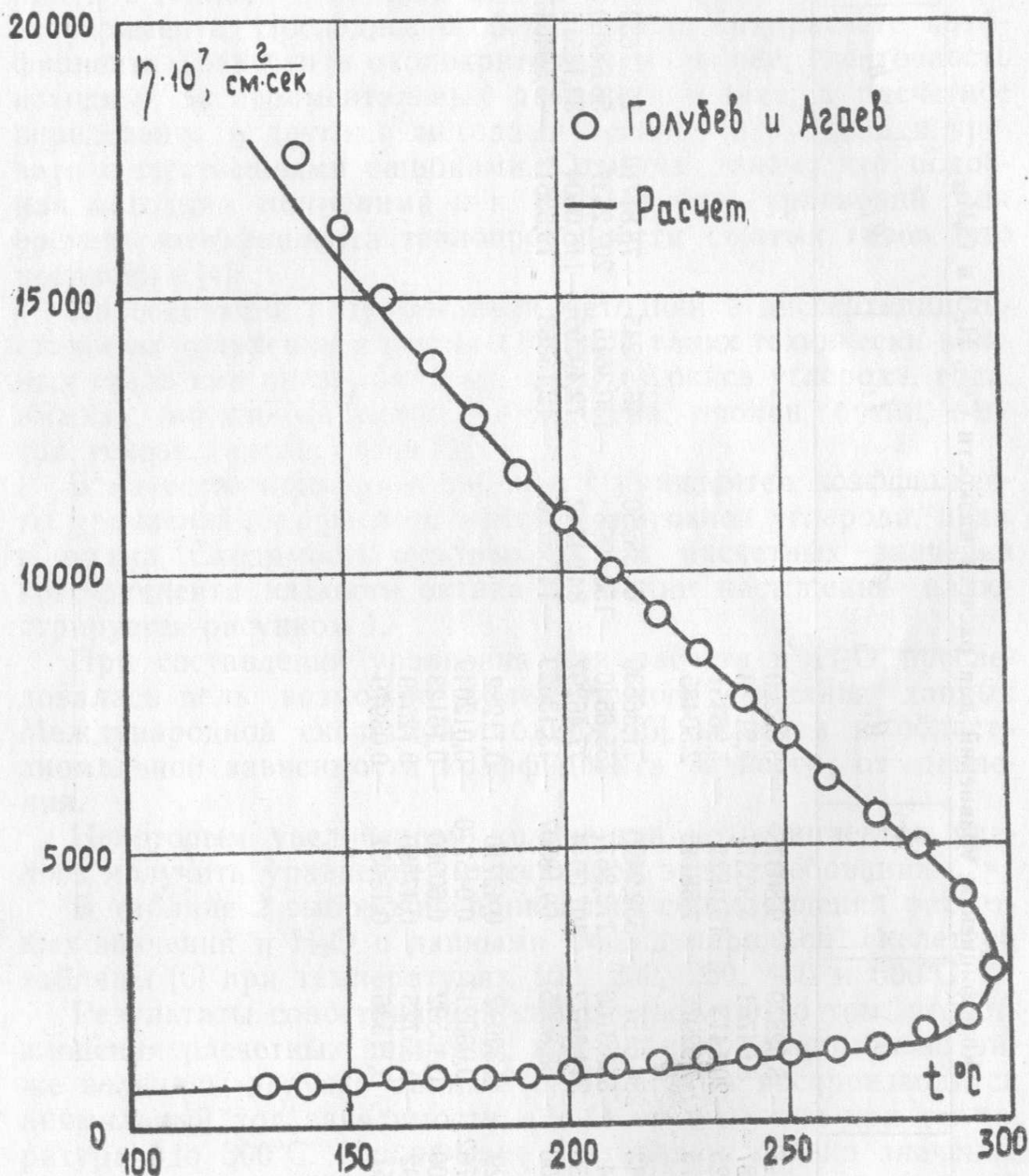


Рис. 1. Вязкость октана на линии насыщения.

Более раннее исследование, проведенное Налдретом и Маасом [8], свидетельствует только о незначительном увеличении вязкости при $\rho = \rho_{\text{кр}}$ и $T = T_{\text{кр}}$. Аналогичный результат получен в работе Кестина, Уайтлоу и Цинь [9].

Подобное расхождение данных разных авторов чрезвычайно затрудняет их обработку при составлении подробных таблиц коэффициента вязкости.

Сопоставление расчетных значений η H_2O (10^{-6} г/см·сек)
(верхняя строка)
с данными Международной скелетной таблицы [6] (нижняя строка)

P , бар.	100° С	200° С	250° С	450° С	600° С
1	121.2 121.2±1.2	161.8 161.8±1.6	182.2 182,2±1.8	264 264±8	325 325±13
5	2788 2790±70	160.8 160.2±1.6	181.8 181.4±1.8	264 264±11	326 325±13
10	2789 2790±70	158.8 158.5±1.6	181.4 180.6±1.8	265 265±11	326 326±13
25	2792 2800±70	1354 1340±30	179.6 177.8±1.8	266 266±11	329 327±13
50	2797 2800±70	1361 1350±30	1042 1070±30	269 269±11	332 329±13
100	2805 2810±70	1375 1360±30	1056 1080±30	275 276±11	340 334±13
150	2816 2820±70	1388 1370±30	1071 1100±30	283 285±11	348 340±14
200	2825 2830±70	1402 1380±40	1086 1100±30	293 296±12	356 346±14
400	2862 2870±120	1455 1430±60	1138 1160±30	414 411±16	392 379±15
600	2896 2910±120	1506 1480±60	1185 1210±50	595 600±24	437 428±17
800	2929 2950±120	1553 1520±60	1228 1260±50	678 695±28	494 491±20

В то же время, располагая экспериментальными значениями коэффициента вязкости в области температур и давлений, достаточно удаленных от критической точки (где они, как правило, вполне надежны), можно составить уравнение типа (10) и по нему рассчитать вязкость в любой другой области параметров, включая околоскелетный район и линию насыщения. При этом отпадает необходимость в использовании ненадежных, а зачастую и противоречивых данных в околоскелетном районе.

На рис. 2 представлено сопоставление расчетных значений коэффициента вязкости CO_2 в околоскелетном районе с опытными данными Налдрета и Мааса [8] и Кестина, Уайтлоу и Цинь [9]. Из рисунка видно, что сходимость опытных и расчетных значений η CO_2 вполне удовлетворительная для данной области параметров. Некоторое возрастание коэффициента вязкости в координатах η , ρ , T , наблюдаемое по результатам работ [8, 9] при приближении к критической точ-

ке, нельзя считать обоснованным экспериментально. Это показано М. П. Вукаловичем и В. В. Алтуниным [10] и, по-видимому, объясняется непригодностью существующих экспериментальных методов для работы в околоскритическом районе.

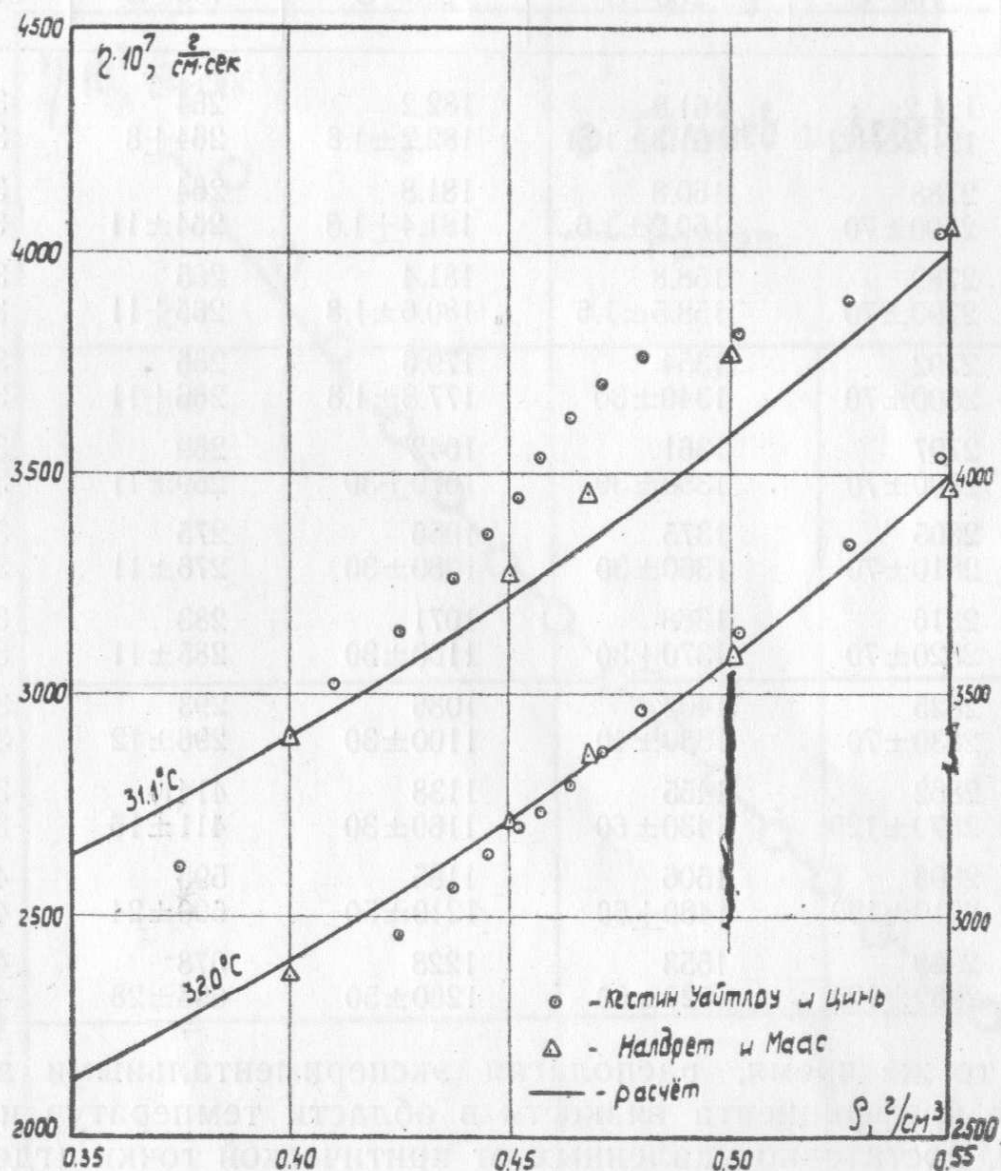


Рис. 2. Вязкость CO_2 в околоскритическом районе.

Кстати, последние исследования, посвященные определению вязкости азота и аргона в критической точке [11], также не выявили никаких особенностей в поведении коэффициента вязкости при приближении к критическим плотности и температуре.

Аналитическое представление поверхности η/η_0 , ω , τ с помощью уравнений типа (10) позволяет с достаточной достоверностью описать район параметров, непосредственно примыкающий к критической точке. В таблице 3 представлено сопоставление расчетных и экспериментальных значений критической вязкости исследованных в настоящей работе веществ.

Коэффициент вязкости в критической точке некоторых веществ
(10^7 г/см·сек)

Вещество	$\eta_{кр}^{расч}$	$\eta_{кр}^{оп}$	Источник данных
Аргон	2879	2852	[13]
Водород	307,6	294	[1]
Азот	1815	1810	[1]
Двуокись углерода	3365	3220	[1]
Вода	3896	—	—
Аммиак	2610	2560	[1]
Метиловый спирт	2897	2840	[1]
Метан	1585	1580	[12]
Этан	2137	2130	[12]
Пропан	2466	2390	[12]
Бутан	2548	2540	[12]
Пентан	2660	2650	[12]
Гексан	2732	2720	[12]
Гептан	2719	2710	[12]
Октан	2654	2645	[12]

Хорошая сходимость опытных и расчетных значений коэффициента вязкости в критической точке является дополнительным критерием надежности составленных уравнений.

Проведенные сопоставления показывают, что полученное нами уравнение в форме (10) способно адекватно описать вязкость в газовой, жидкой фазах и на линии насыщения, включая критическую область параметров. Поэтому указанное уравнение можно рассматривать как единое, что выгодно отличает его от существующих, пригодных для использования в какой-либо определенной области параметров (жидкости или газа).

Коэффициент вязкости сжатого газа и его связь с термическими свойствами

Полученное уравнение (10) позволяет рассчитывать коэффициент вязкости сжатых газов в широкой области параметров состояния. Однако для его составления требуются опытные данные по коэффициенту вязкости. Для неизученных веществ этот метод, естественно, применен быть не может. Однако в ряде случаев мы располагаем опытными PvT — данными вещества при отсутствии экспериментальных данных по вязкости.

В связи с этим целесообразно отыскать метод, позволяю-

щий на основании имеющихся данных по термическим свойствам определять коэффициент вязкости сжатого газа.

Зависимость между коэффициентом вязкости и термическими свойствами удобно искать в виде:

$$\eta/\eta_0 = f(\rho, T), \quad (11)$$

где плотность газа ρ при данных температуре и давлении известна из уравнения состояния $\rho = \rho(p, T)$, либо из таблиц термодинамических свойств исследуемого вещества.

Раскрыть правую часть уравнения (11) представляется возможным, если привлечь методы термодинамического подобия.

Из принципов термодинамического подобия следует, что если вещества являются подобными по термическим свойствам, то они должны быть подобны и по коэффициентам вязкости.

Таким образом, если в некоторой системе безразмерных параметров ρ^* и T^* для всех веществ имеет место подобие по сжимаемости $z = \frac{p v}{RT}$, то при тех же ρ^* и T^* для всех веществ должны быть равны значения приведенного коэффициента вязкости η/η_0 .

В этом случае по опытным значениям η/η_0 для некоторого ограниченного количества веществ можно было бы получить обобщенную диаграмму $\eta/\eta_0 = \varphi(\rho^*, T^*)$, справедливую для всех газов, аналитическое описание которой приводило бы к искомой цели.

Так как за термические и переносные свойства ответственен единый механизм межмолекулярного взаимодействия, то при решении подобной задачи представляется разумным использовать тот или иной потенциал взаимодействия, способный комплексно описать как равновесные, так и неравновесные свойства вещества.

Произведенный в работе анализ модельных потенциалов показал, что наиболее отвечающей поставленным условиям является эффективная потенциальная функция (12—6) с переменными параметрами [14]. Указанная функция имеет вид:

$$u(r) = 4\varepsilon(T) \left[\left(\frac{\sigma(T)}{r} \right)^{12} - \left(\frac{\sigma(T)}{r} \right)^6 \right], \quad (12)$$

где потенциальные параметры условно зависят от температуры.

Согласно этой функции любое сложное вещество может рассматриваться как некоторый «псевдосферический» газ, у которого при каждой температуре взаимодействие является центрально-симметричным и описывается классическим по-

тенциалом Леннард-Джонса (12—6). Такой подход обеспечивает возможность применения потенциальной функции (12) к любому веществу, независимо от сложности его молекулярного строения.

Не останавливаясь подробно на различных достоинствах введенной потенциальной функции, отметим, что с ее помощью единым набором потенциальных параметров $\sigma(T)$ и $\epsilon(T)$ удастся комплексно описать второй и третий вириальные коэффициенты, а также вязкость разреженного газа $\eta_0(T)$. Вириальные коэффициенты и коэффициент вязкости разреженного газа в случае потенциала (12—6) могут быть представлены в виде:

$$B(T) = b_0 \cdot B^*(T^*), \quad (13)$$

$$C(T) = b_2^0 \cdot C^*(T^*),$$

.....

$$\eta_0 \cdot 10^7 = 266.93 \sqrt{TM} / \sigma^2 \Omega^{(2.2)}(T^*). \quad (14)$$

Здесь B^* , C^* , и т. д. — приведенные второй, третий и т. д. вириальные коэффициенты; $\Omega^{(2.2)}$ — приведенный интеграл столкновений; b_0 — второй вириальный коэффициент, соответствующий модели твердых сфер

$$b_0 = \frac{2}{3} \pi N \sigma^3,$$

T^* — приведенная температура, определяемая соотношением $T^* = \frac{\kappa T}{\epsilon}$.

В работах [14, 15] разработан метод определения $\sigma(T)$ и $\epsilon(T)$ из экспериментальных данных по сжимаемости и показано, что полученные параметры могут служить основой для удовлетворительного описания коэффициента вязкости $\eta_0(T)$ любого вещества, независимо от его молекулярной структуры.

Покажем теперь, что с помощью потенциальной функции (12) можно найти такую систему безразмерных координат ρ^* и T^* , в которой все вещества будут термодинамически подобны. Действительно, записав уравнение состояния в виде (3) и используя зависимость (13), получим:

$$z = 1 + \frac{b_0}{v} B^*(T^*) + \frac{b_2^0}{v^2} C^*(T^*) + \dots \quad (15)$$

Если в качестве опорной точки принять точку с характеристическими значениями объема и температуры, соответственно равными b_0 и ϵ/κ , то уравнение (15) приобретает вид:

$$z = 1 + B^*(T^*) \cdot \rho^* + C^*(T^*) \cdot \rho^{*2} + \dots, \quad (16)$$

где безразмерные величины ρ^* и T^* определяются через координаты опорной точки соотношениями:

$$\rho^* = \frac{b_0}{v}, \quad T^* = \frac{\kappa T}{\varepsilon}. \quad (17)$$

Так как $B^*(T^*)$, $C^*(T^*)$ и т. д. являются универсальными функциями для всех веществ (теоретические приведенные вириальные коэффициенты для потенциала (6—12), то уравнение (15) в системе координат η/η_0 , ρ^* , T^* является общим для всех веществ, что и доказывает высказанное утверждение.

Таким образом, в указанной системе безразмерных координат все вещества являются термодинамически подобными. Поэтому в системе координат η/η_0 , ρ^* , T^* они также должны быть подобны, т. е. для всех газов должно иметь место общее уравнение

$$\eta/\eta_0 = \varphi(\rho^*, T^*). \quad (18)$$

Отличительной особенностью установленного факта является то, что в указанной системе координат параметры приведения (параметры опорной точки) не являются постоянными, а меняются от изотермы к изотерме.

Обработка в этих координатах экспериментальных данных по вязкости различных веществ (Ar, Kr, Xe, He, H₂, O₂, CO, N₂, CO₂, CH₄, C₂H₄, D₂, C₂H₆, C₃H₈, NH₃, H₂O), принадлежащих к различным молекулярным моделям (от «сферических» до сложных полярных молекул), подтвердила, что они действительно являются подобными, так как изотермы приведенной вязкости η/η_0 для указанных веществ практически совпали. Последнее выборочно показано на рис. 3. При этом максимальный разброс точек не превышал 7%.

Для построения изотерм приведенного коэффициента вязкости использовались наиболее надежные экспериментальные данные по вязкости Ar, Kr, Xe, He, H₂, N₂, D₂, CH₄, C₂H₄, C₂H₆, CO, CO₂, O₂, NH₃, H₂O.

Соответствующие значения плотностей указанных веществ были взяты из справочника [16], а также из оригинальных работ.

Значения потенциальных параметров $\sigma(T)$ и $\varepsilon(T)$ приняты по данным [12] и [17—19], где они табулированы для большого количества веществ.

Сглаживание и взаимное согласование опытных значений η/η_0 по линиям $T^* = \text{const}$ и $\rho^* = \text{const}$ позволили получить сетку опорных значений $\eta/\eta_0 = \varphi(\rho^*, T^*)$, которая явля-

ется общей для всех веществ, поскольку в указанной системе координат все вещества подобны.

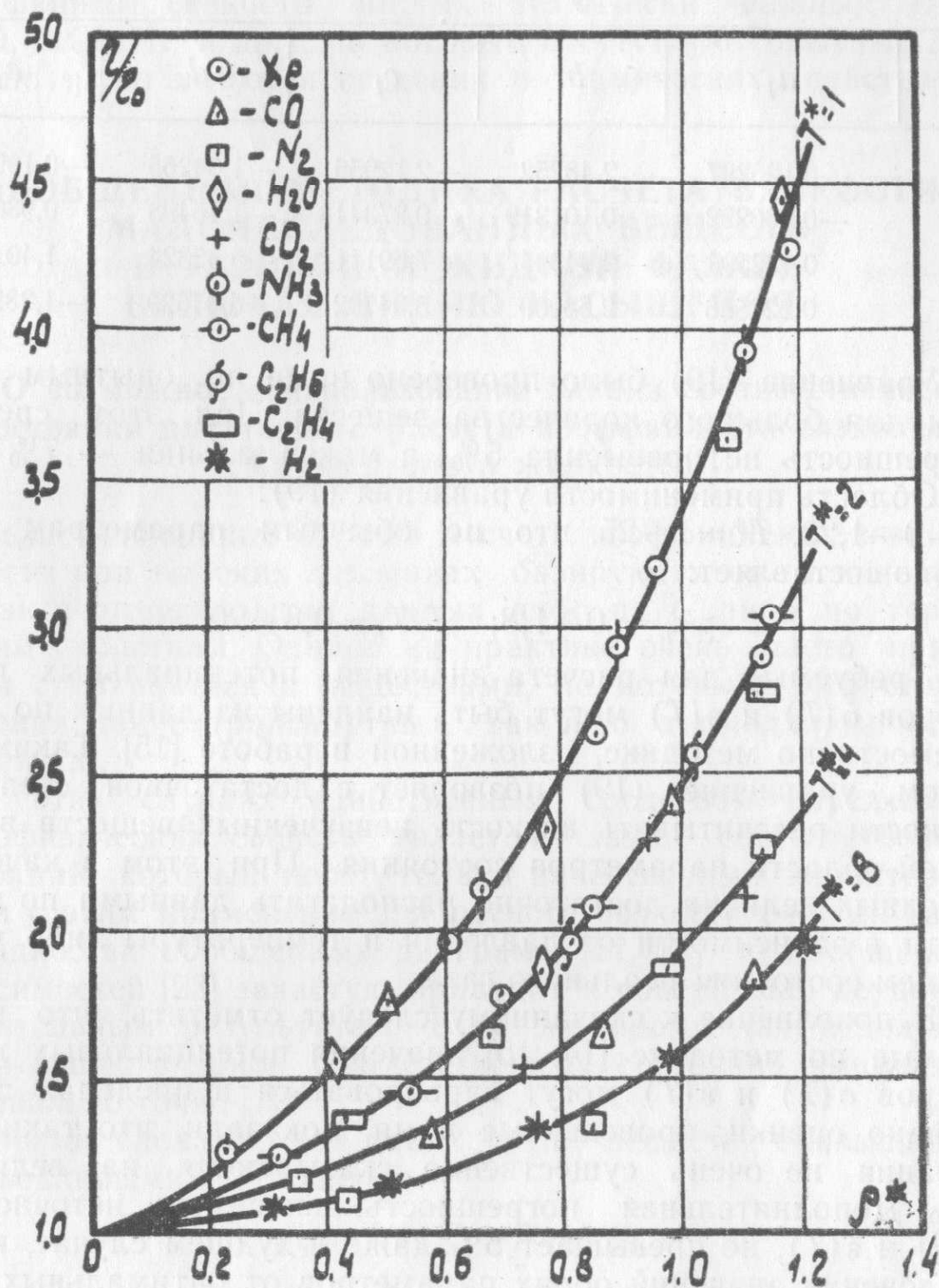


Рис. 3. Изотермы приведенного коэффициента вязкости.

Для получения аналитической зависимости (18) полученная сетка опорных значений были аппроксимирована по методике, изложенной выше, уравнением:

$$\eta/\eta_0 = 1 + \sum_{i=1}^4 a_i \rho^{*i} + \frac{1}{T^*} \sum_{i=1}^4 b_i \rho^{*i} + \dots + \frac{1}{T^{*4}} \sum_{i=1}^4 e_i \rho^{*i}. \quad (19)$$

Численные значения коэффициентов уравнения (19) приведены в таблице 4.

Значения коэффициентов уравнения (19)

i	a_i	b_i	c_i	d_i	e_i
1	-0,126297	2,48252	-2,12956	-1,04265	-0,199718
2	-0,280292	0,101319	0,273418	-1,46498	0,980365
3	0,422594	-2,94345	7,69111	-5,32324	1,40170
4	0,222556	2,68969	-5,34702	4,04629	-1,28964

Уравнение (19) было проверено нами по опытными данным для большого количества веществ. При этом средняя погрешность не превысила 5%, а максимальная — 7% [20].

Область применимости уравнения (19):
 $\rho^* = 0-1,20$, $T^* = 1-25$. что по обычным параметрам примерно составляет:

$$\rho/\rho_k = 0-1,8; \quad T/T_k = 0,8-20.$$

Требуемые для расчета значения потенциальных параметров $\sigma(T)$ и $\varepsilon(T)$ могут быть найдены из данных по сжимаемости по методике, изложенной в работе [15]. Таким образом, уравнение (19) позволяет с достаточной степенью точности рассчитывать вязкость неизученных веществ в широкой области параметров состояния. При этом в качестве исходных величин достаточно располагать данными по плотности в зависимости от давления и температуры либо уравнением состояния реального газа.

В дополнение к сказанному следует отметить, что получаемые по методике [14, 15] значения потенциальных параметров $\sigma(T)$ и $\varepsilon(T)$ могут варьироваться в пределах $\pm 5\%$. Однако оценки, проведенные нами, показали, что такие колебания не очень существенно сказываются на величине η/η_0 . Дополнительная погрешность, вносимая неточностью $\sigma(T)$ и $\varepsilon(T)$, не превышает 5% даже в худшем случае, когда отклонения значений обоих параметров от оптимальных предельны и одного знака.

Установленный факт термодинамического подобия всех веществ при использовании переменных параметров приведения $\sigma(T)$ и $\varepsilon(T)$ не может быть использован для расчета термодинамических свойств неизученных веществ, так как указанные параметры определяются по опытными термическим данным. Тем не менее, такой подход обеспечивает вычисление коэффициента вязкости неизученных сжатых газов в широких пределах изменения температур и давлений. В соответствии с данной методикой в настоящей работе впервые получены значения коэффициента вязкости газообраз-

ного фтора в интервале температур 200—1000°K при давлениях до 1000 бар. Используя этот метод, можно рассчитать коэффициент вязкости многих технически важных газов (D_2O , HCl, HF и др.), по которым отсутствуют опытные данные по η , но имеются сведения о термических свойствах.

ОБОБЩЕННАЯ МЕТОДИКА РАСЧЕТА ВЯЗКОСТИ МАЛОИССЛЕДОВАННЫХ ВЕЩЕСТВ В ГАЗОВОЙ И ЖИДКОЙ ФАЗАХ, ВКЛЮЧАЯ ЛИНИЮ НАСЫЩЕНИЯ

1. О возможности использования закона соответственных состояний для точного расчета коэффициента вязкости сжатых газов и жидкостей

Вышеизложенные методы расчета коэффициента вязкости веществ при высоких давлениях базируются на использовании экспериментальных данных либо по η , либо по термическим свойствам. Однако на практике очень часто приходится сталкиваться с веществами, по которым отсутствуют сведения как о транспортных, так и о термодинамических свойствах.

В этих случаях единственным средством определения теплофизических свойств является закон соответственных состояний, который носит только качественный характер. В связи с этим применение для расчета вязкости сжатых газов и жидкостей обобщенных диаграмм [21, 22] и обобщенных зависимостей [23] зачастую приводит к совершенно неудовлетворительным результатам. В то же время для отдельных групп веществ закон соответственных состояний выполняется довольно точно [1].

Иными словами, для таких групп веществ оказываются справедливыми соотношения:

$$\eta/\eta_k = f(\pi, \tau) = f'(\omega, \tau), \quad (20)$$

$$\eta/\eta_0 = \varphi(\pi, \tau) = \varphi'(\omega, \tau). \quad (21)$$

Практически более удобными представляются соотношения типа (21), так как в этом случае приведение осуществляется не к трудноопределяемой величине критической вязкости, а к коэффициенту вязкости разреженного газа (при $p \ll 1$ атм).

В настоящей работе задача создания обобщенной методики расчета сведена к классификации всех веществ по характерным группам с последующим составлением обобщенных зависимостей, справедливых для этих групп.

Естественно предположить, что, в первом приближении,

обобщенная зависимость должна выполняться для веществ с одинаковым характером межмолекулярного взаимодействия.

В соответствии с этим представляется целесообразным разделить все вещества на 3 основных класса:

- а) «сферические»;
- б) «несферические» неполярные;
- в) полярные.

Для веществ, отнесенных к первому классу, характерен одинаковый характер межмолекулярного взаимодействия (инертные газы и др.). Оно является центрально-симметричным и может быть в принципе описано любым двухпараметрическим потенциалом.

$$u=f(r, \sigma, \varepsilon),$$

(например, потенциалом Леннарда-Джонса).

С помощью параметров σ и ε можно образовать безразмерную систему приведенных температуры и плотности, в которой теплофизические свойства будут представлены некоторыми универсальными функциями этих переменных, т. е. можно записать:

$$z=\varphi(\omega, \tau), \quad \eta/\eta_0=f(\omega, \tau) \text{ и т. д.}$$

Первое из этих уравнений указывает на подобие по термическим свойствам, второе — по приведенному коэффициенту вязкости и т. д.

Как известно, многочисленные экспериментальные данные подтверждают справедливость закона соответственных состояний для группы инертных газов. Отметим, что указанные вещества имеют близкие значения критических чисел

$$z_k = 0,292 \left(z_k = \frac{p_k v_k}{RT_k} \right).$$

В отдельный класс должны быть выделены полярные вещества, для которых межмолекулярное взаимодействие в первом приближении может быть описано трехпараметрическим потенциалом.

$$u=f(r, \sigma, \varepsilon, \beta)$$

(например, потенциалом Штокмайера (12—6—3) или его модификацией (18—6—3). Тогда сжимаемость вещества, приведенный коэффициент вязкости и другие свойства, в общем случае, могут быть представлены в виде:

$$z=\varphi(\omega, \tau, \beta) \quad \eta/\eta_0=f(\omega, \tau, \beta)$$

В пределах данного класса указанные функции будут одинаковыми для тех веществ, у которых $\beta = \text{idem}$.

Если в качестве параметров приведения принять критические константы T_k и ρ_k , то β следует принять равным z_k , ибо $z_k = \text{idem}$ является необходимым условием термодинамического подобия.

«Несферические» неполярные вещества характеризуются тем, что их межмолекулярное взаимодействие не является центрально-симметричным. Несферичность межмолекулярного силового поля этих веществ вызывается анизотропией поляризуемости в дисперсионных силах, а также направленностью взаимодействий квадруполь и высших мультиполей [24].

Каждое из этих взаимодействий преимущественно реализуется в определенной области параметров состояния, что определяется характером поступательных, колебательных и вращательных состояний молекул вещества.

Детальный учет вкладов каждого из этих видов взаимодействия с целью выявления единых закономерностей в поведении веществ на сегодняшний день невозможен в силу недостаточного развития теории межмолекулярных сил. Поэтому представляется целесообразным характеризовать различие в свойствах таких веществ каким-либо общим для них макропараметром, который в какой-то степени отражал бы индивидуальные особенности данного вещества.

Обработка и анализ большого количества экспериментальных данных по вязкости сжатых газов, проведенные в диссертационной работе, показали, что в качестве такого параметра как для полярных, так и для «несферических» неполярных веществ с успехом может быть использовано критическое число z_k . Последнее, по-видимому, объясняется тем, что величина критического числа в значительной степени определяется электростатической природой вещества [25].

Экспериментальные данные показывают, что вещества, относящиеся к одному из указанных классов и имеющие равные или близкие значения критических чисел, в соответственных состояниях имеют практически одинаковые значения приведенного коэффициента вязкости. Естественно, такие вещества могут быть объединены в группы с одинаковым значением z_k , в пределах которых будут справедливы соотношения типа (21).

В качестве конкретной формы зависимости (21) целесообразно использовать уравнение типа (10), позволяющее с высокой точностью описать вязкость вещества в газовой и жидкой фазах.

Из сказанного следует довольно важный вывод. Уравнение типа (10), составленное по надежным экспериментальным данным для хорошо изученного (эталонного) вещества, будет справедливо и для других веществ, относящихся к то-

му же классу и имеющих те же значения критического числа, что и эталонное.

2. Обобщенные уравнения для расчета приведенного коэффициента вязкости сжатых газов и жидкостей

а) «Сферические» вещества

В качестве обобщенного для «сферических» веществ принято уравнение, составленное по опытным данным для аргона [26].

б) «Несферические» неполярные вещества

Путем графической обработки наиболее надежных экспериментальных данных по вязкости и термическим свойствам большого количества веществ данного класса в координатах η/η_0 , ω , z_k при $\tau = \text{const}$ и η/η_0 , ω , τ при $z_k = \text{const}$ в работе получены сетки опорных значений η/η_0 для фиксированных значений критических чисел $z_k = 0,25$; $z_k = 0,27$ и $z_k = 0,29$.

На рис. 4 представлена типичная зависимость $\eta/\eta_0(\omega, z_k)$ при фиксированном значении приведенной температуры $\tau = 1,5$. Эти сетки опорных значений η/η_0 в зависимости от ω и τ аппроксимированы уравнениями типа (10), которые и являются обобщенными для групп «несферических» неполярных веществ, характеризующихся указанными значениями z_k [27].

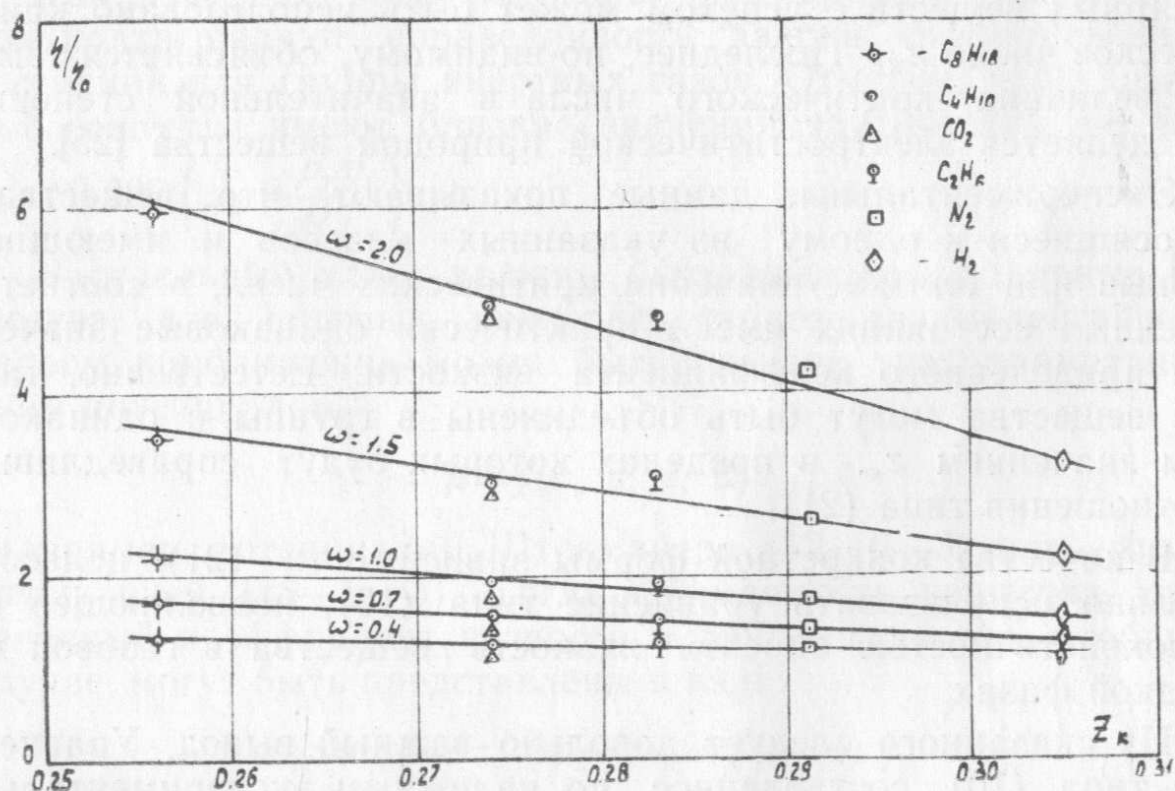


Рис. 4. Зависимость приведенного коэффициента вязкости «несферических» неполярных веществ от параметров состояния и критического числа.

в) Полярные вещества

Для выяснения характера зависимости приведенного коэффициента вязкости в соответственных состояниях от критического числа для полярных веществ, опытные данные по вязкости последних также были обработаны в координатах η/η_0 , ω , z_k при $\tau = \text{const}$ и η/η_0 , ω , τ при $z_k = \text{const}$.

При этом обнаружилось, что зависимость $\eta/\eta_0(z_k)_{\omega, \tau}$ наблюдается не во всей области изменения критических чисел, а только до значений $z_k \leq 0,26$. Этот факт проанализирован и объяснен в диссертации на основе развитых Лондоном [28] представлений о взаимодействии полярных молекул.

В результате с помощью указанной обработки экспериментальных данных составлены обобщенные уравнения, соответствующие группам полярных веществ со значениями критических чисел $z_k = 0,23$; $z_k = 0,24$, $z_k = 0,25$; $z_k = 0,26$ и $z_k > 0,26$.

Проверка обобщенных уравнений для «сферических», «несферических» неполярных и полярных веществ показала, что их точность соизмерима с точностью эксперимента.

3. Расчет обобщенных таблиц приведенного коэффициента вязкости

Составленные обобщенные уравнения для расчета вязкости «сферических», «несферических» неполярных и полярных веществ используют в качестве независимых переменных приведенные плотность и температуру.

В то же время для расчета η неизученных веществ, а также составления обобщенных таблиц желательно использовать в качестве независимых переменных приведенные давление и температуру. Отсюда вытекает необходимость сочетания указанных уравнений с каким-либо обобщенным уравнением состояния, связывающим приведенную плотность с параметрами π и τ .

На основе произведенного критического обзора опубликованных обобщенных методов расчета термических свойств показано, что уравнение состояния Гиршфельдера и сотрудников [29] является наиболее пригодным для определения плотности неизученных веществ в зависимости от приведенных давлений и температур.

Произведенный в работе анализ показал, что точность исходных значений ω в 1—3% обеспечивает получение разумных результатов по η/η_0 .

Многочисленные сопоставления с экспериментальными данными свидетельствуют о том, что точность значений ω , рассчитанных по уравнению [29], в основном лежит в указанных пределах. Получены значения приведенного коэффи-

циента вязкости для «сферических», «несферических» неполярных и полярных веществ в зависимости от приведенных температуры и давления.

Эти данные сведены в таблицы, приводимые в приложении и охватывающие интервал приведенных температур $\tau=0,6-5,0$ и приведенных давлений $\pi=0-30$. Точность указанных таблиц оценивается в 5—8%.

Таким образом, располагая этими таблицами, можно быстро и достаточно точно получить данные по коэффициенту вязкости малоизученного вещества. При этом в качестве исходных данных используются только значения критических параметров вещества и сведения о вязкости при $p \leq 1$ атм.

В частности, по предложенной методике нами впервые были рассчитаны значения коэффициента вязкости бензола в интервале температур 273—1000°К и давлений 1—500 бар, включая данные по линии насыщения. Отметим, что имеющиеся экспериментальные данные по η C_6H_6 охватывают довольно узкий интервал параметров ($t=95-248^\circ$, $p=1-600$ атм) [1]. Результаты расчета обладают точностью порядка 3%.

З а к л ю ч е н и е

Настоящая работа посвящена разработке методов расчета коэффициента вязкости сжатых газов. Ее основные результаты могут быть изложены в следующих выводах.

1. Произведен анализ существующих методов расчетного определения коэффициента вязкости сжатых газов. Показано, что опубликованные в литературе теоретические, полуэмпирические и эмпирические методы содержат ряд ограничений, вследствие чего они не могут быть использованы в широкой области параметров, охватывающей газовую и жидкую фазы.

Обосновывается необходимость разработки новых методов, пригодных как для обработки имеющегося экспериментального материала, так и для расчета вязкости неизученных веществ.

2. Получено уравнение, связывающее коэффициент вязкости с температурой и плотностью, и разработана методика его составления по экспериментальным данным.

Показано, что это уравнение является единым и надежно описывает зависимость коэффициента вязкости от параметров состояния в газовой и жидкой фазах, включая линию насыщения и околоскритический район. При этом точность расчетных значений η соответствует точности исходных экспериментальных данных.

3. По разработанной методике составлены уравнения для расчета вязкости таких технически важных газов как аргон,

азот, водород, двуокись углерода, вода, аммиак, метиловый спирт, метан, этан, пропан, бутан, пентан, гептан, гексан и октан. Проведенные многочисленные сопоставления расчетных и опытных значений η указанных веществ свидетельствуют о пригодности полученных уравнений для одновременного описания газовой и жидкой фаз.

Отметим, что уравнение для расчета $\eta_{\text{H}_2\text{O}}$ воспроизводит аномальную зависимость вязкости этого вещества от давления. При этом расчетные значения коэффициента вязкости воды и водяного пара находились в пределах допуска Международной скелетной таблицы. Последнее подтверждает универсальность разработанной методики в смысле применимости к веществам с любым характером зависимости вязкости от параметров состояния.

Рассчитаны также значения η_{CO_2} в околоскритическом районе, включая данные на критической изотерме.

4. Показана возможность экстраполяции расчетных значений коэффициента вязкости в область температур, превышающих верхнюю температурную границу экспериментальных данных.

5. Полученные уравнения могут быть использованы при расчетах различных процессов и аппаратов с помощью ЭВМ, а в сочетании с табличными данными по термическим свойствам, либо уравнениями состояния — для расчета подробных таблиц коэффициента вязкости в зависимости от давления.

6. На основе использования эффективной потенциальной функции (12—6) с переменными параметрами получено обобщенное уравнение для расчета коэффициента вязкости неизученных сжатых газов в широких пределах изменения температур и давлений. При этом в качестве исходных данных для расчета необходимо располагать только термическими свойствами исследуемого вещества.

Выполнен расчет коэффициента вязкости газообразного фтора в интервале температур 200—1000°K при давлениях до 100 бар. Точность расчетных значений η_{F_2} оценивается в 7—10%.

7. Разработана методика расчета вязкости неизученных веществ в газовой и жидкой фазах, а также на линии насыщения. Методика основывается на разделении всех веществ на 3 основных класса («сферические», «несферические» неполярные и полярные) и использовании в пределах каждого класса критического числа в качестве коррелирующего параметра.

8. Составлены обобщенные уравнения для расчета приведенного коэффициента вязкости «сферических», «несферических» неполярных и полярных веществ.

Показано, что точность полученных уравнений соизмерима с точностью эксперимента.

9. Произведен анализ опубликованных обобщенных методов расчета термических свойств реальных газов.

На основании этого анализа показано, что наиболее пригодным в силу своей универсальности является обобщенное уравнение состояния Гиршфельдера и сотрудииков, которое используется для вычисления плотности неизученных веществ.

10. Составлены подробные таблицы значений приведенного коэффициента вязкости «сферических», «несферических» неполярных и полярных веществ.

Эти таблицы охватывают диапазон приведенных температур $\tau = 0,6—5,0$ и давлений $\pi = 0—30$, включая параметры на линии насыщения.

Таблицы имеют шаг, удобный для интерполяции. Погрешность при пользовании ими, в основном, не превышает 5—8%, что подтверждено проверками по многочисленным экспериментальным данным.

Использование этих таблиц позволяет значительно облегчить и упростить вычисление коэффициента вязкости неизученных веществ при использовании в качестве исходных данных только значений критических параметров.

11. По указанным таблицам построены обобщенные диаграммы приведенного коэффициента вязкости.

12. С помощью разработанной в диссертации обобщенной методики (п. 8) рассчитаны значения коэффициента вязкости бензола в интервале температур 273—1000°K и давлений 1—500 бар. Эти данные охватывают газовую и жидкую фазы, а также параметры на линии насыщения и обладают точностью порядка 3%.

13. Большинство результатов настоящей работы получено нами впервые (пп. 2—4, 6—8, 10—12) и могут найти широкое применение в практических расчетах.

Результаты работы докладывались:

1. На III Всесоюзном совещании по тепло- и массообмену (г. Минск, 1968 г.).
2. На Всесоюзной научно-технической конференции по термодинамике, Ленинград, 1968.
3. На III Всесоюзной теплофизической конференции по свойствам веществ при высоких температурах, г. Баку, 1968.
4. На научном семинаре кафедры физики Московского авиационного института. Март, 1969.

Основное содержание диссертации опубликовано в работах [3—5], [20], [26, 27].

ЛИТЕРАТУРА

1. Голубев И. Ф. Вязкость газов и газовых смесей, Физматгиз, М., 1959.
2. Brokaw R. S. "Statistical mechanical theories of Transport Properties", NASA TM X-52478, 1968.
3. Кессельман П. М., Каменецкий В. Р. Теплоэнергетика, 1967, № 8, 73.
4. Кессельман П. М., Котляревский П. А., Каменецкий В. Р. Всесоюзная научно-техническая конференция по термодинамике. Тезисы докладов, Ленинград, 1968.
5. Каменецкий В. Р. III Всесоюзная конференция по теплофизическим свойствам веществ при высоких температурах. Тезисы докладов. Баку, 1968.
6. Вукалович М. П., Варгафтик Н. Б. Теплоэнергетика, 1965, № 12, 55.
7. Michels A., Botzen A., Schuurman W. Physika, 23, 95, 1957.
8. Naldrett S. N., Maas O. Canad. J. Res., 18, 322, 1940.
9. Kestin J., Whitelaw J., Zien C. Physica, 31, 161, 1964.
10. Вукалович М. П., Алтунин В. В. Теплофизические свойства двуокиси углерода, Атомиздат, М., 1965.
11. Благоей Ю. П., Зозуля В. Н. Всесоюзная научно-техническая конференция по термодинамике. Тезисы докладов, Ленинград, 1968.
12. Голубев И. Ф., Агаев И. А. Вязкость предельных углеводородов. Азернешр, Баку, 1964.
13. Shimotake H., Thodos G. A. I. Ch. E' Journal, 4, 257, 1958.
14. Кессельман П. М. Диссертация, ОТИ, Одесса, 1966.
15. Кессельман П. М. Теплофизика высоких температур, 1964, 2, 879.
16. Справочник по теплофизическим свойствам газов и жидкостей, под общей редакцией Н. Б. Варгафтика. Физматгиз, М., 1963.
17. Кессельман П. М., Чернышев С. К. Теплофизика высоких температур, 1965, 3, 700.
18. Кессельман П. М., Литвинов А. С., ИФЖ, 1966, 10, 385.
19. Кессельман П. М., Литвинов А. С., Чернышев С. К. В сб.: Общие вопросы теплообмена, Минск, 1966, стр. 173.

20. Кессельман П. М., Каменецкий В. Р. В сб.: «Тепло- и массоперенос», т. 7, Минск, 1968.

21. Comings E. W., Mayland B. J., Egly R. S. The viscosity of Gages at High Pressures, Univ. Ill., Eng. Expt., Stand. Bull., N 354, 1944.

22. Uehara O. A., Watson K. M. Nat. Petrol News, 36, 764, 1944.

23. Jossi J. A., Stiel L. G., Thodos G. A.I.Ch.E. Journal 8, 59, 1962.

24. Гиршфельдер Дж., Кертисс Ч., Берд Р. Молекулярная теория газов и жидкостей. ИЛ., М., 1961.

25. Stiel L. G., Thodos G. A.I.Ch.E. Journal, 8, 229, 1961.

26. Кессельман П. М., Каменецкий В. Р. ИФЖ, 1968, 15, 514.

27. Кессельман П. М., Каменецкий В. Р. III Всесоюзная конференция по теплофизическим свойствам веществ при высоких температурах. Тезисы докладов, Баку, 1968.

28. London F. Trans. Farad. Soc., 32, 222, 1930.

29. Hirschfelder J. O., Buehler R. J., Mc. Gee H. Sutton I. R. Ind. Eng. Chem., 50, 375, 1958.

Подписано к печати 9.IV.69 г. Формат бумаги 60×90/16

1,75 печ. л. 1,575 уч. изд. л. БР 04103. Зак. № 1585. Тираж 200.

Городская типография управления по печати Одесского облисполкома.
ц. № 3, ул. Чижикова, № 17.