

УДК 533.16

## СПОСОБ РАСЧЕТА ДИНАМИЧЕСКОЙ ВЯЗКОСТИ ГАЗОВ В ШИРОКОМ ДИАПАЗОНЕ ДАВЛЕНИЙ

Глумов Д.Н.<sup>1</sup>, Стрекалов А.В.<sup>2</sup>

*Тюменский государственный нефтегазовый университет*

*кафедра РЭНМ, г. Тюмень*

*e-mail: <sup>1</sup>glumov@mail.ru, <sup>2</sup>darlex77@mail.ru*

**Аннотация.** В статье рассмотрены основные методики определения коэффициентов вязкости газовых смесей. Авторами предложен ряд модификаций в уже сложившиеся методики определения вязкости для упрощения расчетов и повышения качества получаемых результатов. Проведено сопоставление полученных результатов с экспериментальными данными.

**Ключевые слова:** определение вязкости газовых смесей, динамическая вязкость, кинематическая вязкость, уравнение Чэпмена-Энскога, потенциал Леннарда-Джонсона, закон Брокау, метод Голубева

В настоящее время инновационные технологии и высокий потенциал современной вычислительной техники позволяют решать сложные математические задачи. Прикладное применение вычислительной мощности ЭВМ требует хорошо проработанного и экспериментально выверенного алгоритма расчета поставленной задачи. Идея практического применения современных технологий для определения вязкости природных газов позволит оперативно и наиболее точно рассчитать данный параметр.

Вязкость – это показатель сил внутреннего трения среды, которое противодействует любому динамическому изменению в движении флюида.

По определению вязкость представляет собой силу сдвига на единицу площади, деленную на градиент скорости, т.е., другими словами, характеризует силу, необходимую для перемещения двух слоев флюида с поверхностью  $S$ , находящихся на расстоянии  $dz$  друг от друга и движущихся относительно друг друга со скоростью  $d\omega$ . Поэтому размерность вязкости:

$$\frac{\text{сила} \cdot \text{время}}{(\text{длина})^2} \text{ или } \frac{\text{масса}}{\text{длина} \cdot \text{время}}.$$

Динамический коэффициент вязкости, отнесенный к плотности вещества при тех же условиях, называется кинематическим коэффициентом вязкости и измеряется в

$$\frac{(\text{длина})^2}{\text{время}}.$$

Теория вязкости газов основывается на кинетической теории газов, которая, в отличие от теории вязкости жидкости, изучена и разработана достаточно подробно [1, 2, 3]. Однако, при повышенных давлениях методы, основанные на теории вязкости, не дают удовлетворительной точности значений коэффициента динамической вязкости. Поэтому в инженерных расчетах эти методы практически не используются. Широкое распространение в математических расчетах получили графические и полуэмпирические методы, предполагающие незначительное влияние давления на значения коэффициентов вязкости. В большинстве случаев при выполнении гидравлических расчетов влиянием давления на величину значения динамической вязкости пренебрегают.

Для нахождения вязкости углеводородных газов, а также природных газовых смесей применяют принцип соответственных состояний. Теоретической основой данного принципа является то, что зависимости свойств различных веществ от безразмерных величин, называемых «приведенными параметрами», одинаковы. Отсюда следует, что когда приведенные параметры сравниваемых веществ равны, то и их свойства тоже равны. При определении приведенных параметров соответствующие размерные комплексы данного вещества (такие как, давление, температура и т.д.) относят к их значению в каком-либо характерном соответственном состоянии этого вещества (состоянии сравнения).

Ван-дер-Ваальсом было показано, что соответственное состояние веществ достигается в их критическом состоянии. Это явилось причиной того, что приведенные параметры определяют через критические постоянные вещества [1].

Для построения математической зависимости коэффициентов динамической вязкости от приведенных параметров вещества была использована двухпараметрическая форма принципа соответственных состояний. Теоретическое обоснование данной формы принципа соответственных состояний, называемой «классическая форма», было дано Питцером и де Буром [3].

Так как определение вязкости чистых веществ в критической точке осуществляется с большой погрешностью, состояние равновесия при построении зависимости было приведено к атмосферному давлению и текущей температуре:

$$\mu_{\text{пр}} = \frac{\mu}{\mu_{\text{ат}}} \cdot \quad (3)$$

Для решения поставленной задачи возникла необходимость в определении вязкости при атмосферном давлении. Существующие методики расчета вязкости газа, при давлениях близких к атмосферным, в большинстве случаев, базируются или на теории Чэпмена-Энскога, или на принципе соответственных состояний.

Уравнение Чэпмена-Энскога для вязкости имеет вид:

$$\mu_{am} = 2,6693 \frac{\sqrt{MT}}{\sigma^2 \cdot \Omega_v}, \quad (4)$$

где  $M$  – молекулярная масса;  $T$  – температура, К;  $\sigma$  – параметр потенциала Леннарда-Джонсона, Å;  $\Omega_v$  – интеграл столкновений.

Чтобы использовать его для расчета вязкостей, необходимо найти параметр потенциала Леннарда-Джонсона и интеграл столкновений.

**Неполярные газы.** Параметр потенциала Леннарда-Джонсона определяется из уравнения:

$$\sigma = \frac{1,09795 - 0,04075 \omega}{\left(\frac{P_{kr}}{T_{kr}}\right)^{1/3}}, \quad (5)$$

где  $\omega$  – фактор ацентричности;  $P_{kr}$  – критическое давление, МПа;  $T_{kr}$  – критическая температура, К;

Интеграл столкновений для неполярных газов определяется по выражению Нойфельда:

$$\Omega_v = \left(\frac{1,16145}{T^{*0,14874}}\right) + \frac{0,52487}{e^{0,7732T^*}} + \frac{2,16178}{e^{2,43787T^*}}. \quad (6)$$

Для нахождения  $\Omega_v$  сначала вычисляют величину:

$$T^* = \frac{kT}{\varepsilon}, \quad (7)$$

где соотношение  $\frac{\varepsilon}{k}$  определяется по выражению Ти, Готоха и Стьюарта:

$$\frac{\varepsilon}{k} = T_{kr} (0,7915 + 0,1693 \omega), \quad (8)$$

где  $\omega$  – фактор ацентричности;  $\varepsilon$  – параметр потенциала Леннарда-Джонсона, эрг;  $k = 1,3805 \cdot 10^{-16}$ , эрг/К – постоянная Больцмана.

Графическое представление зависимости интеграла столкновений  $\Omega_v$  от величины  $T^*$  отображено на рис. 1.

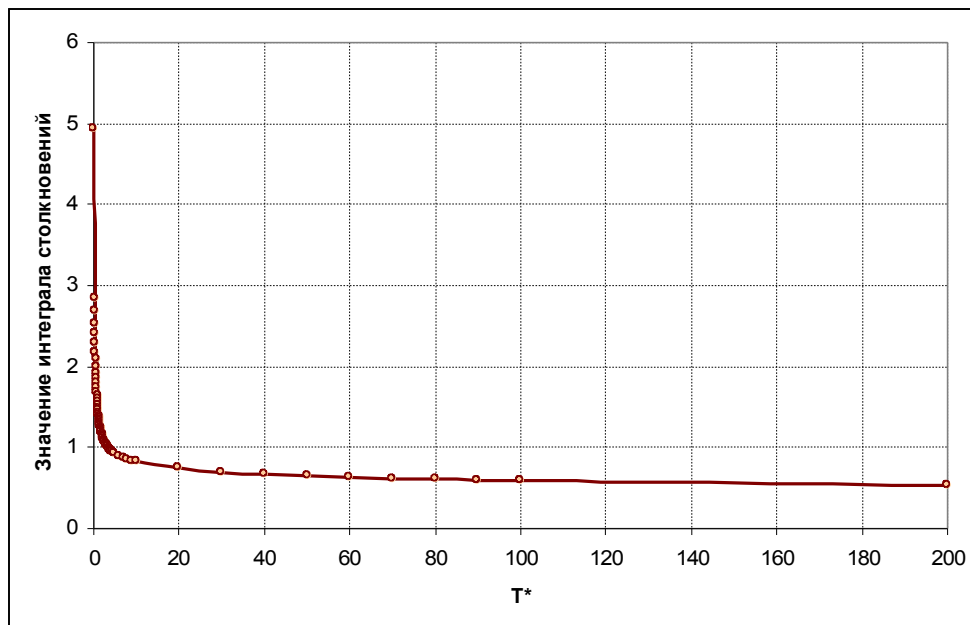


Рис. 1. Зависимость интеграла столкновений неполярных газовых систем от величины  $T^*$

Методика определения значения вязкости для неполярных газов иллюстрирована примером ниже.

**Пример 1.** Рассчитать вязкость газообразного метана при температуре 50 °С, применив теорию Чэпмена-Энскога и потенциал Леннарда-Джонса. Сравнить полученное значение с экспериментальным результатом 11,82 мкПа·с [4].

**Решение.** Значения  $\frac{\varepsilon}{k}$  и  $\sigma$  определяются по выражениям (8) и (5) соответственно. Фактор ацентричности для метана примем равным 0,008.

$$\frac{\varepsilon}{k} = 190,6(0,7915 + 0,1693 \cdot 0,008) = 151,1 \text{ К};$$

$$\sigma = \frac{1,09795 - 0,04075 \cdot 0,008}{\left(\frac{4,6}{190,6}\right)^{1/3}} = 3,8 \text{ \AA}.$$

При температуре 50 °С:

$$T^* = \frac{(50 + 273,15)}{151,1} = 2,14.$$

Тогда по уравнению (6) интеграл столкновений равен

$$\Omega_v = \left(\frac{1,16145}{2,14^{0,14874}}\right) + \frac{0,52487}{e^{0,7732 \cdot 2,14}} + \frac{2,16178}{e^{2,43787 \cdot 2,14}} = 1,149.$$

По уравнению 4 коэффициент динамической вязкой метана при температуре 50 °С равен

$$\mu_{ам} = 2,6693 \frac{\sqrt{MT}}{\sigma^2 \cdot \Omega_v} = 2,6693 \frac{\sqrt{16,043 \cdot (50 + 273,15)}}{3,8^2 \cdot 1,149} = 11,58 \text{ мкПа}\cdot\text{с} .$$

$$\text{Погрешность} = \frac{11,58 - 11,82}{11,82} \cdot 100 = -2,03 \% .$$

При использовании расчетных значений  $\frac{\varepsilon}{k}$  и  $\sigma$  погрешность расчетов колеблется в диапазоне 1-3 %, при подстановке экспериментальных значений  $\frac{\varepsilon}{k}$  и  $\sigma$  погрешность уменьшается до 1 %.

Экспериментальные значения  $\frac{\varepsilon}{k}$  и  $\sigma$  для метана соответственно равны 144 и 3,796, используя данные значения в алгоритме расчета, получим значение вязкости равное 11,79 мкПа·с, погрешность при этом составит -0,25 %.

График зависимости вязкости метана от температуры в области низких давлений, рассчитанной с применением экспериментальных значений параметров потенциала Леннарда-Джонса, представлен на рис. 2

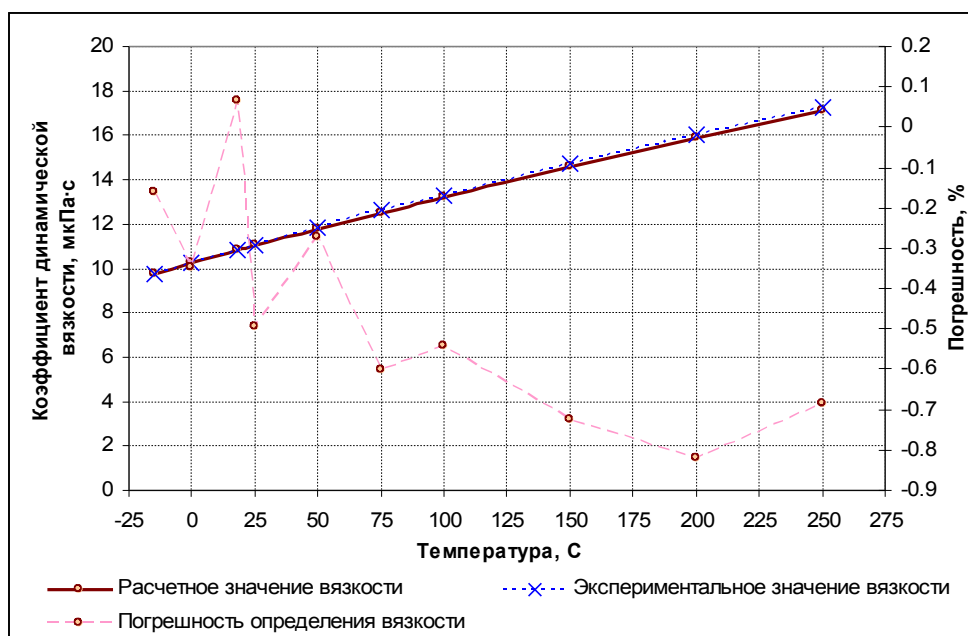


Рис. 2. График зависимости коэффициента динамической вязкости метана от температуры в области низких давлений

**Полярные газы.** Для полярных газов значение  $\Omega_v$  точно аппроксимируется по выражению Брокау [5]:

$$\Omega_v(\text{Штокмайер}) = \Omega_v(\text{Леннард-Джонс}) + \frac{0,2\delta^2}{T^*}, \quad (9)$$

где  $\delta$  – параметр потенциала Штокмайера, безразмерная величина, для уменьшения погрешности расчетов рекомендовано подставлять экспериментальное значение;  $\Omega_v(\text{Леннард-Джонс})$  – интеграл столкновений Леннарда-Джонса, определяется по выражению (6).

Графическое представление зависимости интеграла столкновений  $\Omega_v(\text{Штокмайер})$  от величины  $T^*$  и  $\delta$  отображено на рис. 3.

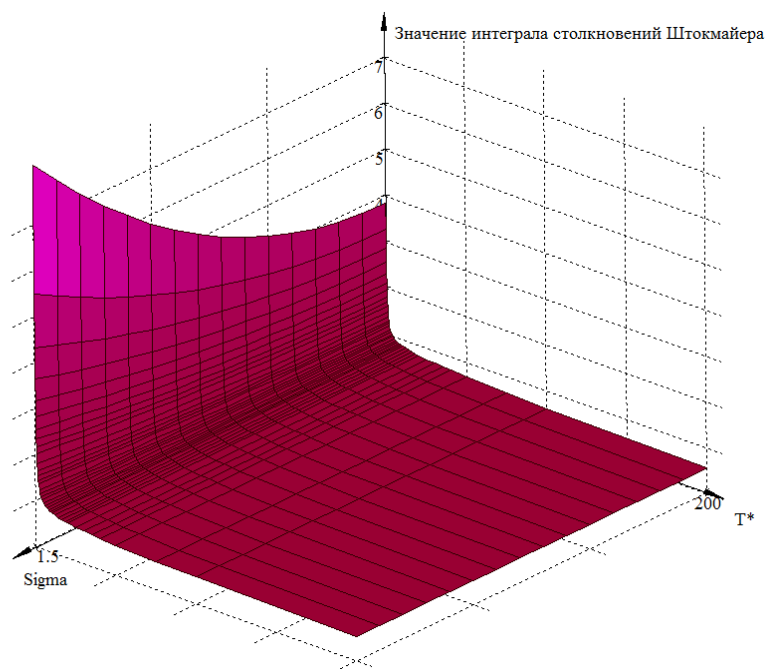


Рис. 3. Зависимость интеграла столкновений полярных газовых систем от величины  $T^*$  и  $\delta$

Методика определения значения вязкости для полярных газов иллюстрирована примером 2.

**Пример 2.** Рассчитать вязкость газообразного аммиака при температуре 100 °С, применив теорию Чэпмена-Энскога и потенциал Штокмайера. Сравнить полученное значение с экспериментальным результатом 12,87 мкПа·с [4].

**Решение.** Значения  $\frac{\varepsilon}{k}$ ,  $\sigma$ ,  $\delta$  определяются по результатам экспериментальных данных и соответственно равны 358, 3,15, 0,7.

При температуре 100 °С:

$$T^* = \frac{(100 + 273,15)}{358} = 1,042 .$$

Тогда по уравнению (9) интеграл столкновений равен

$$\Omega_v (\text{Штокмайер}) = \left( \frac{1,16145}{1,042^{0,14874}} \right) + \frac{0,52487}{e^{0,7732 \cdot 1,042}} + \frac{2,16178}{e^{2,43787 \cdot 1,042}} + \frac{0,2 \cdot 0,7^2}{1,042} = 1,653 .$$

По уравнению (4) коэффициент динамической вязкой аммиака при температуре 100°С равен

$$\mu_{am} = 2,6693 \frac{\sqrt{MT}}{\sigma^2 \cdot \Omega_v} = 2,6693 \frac{\sqrt{17,031 \cdot (100 + 273,15)}}{3,15^2 \cdot 1,653} = 12,97 \text{ мкПа} \cdot \text{с} .$$

$$\text{Погрешность} = \frac{12,97 - 12,87}{12,87} \cdot 100 = 0,78 \%$$

График зависимости вязкости аммиака от температуры в области низких давлений, рассчитанной с применением экспериментальных значений потенциала Леннарда-Джонса, представлен на рис. 4.

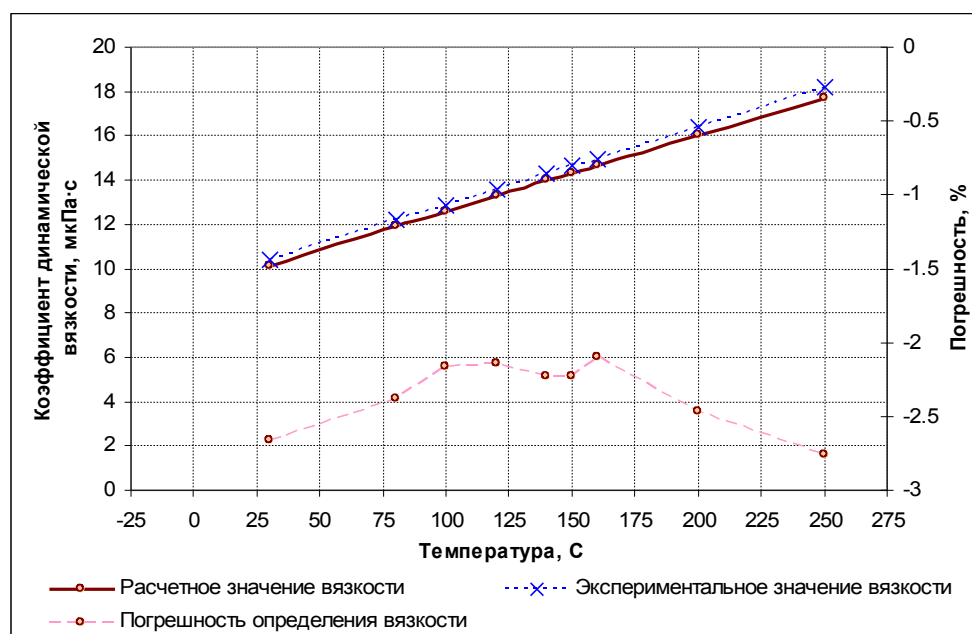


Рис. 4. График зависимости коэффициента динамической вязкости аммиака от температуры в области низких давлений

Как видно из рис. 4, средняя погрешность при определении вязкости аммиака составляет 2-3 %. Для достижения более точного результата необходимо скорректировать значение  $\sigma$ . При значении равном 3,117 вместо 3,15, отклонение расчетного значения коэффициента динамической вязкости от экспериментального лежит в диапазоне 1 %. Пересчитанные значения вязкости аммиака отображены на рис. 5.

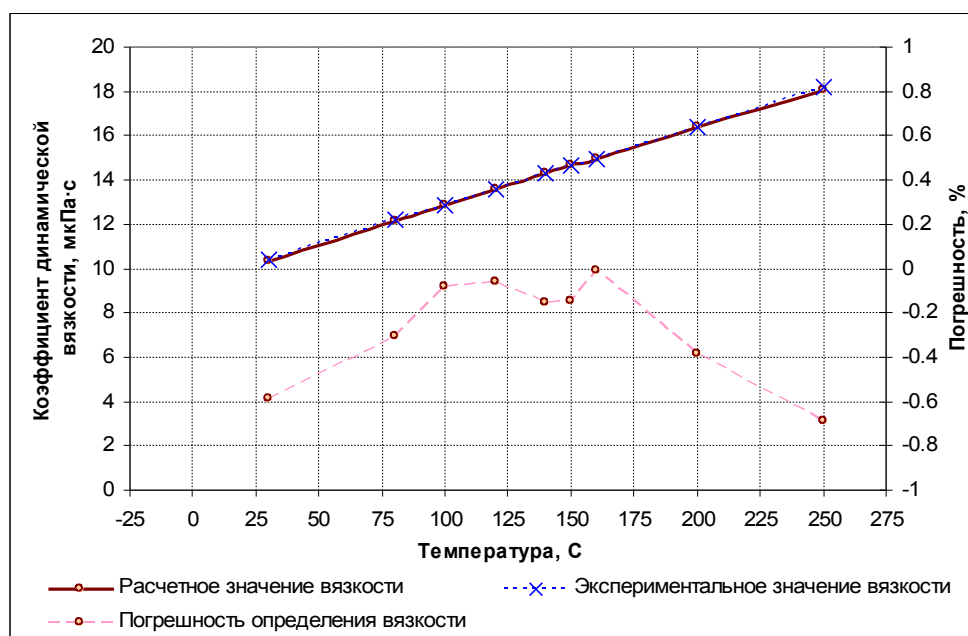


Рис. 5. График зависимости коэффициента динамической вязкости аммиака от температуры в области низких давлений при значении  $\sigma = 3,117$

Определение значения коэффициента динамической вязкости по теоретическому выражению Чэпмена-Энскога дает хорошие результаты, погрешность при этом составляет 1-3 %.

При расчете вязкости газов по принципу соответственных состояний необходимо иметь хорошо проработанную базу экспериментально определенных параметров и свойств газов. Помимо этого данные методы не универсальны, большинство из них можно применять только при расчете параметров неполярных газов, расчет параметров полярных систем сопровождается большой погрешностью. В целом можно отметить, что методы, основанные на принципе соответственных состояний, уступают методу, сформулированному на теории Чэпмена-

Энскога. Ниже рассмотрим пример расчетов вязкости по алгоритму, основанному на принципе соответственных состояний.

Метод Голубева [4], основанный на преобразовании Трауца:

$$\mu = \begin{cases} \mu_{kr}^* \cdot T_{pr}^{0,965} & \text{при } T_{pr} < 1 \\ \mu_{kr}^* \cdot T_{pr}^{0,71+0,29/T_{pr}} & \text{при } T_{pr} > 1 \end{cases} \quad (10)$$

Размерность искомой величины  $\mu$  – мкПа·с.

В выражении 10  $\mu_{kr}^*$  определяется по выражению

$$\mu_{kr}^* = \frac{1,61 \cdot M^{1/2} \cdot P_{kr}^{2/3}}{T_{kr}^{1/6}}, \quad (11)$$

где  $M$  – молекулярная масса;  $P_{kr}$  – критическое давление, МПа;  $T_{kr}$  – критическая температура, К.

**Пример 3.** Рассчитать вязкость газообразного метана при температуре 50 °С. Сравнить полученное значение с экспериментальным результатом 11,82 мкПа·с.

Определим критическое значение вязкости метана по выражению (11):

$$\mu_{kr}^* = \frac{1,61 \cdot 16,043^{1/2} \cdot 4,6^{2/3}}{190,6^{1/6}} = 7,44 \text{ мкПа} \cdot \text{с}.$$

Рассчитаем значение приведенной температуры:

$$T_{pr} = \frac{T}{T_{kr}} = \frac{(50+273,15)}{190,6} = 1,695.$$

Определим искомое значение коэффициента динамической вязкости:

$$\mu = \mu_{kr}^* \cdot T_{pr}^{0,71+0,29/T_{pr}} = 7,44 \cdot 1,695^{0,71+0,29/1,695} = 11,84 \text{ мкПа} \cdot \text{с}.$$

$$\text{Погрешность} = \frac{11,84 - 11,82}{11,82} \cdot 100 = 0,17 \text{ \%}.$$

График зависимости вязкости метана от температуры в области низких давлений, рассчитанной по методу Голубева, представлен на рис. 6.

Как видно из рис. 6, погрешность определения вязкости метана по методике Голубева колеблется в диапазоне от 1-2 %.

Для полярных компонентов погрешность расчетов возрастает.

График зависимости вязкости аммиака от температуры в области низких давлений, рассчитанной по методу Голубева, представлен на рис. 7.

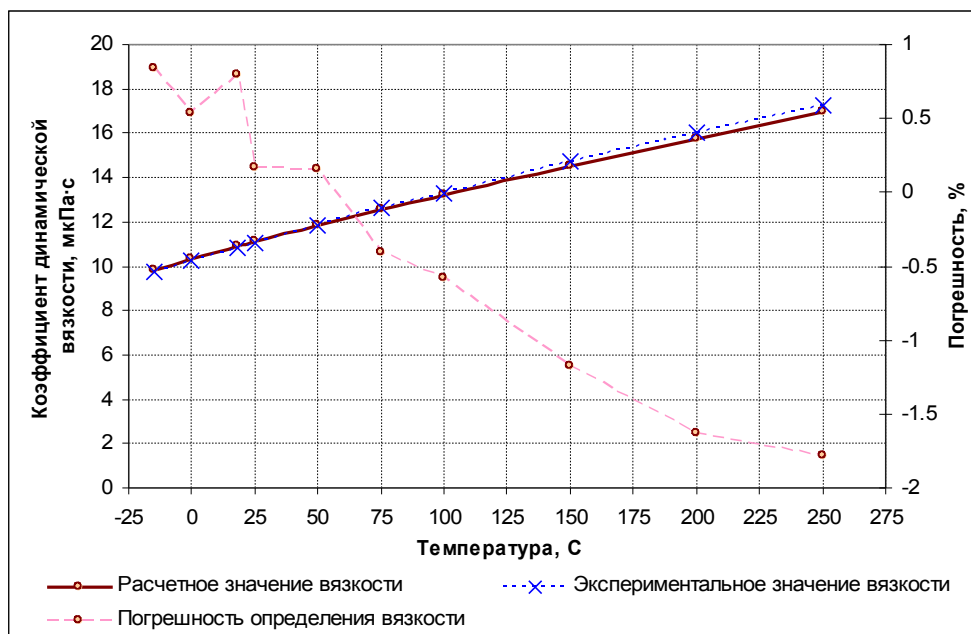


Рис. 6. График зависимости коэффициента динамической вязкости метана от температуры в области низких давлений

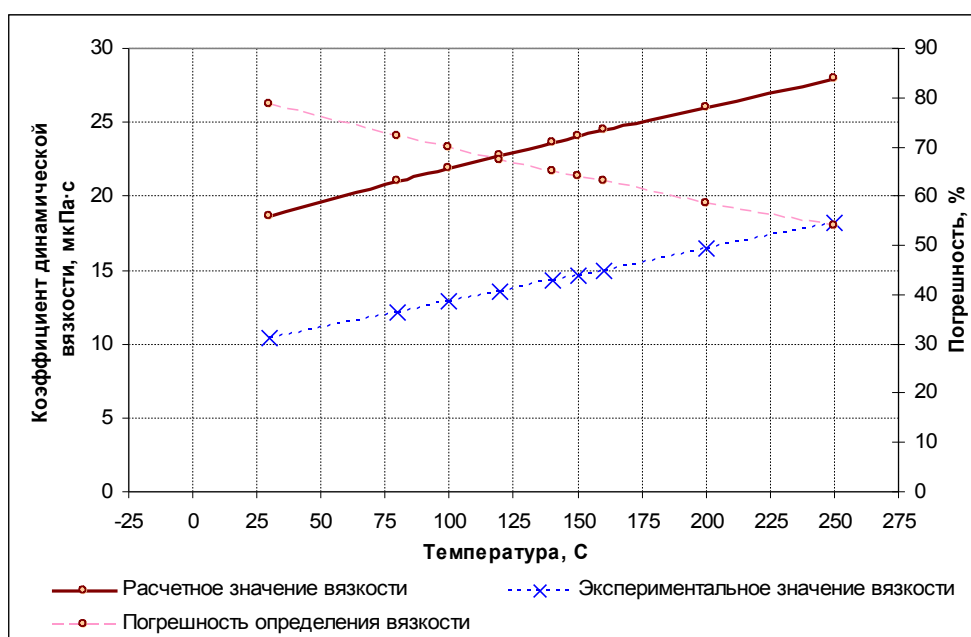


Рис. 7. График зависимости коэффициента динамической вязкости аммиака от температуры в области низких давлений

Как видно из рис. 7, погрешность определения вязкости аммиака по методике Голубева колеблется в диапазоне от 50-80 %.

Для определения вязкости многокомпонентной газовой смеси в области низких давлений используют выражение (12), основанное на теории Чэпмена-Энскога:

$$\mu_{am} = \frac{\sum_{i=1}^n y_i \cdot \mu_i}{\sum_{j=1}^n y_j \Phi_{ij}}, \quad (12)$$

где  $\Phi_{ij}$  определяется по выражению (13):

$$\Phi_{ij} = \frac{\left[ 1 + \left( \frac{\mu_i}{\mu_j} \right)^{1/2} \cdot \left( \frac{M_j}{M_i} \right)^{1/4} \right]^2}{\left[ 8 \left( 1 + \frac{M_i}{M_j} \right) \right]^{1/2}}, \quad (13)$$

где  $M$  – молекулярная масса компонента,  $\mu$  – вязкость компонента.

Наиболее применимым из вышеописанных методов расчета вязкости при атмосферном давлении является метод, основанный на теории Чэпмена-Энскога.

Определив значение вязкости при атмосферном давлении, построим математическую поверхность для определения значения вязкости при повышенных давлениях.

Построение поверхности осуществлялось путем математической аппроксимации зависимости функции  $\mu_{pr}(P_{пр}, T_{пр})$ . Значение  $\mu_{pr}$  находилось по выражению 3, путем подстановки расчетного значения вязкости при атмосферном давлении и экспериментального значения вязкости при повышенных давлениях. Этапы построения математической поверхности приведены ниже:

1. Определение зависимости  $\mu_{pr}(P_{пр})$  при постоянной  $T_{пр}$  осуществлялось путем аппроксимирования экспериментальных значений вязкости от приведенного давления в логарифмических координатах. Ниже на рисунке, иллюстрирован пример поэтапной аппроксимации.

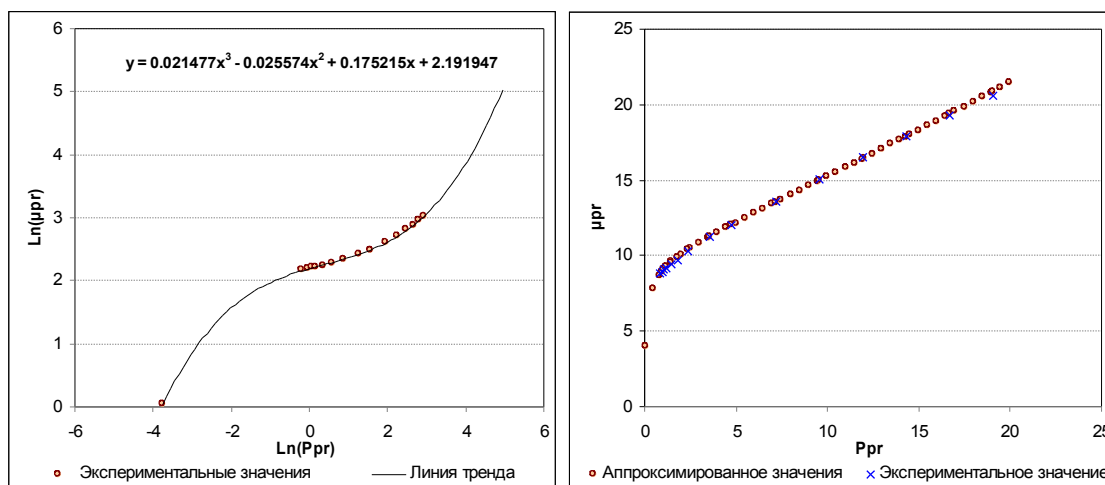


Рис. 8. График зависимости  $\mu_{pr}$  от  $P_{pr}$  при постоянной  $T_{pr} = 0,88$

2. Определение зависимости  $\mu_{pr}(T_{pr})$  при постоянном приведенном давлении осуществлялось способом аналогичным определению зависимости  $\mu_{pr}(P_{pr})$ .

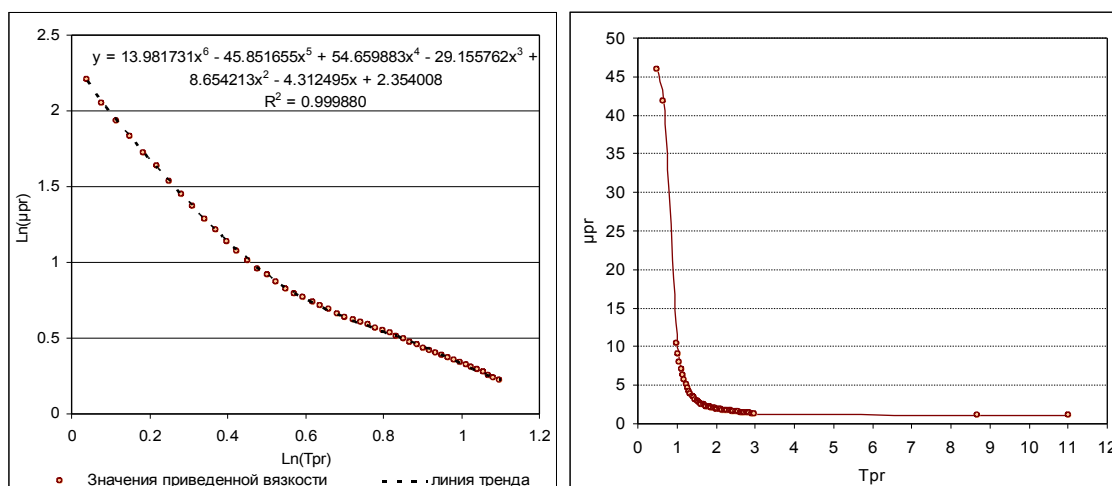


Рис. 9. График зависимости  $\mu_{pr}$  от  $T_{pr}$  при постоянной  $P_{pr} = 9$

В результате выполненной аппроксимации была построена математическая зависимость, которая приведена на рис. 10.

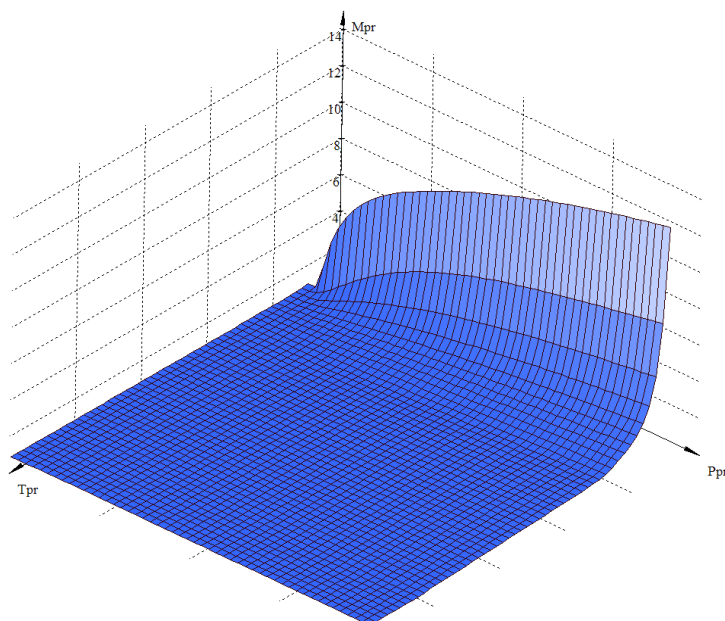


Рис. 10. Зависимость приведенной вязкости от приведенных давления и температуры

В целях практического применения данного алгоритма расчетов и оценки достоверности получаемых результатов предлагаемого метода рассчитаем значения вязкости газовой смеси Саратовского месторождения при различных давлениях и температуре и сопоставим полученные значения с экспериментальными данными.

Компонентный состав Саратовского месторождения: 1) Метан ( $\text{CH}_4$ ) – 91,5 %; 2) Этан ( $\text{C}_2\text{H}_6$ ) – 1,8 %; 3) Пропан ( $\text{C}_3\text{H}_8$ ) – 0,8 %; 4) Бутан ( $\text{C}_4\text{H}_{10}$ ) – 0,6 %; 5) Пентан ( $\text{C}_5\text{H}_{12}$ ) – 0,3 %; 6) Азот ( $\text{N}_2$ ) – 5 %. На рис. 11 представлена расчетная зависимость динамической вязкости газа Саратовского месторождения от давления и температуры.

Достоверность определения вязкости газа Саратовского месторождения по предложенной методике колеблется в области от 1 до 10 %. Сопоставление полученных результатов с экспериментальными значениями приведено в табл. 1.

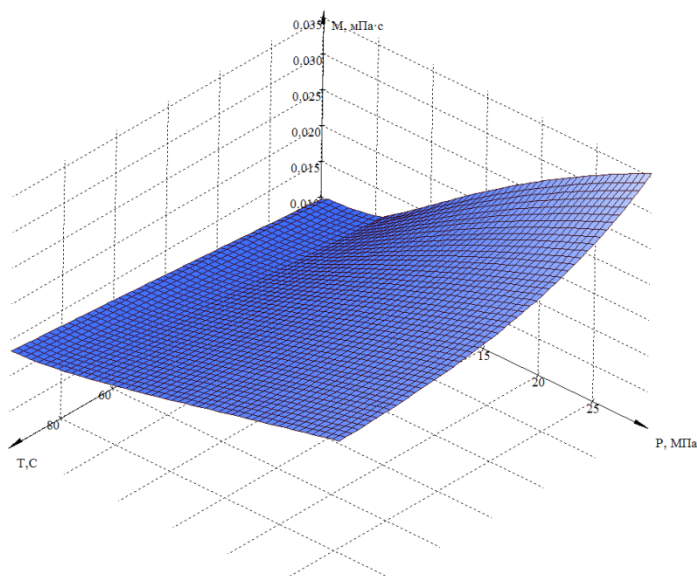


Рис. 11. Зависимость коэффициента динамической вязкости газа Саратовского месторождения от давления и температуры

Таблица 1. Сопоставление расчетных и экспериментальных значений коэффициента динамической вязкости газа Саратовского месторождения [2]

$P$ , МПа	$T$ , °С	$T$ , К	$\mu_{расч.}$ , мкПа·с	$\mu_{факт.}$ , мкПа·с	Погрешность, %
0,1	0,01	273,16	1050	1007	-4,27
2,03	0,01	273,16	1098	1093	-0,41
4,05	0,01	273,16	1130	1201	5,95
6,08	0,01	273,16	1210	1322	8,5
8,1	0,01	273,16	1374	1458	5,77
10,13	0,01	273,16	1552	1602	3,14
20,26	0,01	273,16	2388	2445	2,35
30,39	0,01	273,16	3080	3137	1,8
35,45	0,01	273,16	3379	3430	1,47
40,52	0,01	273,16	3653	3723	1,89
45,58	0,01	273,16	3903	3939	0,92
0,1	20,01	293,16	1115	1069	-4,29
2,03	20,01	293,16	1156	1109	-4,22
4,05	20,01	293,16	1189	1170	-1,62
6,08	20,01	293,16	1258	1243	-1,2
8,1	20,01	293,16	1385	1327	-4,34
10,13	20,01	293,16	1522	1426	-6,73
20,26	20,01	293,16	2183	2046	-6,68

<b><i>P</i>, МПа</b>	<b><i>T</i>, °С</b>	<b><i>T</i>, К</b>	<b><i>μ</i><sub>расч.</sub>, мкПа·с</b>	<b><i>μ</i><sub>факт.</sub>, мкПа·с</b>	<b>Погрешность, %</b>
30,39	20,01	293,16	2760	2650	-4,16
35,45	20,01	293,16	3020	2925	-3,23
40,52	20,01	293,16	3262	3192	-2,18
45,58	20,01	293,16	3488	3456	-0,92
0,1	51,01	324,16	1212	1169	-3,66
2,03	51,01	324,16	1241	1192	-4,07
4,05	51,01	324,16	1279	1235	-3,58
6,08	51,01	324,16	1341	1291	-3,87
8,1	51,01	324,16	1429	1360	-5,07
10,13	51,01	324,16	1526	1438	-6,1
20,26	51,01	324,16	2017	1900	-6,14
30,39	51,01	324,16	2479	2402	-3,21
35,45	51,01	324,16	2696	2645	-1,93
40,52	51,01	324,16	2904	2887	-0,57
45,58	51,01	324,16	3102	3112	0,34
0,1	100,01	373,16	1357	1315	-3,21
2,03	100,01	373,16	1373	1342	-2,33
4,05	100,01	373,16	1412	1380	-2,34
6,08	100,01	373,16	1464	1423	-2,89
8,1	100,01	373,16	1523	1473	-3,39
10,13	100,01	373,16	1590	1526	-4,2
20,26	100,01	373,16	1956	1850	-5,72
30,39	100,01	373,16	2325	2221	-4,67
35,45	100,01	373,16	2503	2411	-3,83
40,52	100,01	373,16	2678	2600	-2,99
45,58	100,01	373,16	2846	2779	-2,43
0,1	150,01	423,16	1497	1450	-3,24
2,03	150,01	423,16	1511	1476	-2,38
4,05	150,01	423,16	1543	1508	-2,33
6,08	150,01	423,16	1583	1544	-2,55
8,1	150,01	423,16	1630	1584	-2,89
10,13	150,01	423,16	1685	1625	-3,67
20,26	150,01	423,16	1990	1859	-7,05
30,39	150,01	423,16	2303	2140	-7,6
35,45	150,01	423,16	2455	2282	-7,6
40,52	150,01	423,16	2605	2420	-7,65

После проведенной теоретической выборки существующих аналитических способов расчета вязкости можно сделать вывод, что большинство современных методик определения вязкости дают хорошие результаты в области низких давлений, но ни одна из них не учитывает величину влияния давления на определяемую величину. Предложенный же алгоритм расчета позволит достаточно точно определить коэффициенты вязкости при повышенном давлении, погрешность при этом составит около 10 %.

### Литература

1. Бретшнайдер С. Свойства газов и жидкостей: инженерные методы расчета / под ред. Романкова П.Г. – М., Л.: Химия, 1966. 536 с.
2. Голубев И.Ф. Вязкость газов и газовых смесей (Справочное руководство). – М.: Физматгиз, 1959. 375 с.
3. Гуревич Г.Р., Брусиловский А.И. Справочное пособие по расчету фазового состояния и свойств газоконденсатных смесей. – М.: Недра, 1984. 264 с.
4. Мещеряков Н.В., Голубев И.Ф. / Труды ГИАП, вып. 3 и 4, 1954.
5. Brokaw R.S. NASA Tech. Note D-2580; January 1965.
6. Pitzer K.S., J. Chem. Phys., 7 (1939), p. 583.
7. Reid, R.C., Prausnitz J.M., and Sherwood T.K. The Properties of Liquids and Gases. (3rd ed.). McGraw-Hill, 1977.

## METHODS OF CALCULATING THE DYNAMIC VISCOSITY OF GASES IN A WIDE RANGE OF PRESSURES

D.N. Glumov <sup>1</sup>, A.V. Strekalov <sup>2</sup>

*Tyumen State Oil and Gas University*

*Tyumen, Russia*

*e-mail: <sup>1</sup>glumov@mail.ru, <sup>2</sup>darlex77@mail.ru*

**Abstract.** *The article describes the main methods for determining the viscosity of gas mixtures. The authors proposed a number of modifications to already existing methods for determining viscosity to simplify the calculations and improve the quality of the results.*

**Keywords:** *determination of viscosity of gas mixtures, dynamic viscosity, kinematic viscosity, Chapman-Enskog equation, Lennard-Jones potential, Brokaw law, Golubev method*

### References

1. Bretshnaider S. Svoistva gazov i zhidkosti: inzhenernye metody rascheta / pod red. Romankova P.G. (The Properties of Gases and Liquids: Engineering Methods For Calculating) / under ed. Romankov P.G. Moscow, Leningrad, Khimiya, 1966. 536 p.
2. Golubev I.F. Vyazkost' gazov i gazovykh smesei. Spravochnoe rukovodstvo. (Viscosity of gases and gas mixtures. Reference Guide). Moscow, Fizmatgiz, 1959. 375 p.
3. Gurevich G.R., Brusilovskij A.I. Spravochnoe posobie po raschetu fazovogo sostojanija i svojstv gazokondensatnykh smesej (A guidebook for the calculation of the phase state and properties of gas condensate mixtures). Moscow, Nedra, 1984. 264 p.
4. Mewerjakov N.V., Golubev I.F. Trudy GIAP (Proceedings of GIAP), Issue 3 and 4, 1954.
5. Brokaw R.S. NASA Tech. Note D-2580; January 1965.
6. Pitzer K.S., J. Chem. Phys., 7 (1939), p. 583.
7. Reid, R.C., Prausnitz J.M., and Sherwood T.K. The Properties of Liquids and Gases. (3rd ed.). McGraw-Hill, 1977.