

УДК 533.16

Расчет коэффициентов вязкости разреженных смесей газов, содержащих метан, этан, пропан, н-бутан

А.Ф. Богатырев^{1*}, М.А. Кучеренко¹, О.А. Макеенкова²

¹ Филиал Национального исследовательского университета «МЭИ» в г. Смоленске, Российская Федерация, 214013, г. Смоленск, Энергетический пр-д, д. 1

² Смоленский государственный университет, Российская Федерация, 214000, г. Смоленск, ул. Пржевальского, д. 4

* E-mail: Tfs209@yandex.ru

Ключевые слова: разреженные газовые смеси, вязкость, метод расчета, углеводороды.

Тезисы. В рамках молекулярно-кинетической теории Чепмена – Энскога предложен метод расчета параметров потенциала молекулярного взаимодействия разнородных молекул, который используется при вычислении коэффициентов вязкости смесей газов. Для двух- и трехкомпонентных разреженных газовых смесей расчетные коэффициенты вязкости совпадают с экспериментом в пределах погрешности 0,5...3 %.

В статье представлены результаты вычисления по указанной методике коэффициентов вязкости для пяти газовых систем: CH₄–C₂H₆, CH₄–C₃H₈, CH₄–n-C₄H₁₀, C₂H₆–n-C₄H₁₀, C₃H₈–n-C₄H₁₀ при различных концентрациях в интервале температур 240...600 К. Для отдельных смесей газов результаты этих вычислений сравниваются с экспериментальными данными и расчетными данными, полученными по другим схемам. Наблюдается хорошее согласие.

Транспортные свойства смесей газов играют важную роль как в естественных, так и во многих технологических процессах – добыче полезных ископаемых, сжижении газов и др. Особый интерес представляют свойства газов и газовых смесей при относительно небольших давлениях. Транспортные свойства таких смесей можно описывать в рамках молекулярно-кинетических теорий.

В настоящее время наибольшее число измерений относится к чистым газам, вязкость смесей приходится рассчитывать с использованием этих данных в рамках кинетических теорий либо по тем или иным обобщающим формулам. Сегодня используются более 10 различных методов вычисления вязкости смесей газов, многие из которых не универсальны и могут быть применены лишь к конкретным газам или же требуют наличия экспериментальных данных [1–13].

Методика расчета

Ранее [14–17] авторами предложен метод расчета транспортных свойств разреженных смесей газов на основе молекулярно-кинетической теории газов [1]. При наличии данных о вязкости чистых газов для двух- и трехкомпонентных газовых смесей наблюдается хорошее согласие расчетных и экспериментальных данных. Метод апробирован для восьми бинарных и трех 3-компонентных газовых смесей при различных составах в области температур 250...1200 К [14–17]. Во всех случаях вычисления авторов согласуются с экспериментальными данными других исследователей в пределах погрешности эксперимента и расчета.

Предложен метод вычисления комплекса, представляющего собой произведение квадрата эффективного диаметра разнородных молекул на интеграл столкновения этих молекул [14]:

$$\sigma_{12}^2 \Omega_{12}^{(22)*} = \frac{2\sigma_1^2 \Omega_1^{(22)*} \sigma_2^2 \Omega_2^{(22)*}}{\sigma_1^2 \Omega_1^{(22)*} + \sigma_2^2 \Omega_2^{(22)*}}, \quad (1)$$

где $\sigma_1^2 \Omega_1^{(22)*}$ и $\sigma_2^2 \Omega_2^{(22)*}$ – произведения квадратов эффективных диаметров молекул газов 1 и 2 на интегралы столкновения молекул соответствующих газов, которые при

заданной температуре можно вычислить из коэффициентов вязкости чистого газа η_i в рамках строгой кинетической теории [1] по формуле

$$\sigma_i^2 \Omega_i^{(22)*} = 266,93 \frac{\sqrt{M_i T}}{\eta_i}, \quad (2)$$

где T – температура, К; M_i – молекулярный вес i -го компонента, г/моль. Коэффициент вязкости η_i , необходимый для расчета указанных комплексов, можно вычислить либо по экспериментальным данным, либо по различным обобщающим методикам [18–21].

Вязкость бинарной смеси газов рассчитывают по следующим формулам:

$$\frac{1}{[\eta_{см}]_1} = \frac{X_\eta + Y_\eta}{1 + Z_\eta} = X_\eta \left[\frac{1 + (Y_\eta / X_\eta)}{1 + Z_\eta} \right], \quad (3)$$

$$X_\eta = \frac{x_1^2}{[\eta_1]_1} + \frac{2x_1x_2}{[\eta_{12}]_1} + \frac{x_2^2}{[\eta_2]_1},$$

$$Y_\eta = \frac{3}{5} A_{12}^* \left\{ \frac{x_1^2}{[\eta_1]_1} \left(\frac{M_1}{M_2} \right) + \frac{2x_1x_2}{[\eta_{12}]_1} \left(\frac{(M_1 + M_2)^2}{4M_1M_2} \right) \left(\frac{[\eta_{12}]_1^2}{[\eta_1]_1[\eta_2]_1} \right) + \frac{x_2^2}{[\eta_2]_1} \left(\frac{M_2}{M_1} \right) \right\},$$

$$Z_\eta = \frac{3}{5} A_{12}^* \left\{ x_1^2 \left(\frac{M_1}{M_2} \right) + 2x_1x_2 \left[\left(\frac{(M_1 + M_2)^2}{4M_1M_2} \right) \left(\frac{[\eta_{12}]_1}{[\eta_1]_1} + \frac{[\eta_{12}]_1}{[\eta_2]_1} - 1 \right) \right] + x_2^2 \left(\frac{M_2}{M_1} \right) \right\},$$

где x_1 и x_2 – мольные доли компонентов 1 и 2; M_1 и M_2 – молекулярные веса компонентов 1 и 2, г/моль; $[\eta_1]_1$ и $[\eta_2]_1$ – коэффициенты вязкости компонентов 1 и 2 в первом приближении, мкПа·с; $[\eta_{12}]_1$ – первое приближение вязкости смеси, которое вычисляется подстановкой в формулу (2) вместо $\sigma_i^2 \Omega_i^{(22)*}$ значения $\sigma_{12}^2 \Omega_{12}^{(22)*}$, вычисленного по формуле (1), при условии, что $M_i = M_1 M_2 / (M_1 + M_2)$; $A_{12}^* = \Omega_{12}^{(22)*} / \Omega_{12}^{(11)*}$ – отношение двух интегралов столкновения при приведенной температуре $T_{12}^* = kT / \epsilon_{12}$ (ϵ_{12}/k – энергетический параметр потенциальной функции межмолекулярного взаимодействия) [1, 2].

Для данного вида потенциала межмолекулярного взаимодействия $A_{12}^* \approx 1$ и слабо меняется с температурой T_{12}^* [1, 14]. Как показали расчеты [22], для большинства систем газов изменение A_{12}^* на 0,1 вызывает изменение расчетного коэффициента вязкости бинарной газовой смеси на 0,5 %.

Результаты расчетов

М. Трауц и К.Г. Зорг [4] приводят результаты экспериментального исследования коэффициентов вязкости бинарных смесей $C_2H_6-CH_4$ и $C_3H_8-C_2H_6$ различного состава в интервале температур 293,2...523,2 К. Для сравнения аналогичные расчеты для тех же температур и составов газовых смесей были проведены по формулам (1) – (3) (табл. 1 и 2).

Авторами проанализированы измеренные экспериментально [3, 4, 7] и вычисленные по обобщающим методикам [8, 10, 18–21, 23, 24] коэффициенты вязкости чистых газов – метана, этана, пропана, н-бутана – для температур 298,2 и 473,2 К. Разброс экспериментальных данных составил 0,5...0,8 %, а средние отклонения расчетных данных от экспериментальных – 1...1,5 %. Следовательно, при расчете коэффициентов вязкости бинарных смесей этих газов разница между экспериментальными и расчетными данными не будет превышать 2,5 %.

Для пяти смесей газов $C_2H_6-CH_4$, $C_3H_8-CH_4$, $n-C_4H_{10}-CH_4$, $n-C_4H_{10}-C_2H_6$ и $n-C_4H_{10}-C_3H_8$ по формулам (1) – (3) рассчитаны концентрационная и температурная зависимости коэффициентов вязкости (табл. 3–7). В качестве исходных данных о коэффициентах вязкости чистых газов использовались обобщающие зависимости для метана [18], этана [19], пропана [20], н-бутана [21]. В качестве значений A_{12}^* при соответствующих

Таблица 1

**Коэффициенты вязкости $\eta_{C_2H_6-C_2H_4}$ разреженной бинарной газовой смеси
этана и метана, мкПа·с**

T, К	$x_{C_2H_4}$						
	1,0000	0,8116	0,567	0,4874	0,2045	0,1903	0,0000
293,2	10,87	10,455	9,99	9,86	9,385	9,375	9,09
	10,87	10,60	10,17	10,02	9,48	9,45	9,09
373,2	13,31	12,88	12,39	12,26	11,735	11,74	11,42
	13,31	13,04	12,59	12,43	11,85	11,82	11,42
473,2	16,03	15,62	15,11	14,96	14,415	14,42	14,085
	16,03	15,77	15,32	15,16	14,54	14,51	14,085
523,2	17,25	16,82	16,30	16,14	15,605	15,595	15,26
	17,25	16,99	16,54	16,37	15,74	15,70	15,26

Примечание. В нечетных строках приведены экспериментальные данные [4], в четных – расчетные (см. формулы (1) – (3)). Среднее отклонение – 1,1 %, максимальное отклонение – 1,8 %.

Таблица 2

**Коэффициенты вязкости $\eta_{C_3H_8-C_2H_4}$ разреженной бинарной газовой смеси
пропана и этана, мкПа·с**

T, К	$x_{C_3H_8}$				
	1,0000	0,4327	0,2563	0,1526	0,0000
293,2	9,09	8,41	8,28	8,145	8,01
	9,09	8,49	8,30	8,18	8,01
373,2	11,42	10,58	10,39	10,25	10,08
	11,42	10,68	10,43	10,29	10,08
473,2	14,085	13,13	12,98	12,72	12,53
	14,085	13,23	12,95	12,78	12,53
523,2	15,26	14,25	14,01	13,82	13,625
	15,26	14,36	14,06	13,89	13,625

Примечание. В нечетных строках приведены экспериментальные данные [4], в четных – расчетные (см. формулы (1) – (3)). Среднее отклонение – 0,5 %, максимальное отклонение – 0,9 %.

Таблица 3

Расчетные коэффициенты $\eta_{C_2H_6-C_2H_4}$, мкПа·с (см. формулы (1) – (3))

T, К	$x_{C_2H_6}$						
	0,0	0,2	0,4	0,5	0,6	0,8	1,0
240	9,099	8,848	8,551	8,394	8,233	7,908	7,587
260	9,791	9,528	9,215	9,049	8,879	8,536	8,196
280	10,46	10,19	9,866	9,692	9,514	9,153	8,796
300	11,12	10,84	10,50	10,32	10,14	9,760	9,386
320	11,76	11,47	11,12	10,94	10,75	10,36	9,967
340	12,38	12,09	11,73	11,54	11,34	10,94	10,54
360	12,99	12,69	12,33	12,13	11,93	11,51	11,10
380	13,58	13,28	12,91	12,71	12,50	12,08	11,65
400	14,16	13,86	13,48	13,28	13,06	12,63	12,19
420	14,72	14,42	14,04	13,83	13,61	13,17	12,72
440	15,27	14,97	14,59	14,37	14,15	13,70	13,25
460	15,82	15,51	15,12	14,91	14,69	14,23	13,76
480	16,35	16,04	15,65	15,43	15,21	14,74	14,26
500	16,87	16,56	16,17	15,95	15,72	15,24	14,76
520	17,38	17,07	16,67	16,45	16,22	15,74	15,25
540	17,88	17,58	17,17	16,95	16,71	16,22	15,73
560	18,37	18,07	17,66	17,44	17,20	16,70	16,20
580	18,86	18,56	18,15	17,92	17,68	17,18	16,66
600	19,34	19,03	18,62	18,39	18,15	17,64	17,12

Таблица 4

Расчетные коэффициенты $\eta_{C_3H_8-CH_4}$, мкПа·с (см. формулы (1) – (3))

T, K	$x_{C_3H_8}$						
	0,0	0,2	0,4	0,5	0,6	0,8	1,0
240	9,099	8,731	8,209	7,931	7,653	7,111	6,604
260	9,791	9,403	8,850	8,554	8,257	7,680	7,139
280	10,46	10,06	9,480	9,168	8,855	8,245	7,672
300	11,12	10,70	10,10	9,774	9,446	8,806	8,204
320	11,76	11,33	10,71	10,37	10,03	9,362	8,733
340	12,38	11,95	11,31	10,96	10,61	9,913	9,258
360	12,99	12,55	11,90	11,54	11,17	10,46	9,779
380	13,58	13,15	12,47	12,11	11,73	11,00	10,30
400	14,16	13,72	13,04	12,67	12,28	11,53	10,81
420	14,72	14,29	13,60	13,22	12,83	12,05	11,31
440	15,27	14,85	14,15	13,76	13,36	12,57	11,81
460	15,82	15,39	14,69	14,29	13,89	13,08	12,31
480	16,35	15,93	15,22	14,82	14,41	13,58	12,79
500	16,87	16,45	15,74	15,33	14,92	14,08	13,27
520	17,38	16,97	16,25	15,84	15,42	14,57	13,75
540	17,88	17,48	16,75	16,34	15,91	15,05	14,21
560	18,37	17,98	17,25	16,83	16,40	15,52	14,67
580	18,86	18,47	17,74	17,31	16,88	15,99	15,12
600	19,34	18,95	18,22	17,79	17,35	16,45	15,57

Таблица 5

Расчетные коэффициенты $\eta_{n-C_4H_{10}-CH_4}$, мкПа·с (см. формулы (1) – (3))

T, K	$x_{n-C_4H_{10}}$						
	0,0	0,2	0,4	0,5	0,6	0,8	1,0
280	10,46	10,02	9,241	8,831	8,427	7,666	6,981
300	11,12	10,66	9,850	9,420	8,996	8,195	7,473
320	11,76	11,29	10,45	10,00	9,558	8,719	7,961
340	12,38	11,90	11,04	10,57	10,11	9,238	8,447
360	12,99	12,51	11,62	11,14	10,66	9,752	8,929
380	13,58	13,10	12,19	11,69	11,20	10,26	9,409
400	14,16	13,68	12,75	12,24	11,73	10,77	9,885
420	14,72	14,25	13,30	12,78	12,26	11,27	10,36
440	15,27	14,81	13,84	13,31	12,78	11,76	10,83
460	15,82	15,36	14,38	13,84	13,30	12,26	11,30
480	16,35	15,90	14,91	14,36	13,81	12,74	11,76
500	16,87	16,43	15,43	14,88	14,31	13,23	12,23
520	17,38	16,95	15,95	15,38	14,81	13,71	12,69
540	17,88	17,47	16,46	15,89	15,31	14,19	13,14
560	18,37	17,97	16,96	16,39	15,80	14,66	13,60
580	18,86	18,48	17,46	16,88	16,29	15,13	14,05
600	19,34	18,97	17,96	17,37	16,77	15,60	14,50

Таблица 6

Расчетные коэффициенты $\eta_{n-C_4H_{10}-C_2H_6}$, мкПа (см. формулы (1) – (3))

T, K	$x_{n-C_4H_{10}}$						
	0,0	0,2	0,4	0,5	0,6	0,8	1,0
280	8,796	8,477	8,111	7,921	7,730	7,350	6,981
300	9,386	9,052	8,667	8,466	8,264	7,863	7,473
320	9,967	9,618	9,215	9,005	8,793	8,371	7,961
340	10,54	10,18	9,757	9,538	9,316	8,876	8,45
360	11,10	10,73	10,29	10,06	9,834	9,376	8,929

T, К	$x_{n-C_4H_{10}}$						
	0,0	0,2	0,4	0,5	0,6	0,8	1,0
380	11,65	11,27	10,82	10,58	10,35	9,872	9,409
400	12,19	11,80	11,34	11,10	10,85	10,36	9,885
420	12,72	12,32	11,85	11,61	11,36	10,85	10,36
440	13,25	12,84	12,36	12,11	11,85	11,34	10,83
460	13,76	13,35	12,86	12,61	12,34	11,82	11,30
480	14,26	13,85	13,36	13,10	12,83	12,29	11,76
500	14,76	14,35	13,85	13,58	13,31	12,77	12,23
520	15,25	14,83	14,33	14,06	13,79	13,23	12,69
540	15,73	15,31	14,81	14,54	14,26	13,70	13,14
560	16,20	15,79	15,28	15,01	14,73	14,16	13,60
580	16,66	16,25	15,75	15,47	15,19	14,62	14,05
600	17,12	16,71	16,21	15,93	15,65	15,08	14,50

Таблица 7

Расчетные коэффициенты $\eta_{n-C_4H_{10}-C_3H_8}$, мкПа·с (см. формулы (1) – (3))

T, К	$x_{n-C_4H_{10}}$						
	0,0	0,2	0,4	0,5	0,6	0,8	1,0
280	7,672	7,540	7,403	7,334	7,264	7,123	6,981
300	8,204	8,064	7,920	7,846	7,772	7,623	7,473
320	8,733	8,585	8,433	8,355	8,277	8,120	7,961
340	9,258	9,103	8,943	8,861	8,779	8,613	8,447
360	9,779	9,617	9,449	9,364	9,278	9,104	8,929
380	10,30	10,13	9,952	9,862	9,772	9,591	9,409
400	10,81	10,63	10,45	10,36	10,26	10,07	9,885
420	11,31	11,13	10,94	10,85	10,75	10,56	10,36
440	11,81	11,63	11,43	11,33	11,23	11,03	10,83
460	12,31	12,12	11,92	11,82	11,71	11,51	11,30
480	12,79	12,60	12,40	12,29	12,19	11,98	11,76
500	13,27	13,08	12,87	12,76	12,66	12,44	12,23
520	13,75	13,55	13,34	13,23	13,13	12,91	12,69
540	14,21	14,01	13,80	13,70	13,59	13,37	13,14
560	14,67	14,47	14,26	14,15	14,05	13,82	13,60
580	15,12	14,93	14,72	14,61	14,50	14,28	14,05
600	15,57	15,37	15,16	15,06	14,95	14,73	14,50

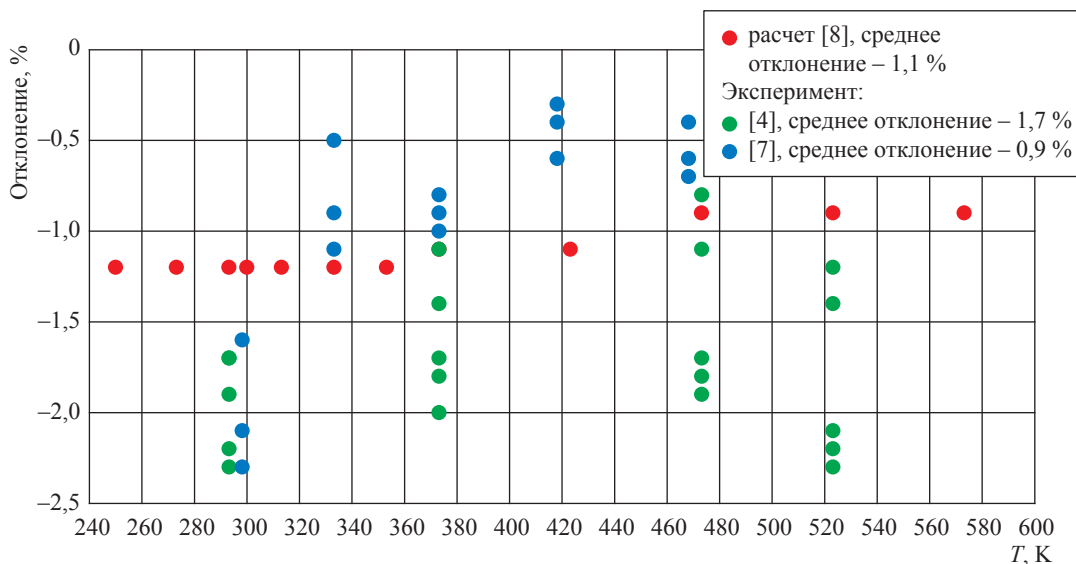


Рис. 1. Отклонения результатов расчета коэффициента $\eta_{C_2H_6-CH_4}$ по формулам (1) – (3) от соответствующих экспериментальных и расчетных данных других исследователей

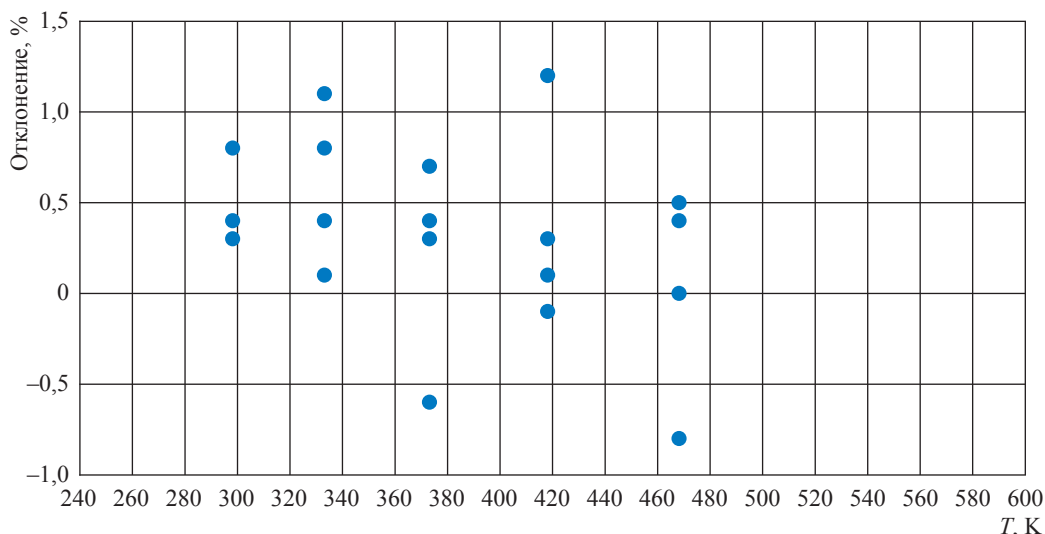


Рис. 2. Отклонения результатов расчета коэффициента $\eta_{C_3H_8-n-C_4H_{10}}$ по формулам (1) – (3) от соответствующих экспериментальных данных Ё. Абе и др. [7] (среднее отклонение – 0,5 %)

приведенных температурах T_{12}^* взяты ранее опубликованные табличные данные [1] для потенциала Леннарда – Джонса.

Для систем $C_2H_6-CH_4$ и $n-C_4H_{10}-C_3H_8$ авторы рассчитали отклонение своих данных от экспериментальных и расчетных

коэффициентов вязкости, полученных другими авторами (рис. 1, 2). В среднем согласие наблюдается в пределах погрешности 2 %.

Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ (грант № 18-08-00309).

Список литературы

1. Гиршфельдер Дж. Молекулярная теория газов и жидкостей / Дж. Гиршфельдер, Ч. Кертис, Р. Берд. – М.: Издательство иностранной литературы, 1961. – 929 с.
2. Ферцигер Дж. Математическая теория процессов переноса в газах / Дж. Ферцигер, Г. Капер. – М.: Мир, 1976. – 554 с.
3. Голубев И.Ф. Вязкость газовых смесей / И.Ф. Голубев, Н.Е. Гнездилов. – М.: Издательство стандартов, 1971. – 327 с.
4. Trautz M. Die Reibung, Wärmeleitung und Diffusion in Gasesungen. XVI. Die Reibung von H_2 , CH_4 , C_2H_6 , C_3H_8 und ihren binaren Gemischen / M. Trautz, K.G. Sorg // Ann. Phys. – 1931. – Т. 10. – № 1. – С. 81–96.
5. Bzowski J. Equilibrium and transport properties of gas mixtures at low density: eleven polyatomic gases and five noble gases / J. Bzowski, J. Kestin, E.A. Mason et al. // J. Phys. Chem. Ref. Data. – 1990. – Т. 19. – № 5. – С. 1179–1232.
6. Kestin J. Transport properties of nine binary and two ternary mixtures of gases at low density / J. Kestin, S.T. Ro // Ber. Bunsen-Ges. Phys. Chem. – 1976. – Т. 80. – № 7. – С. 619–624.
7. Abe Y. The viscosity and diffusion coefficients of the mixtures of four light hydrocarbon gases / Y. Abe, J. Kestin, H.E. Khalifa et al. // Physica A. – 1978. – Т. 93A. – С. 155–170. – [https://doi.org/10.1016/0378-4371\(78\)90215-7](https://doi.org/10.1016/0378-4371(78)90215-7).
8. Moghadasi J. Transport coefficients of natural gases / J. Moghadasi, M.M. Papari, F. Yousefi et al. // J. Chem. Eng. Jpn. – 2007. – Т. 40. – № 9. – С. 698–710.
9. Mohammad-Aghaie D. Determination of transport properties of dilute binary mixtures containing carbon dioxide through isotropic pair potential energies / D. Mohammad-Aghaie, M.M. Papari, A.R. Ebrahimi // Chinese Journal of Chemical Engineering. – 2014. – Т. 22. – № 3. – С. 274–286.
10. Фокин Л.Р. Транспортные свойства смеси разреженных газов CH_4-N_2 / Л.Р. Фокин, А.Н. Калашников // Инженерно-физический журнал. – 2016. – Т. 89. – № 1. – С. 240–249.
11. Фокин Л.Р. Транспортные свойства разреженных газов. Система водород-метан / Л.Р. Фокин, А.Н. Калашников, А.Ф. Золотухина // Инженерно-физический журнал. – 2011. – Т. 84. – № 6. – С. 1306–1317.

12. Hellmann R. Cross second virial coefficients and dilute gas transport properties of the (CH₄ + CO₂), (CH₄ + H₂S), and (H₂S + CO₂) systems from accurate intermolecular potential energy surfaces / R. Hellmann, E. Bich, V. Vesovic // *J. Chem. Thermodyn.* – 2016. – Т. 102. – С. 429–441.
13. Hellmann R. Cross second virial coefficients and dilute gas transport properties of the (CH₄ + C₃H₈) and (CO₂ + C₃H₈) systems from accurate intermolecular potential energy surfaces / R. Hellmann // *J. Chem. Eng. Data.* – 2018. – Т. 63. – № 1. – С. 246–257.
14. Bogatyrev A.F. Calculation of viscosity and diffusion coefficients in binary mixtures of dilute gases / A.F. Bogatyrev, O.A. Makeenkova, V.R. Belalov et al. // *Advanced Studies in Theoretical Physics.* – 2017. – Т. 11. – № 6. – С. 283–296.
15. Макеенкова О.А. К расчету вязкости бинарных смесей разреженных газов / О.А. Макеенкова, А.Ф. Богатырев // Сб. трудов VII Международной научно-технической конференции «Энергетика, информатика, инновации – 2017». – Смоленск: Универсум, 2017. – Т. 1. – С. 122–125.
16. Богатырев А.Ф. Расчет коэффициентов вязкости и диффузии разреженных бинарных смесей двуокиси углерода с этаном и пропаном / А.Ф. Богатырев, М.А. Кучеренко, О.А. Макеенкова // *Международный научно-исследовательский журнал.* – 2018. – № 7 (73). – С. 7–12.
17. Bogatyrev A.F. Transport properties of natural gas mixtures related to viscosity / A.F. Bogatyrev, O.A. Makeenkova, M.A. Kucherenko // *JP Journal of Heat and Mass Transfer.* – 2018. – Т. 15. – № 3. – С. 777–790.
18. Laesecke A. Correction to: Ab initio calculated results require new formulations for properties in the limit of zero density: The viscosity of methane (CH₄) / A. Laesecke, C.D. Muzny // *Int. J. Thermophys.* – 2018. – Т. 39. – Вып. 4. – Статья № 52.
19. Friend D.G. Thermophysical properties of ethane / D.G. Friend, H. Ingham, J.F. Ely // *J. Phys. Chem. Ref. Data.* – 1991. – Т. 20. – № 2. – С. 275–347.
20. Vogel E. Reference correlation of the viscosity of propane / E. Vogel, C. Kuechenmeister, E. Bich et al. // *J. Phys. Chem. Ref. Data.* – 1998. – Т. 27. – № 5. – С. 947–970.
21. Vogel E. Viscosity correlation for n-butane in the fluid region / E. Vogel, C. Kuechenmeister, E. Bich // *High Temperatures-High Pressures.* – 1999. – Т. 31. – С. 173–186.
22. Богатырев А.Ф. Коэффициенты вязкости, диффузии и термодиффузионная постоянная в смеси разреженных газов H₂-N₂ / А.Ф. Богатырев, В.Р. Белалов, М.А. Кучеренко и др. // Сб. трудов VII Международной научно-технической конференции «Энергетика, информатика, инновации – 2017». – Смоленск: Универсум, 2017. – Т. 1. – С. 48–52.
23. Vogel E. High-precision viscosity measurements on methane / E. Vogel, J. Wilhelm, C. Kuechenmeister et al. // *High Temp. – High Pressures.* – 2000. – Т. 32. – № 1. – С. 73–81.
24. Boushehri A. Equilibrium and transport properties of eleven polyatomic gases at low density / A. Boushehri, J. Bzowski, J. Kestin et al. // *J. Phys. Chem. Ref. Data.* – 1987. – Т. 16. – № 3. – С. 445–466.

Calculating viscosity of dilute gas mixtures containing methane, ethane, propane and n-butane

A.F. Bogatyrev^{1*}, M.A. Kucherenko¹, O.A. Makeenkova²

¹ Smolensk Branch of National Research University “Moscow Power Engineering Institute”, Bld. 1, Energeticheskiy proyezd, Smolensk, 214013, Russian Federation

² Smolensk State University, Bld. 4, Przhhevskogo street, Smolensk, 214000, Russian Federation

* E-mail: Tfs209@yandex.ru

Abstract. Within the gas kinetic theory of Chapman and Enskog a method for finding intermolecular potential parameters for unlike interactions was suggested. These parameters were used for calculation of the gas mixtures' viscosities. For viscosity of binary and ternary gas mixtures the proposed method gave an error of 0,5...3%.

In this paper, the calculated viscosities of 5 gas systems, namely: CH₄-C₂H₆, CH₄-C₃H₈, CH₄-n-C₄H₁₀, C₂H₆-n-C₄H₁₀, C₃H₈-n-C₄H₁₀, are presented for different mixture compositions in the temperature range of 240...600 K. For some mixtures, authors' results were compared with experimental and other calculated data. All of them agree rather well.

Keywords: dilute gas mixtures, viscosity, calculation method, hydrocarbons.

References

1. HIRSCHFELDER, J.O., Ch.F. CURTISS, R.B. BIRD. *Molecular theory of gases and liquids* [Molekulyarnaya teoriya gazov i zhidkostey]. Translated from English. Moscow: Izdatelstvo Inostrannoy Literatury, 1961. (Russ.).
2. FERZIGER, J.H., H.G. KAPER. *Mathematical theory of transport processes in gases* [Matematicheskaya teoriya protsessov perenosa v gazakh]. Translated from English. Moscow: Mir, 1976. (Russ.).
3. GOLUBEV, I.F., N.Ye. GNEZDILOV. *Viscosity of gas mixtures* [Vyazkost gazovykh smesey]. Moscow: Izdatelstvo Standartov, 1971. (Russ.).
4. TRAUTZ, M., K.G. SORG. Viscosity, thermal conductivity, and diffusion in gas mixtures: XVI. The viscosity of H_2 , CH_4 , C_2H_6 , C_3H_8 , and their binary mixtures [Die Reibung, Wärmeleitung und Diffusion in Gasmessungen. XVI. Die Reibung von H_2 , CH_4 , C_2H_6 , C_3H_8 und ihren binaren Gemischen]. *Ann. Phys.* 1931, vol. 10, no. 1, pp. 81–96. ISSN 0003-4916. (German).
5. BZOWSKI, J., J. KESTIN, E.A. MASON et al. Equilibrium and transport properties of gas mixtures at low density: eleven polyatomic gases and five noble gases. *J. Phys. Chem. Ref. Data.* 1990, vol. 19, no. 5, pp. 1179–1232. ISSN 0047-2689.
6. KESTIN, J., S.T. RO. Transport properties of nine binary and two ternary mixtures of gases at low density. *Ber. Bunsen-Ges. Phys. Chem.* 1976, vol. 80, no. 7, pp. 619–624. ISSN 0005-9021.
7. ABE, Y., J. KESTIN, H.E. KHALIFA et al. The viscosity and diffusion coefficients of the mixtures of four light hydrocarbon gases. *Physica A.* 1978, vol. 93A, pp. 155–170. ISSN 0378-4371. Available from: [https://doi.org/10.1016/0378-4371\(78\)90215-7](https://doi.org/10.1016/0378-4371(78)90215-7).
8. MOGHADASI, J., M.M. PAPARI, F. YOUSEFI et al. Transport coefficients of natural gases. *J. Chem. Eng. Jpn.* 2007, vol. 40, no. 9, pp. 698–710. ISSN 0021-9592.
9. MOHAMMAD-AGHAIE, D., M.M. PAPARI, A.R. EBRAHIMI. Determination of transport properties of dilute binary mixtures containing carbon dioxide through isotropic pair potential energies. *Chinese Journal of Chemical Engineering.* 2014, vol. 22, no. 3, pp. 274–286. ISSN 1004-9541.
10. FOKIN, L.R., A.N. KALASHNIKOV. Transport properties of a mixture of the dilute gases CH_4 – N_2 [Transportnyye svoystva smesi razrezhennykh gazov CH_4 – N_2]. *Inzhenerno-Fizicheskiy Zhurnal.* 2016, vol. 89, no. 1, pp. 240–249. ISSN 0021-0285. (Russ.).
11. FOKIN, L.R., A.N. KALASHNIKOV, A.F. ZOLOTUKHINA. Transport properties of dilute gases. A hydrogen-methane system [Transportnyye svoystva razrezhennykh gazov. Sistema vodorod-metan]. *Inzhenerno-Fizicheskiy Zhurnal.* 2011, vol. 84, no. 6, pp. 1306–1317. ISSN 0021-0285. (Russ.).
12. HELLMANN, R., E. BICH, V. VESOVIC. Cross second virial coefficients and dilute gas transport properties of the $(CH_4 + CO_2)$, $(CH_4 + H_2S)$, and $(H_2S + CO_2)$ systems from accurate intermolecular potential energy surfaces. *J. Chem. Thermodyn.* 2016, vol. 102, pp. 429–441. ISSN 0021-9614.
13. HELLMANN, R. Cross second virial coefficients and dilute gas transport properties of the $(CH_4 + C_3H_8)$ and $(CO_2 + C_3H_8)$ systems from accurate intermolecular potential energy surfaces. *J. Chem. Eng. Data.* 2018, vol. 63, no. 1, pp. 246–257. ISSN 0021-9568.
14. BOGATYREV, A.F., O.A. MAKEENKOVA, V.R. BELALOV et al. Calculation of viscosity and diffusion coefficients in binary mixtures of dilute gases. *Advanced Studies in Theoretical Physics.* 2017, vol. 11, no. 6, pp. 283–296. ISSN 1313-1311.
15. MAKEENKOVA, O.A., A.F. BOGATYREV. To calculation of viscosity for binary mixtures of dilute gases [K raschetu vyazkosti binarnykh smesey razrezhennykh gazov]. In: *Collected papers of the VII International science-technical conference "Power supplies, informatics, innovations – 2017"*. Smolensk: Universum, 2017, vol. 1, pp. 122–125. (Russ.).
16. BOGATYREV, A.F., M.A. KUCHERENKO, O.A. MAKEENKOVA. Calculation of viscosity and diffusion factors for dilute binary mixtures of the carbon dioxide with the ethane and propane [Raschet koeffitsientov vyazkosti i diffuzii razrezhennykh binarnykh smesey dvoukisi ugleroda s etanom i propanom]. *Mezhdunarodnyy Nauchno-Issledovatel'skiy Zhurnal.* 2018, no. 7(73), pp. 7–12. ISSN 2303-9868 (Russ.).
17. BOGATYREV, A.F., O.A. MAKEENKOVA, M.A. KUCHERENKO. Transport properties of natural gas mixtures related to viscosity. *JP Journal of Heat and Mass Transfer.* 2018, vol. 15, no. 3, pp. 777–790. ISSN 0973-5763.
18. LAESECKE, A., C.D. MUZNY. Correction to: Ab initio calculated results require new formulations for properties in the limit of zero density: The viscosity of methane (CH_4). *Int. J. Thermophys.* 2018, vol. 39, is. 4, article no. 52. ISSN 0195-928X.
19. FRIEND, D.G., H. INGHAM, J.F. ELY. Thermophysical properties of ethane. *J. Phys. Chem. Ref. Data.* 1991, vol. 20, no. 2, vol. 275–347. ISSN 0047-2689.
20. VOGEL, E., C. KUECHENMEISTER, E. BICH et al. Reference correlation of the viscosity of propane. *J. Phys. Chem. Ref. Data.* 1998, vol. 27, no. 5, pp. 947–970. ISSN 0047-2689.
21. VOGEL, E., C. KUECHENMEISTER, E. BICH. Viscosity correlation for n-butane in the fluid region. *High Temperatures-High Pressures.* 1999, vol. 31, pp. 173–186. ISSN 0018-1544.
22. BOGATYREV, A.F., V.R. BELALOV, M.A. KUCHERENKO et al. Factors of viscosity and diffusion, a thermodynamic constant for a mixture of dilute gases H_2 – N_2 [Koeffitsiyenty vyazkosti, diffuzii i termodiffuzionnaya postoyannaya v smesi razrezhennykh gazov H_2 – N_2]. In: *Collected papers of the VII International science-technical conference "Power supplies, informatics, innovations – 2017"*. Smolensk: Universum, 2017, vol. 1, pp. 48–52. (Russ.).
23. VOGEL, E., J. WILHELM, C. KUECHENMEISTER et al. High-precision viscosity measurements on methane. *High Temp. – High Pressures.* 2000, vol. 32, no. 1, pp. 73–81. ISSN 0018-1544.
24. BOUSHEHRI, A., J. BZOWSKI, J. KESTIN et al. Equilibrium and transport properties of eleven polyatomic gases at low density. *J. Phys. Chem. Ref. Data.* 1987, vol. 16, no. 3, pp. 445–466. ISSN 0047-2689.