

Ташибетова А.Т.

**ВЛИЯНИЕ КЛАСТЕРОВ НА БАРИЧЕСКУЮ ЗАВИСИМОСТЬ  
ВЯЗКОСТИ ГАЗОВ**

A.T. Tashimbetova

**INFLUENCE OF CLUSTERS ON BARIC DEPENDENCE  
OF VISCOSITY OF GASES**

УДК: 533.15:536

[7-9]:

Қысымның кен аумағындағы газ тұтқырлығының есептеулері келтірілген. Кластерлік субкомпоненттерінің тұтқырлығына үлес қысым көбейгенде газдардың тұтқырлығының өсуіне әкеледі.

В статье приведены расчеты вязкости газов в широкой области давлений. Вклад в вязкость кластерных субкомпонентов приводит к увеличению вязкости газов при повышении давления.

Calculations of viscosity of gases in wide rang of pressure are given. The contribution to viscosity of cluster subcomponents results in increase of viscosity of gases at increase of pressure.

Формулы кинетической теории газов позволяют определять характеристики межмолекулярных взаимодействий по температурной зависимости вязкости. При низких давлениях эти формулы достаточно хорошо описывают вязкость, отражая тот факт, что вязкость не зависит от давления [1-3]. Эксперименты говорят о том, что при повышении давления вязкость растет с давлением. Чтобы учесть такую зависимость в формулы для вязкости вводятся поправки. Наиболее обоснованными являются поправки энскоговского типа, для которых к настоящему времени получены достаточно строгие выражения [4-6].

В кластерной модели газов каждый газ рассматривается в виде смеси из кластеров различного размера [7-11]. С повышением давления в газе появляются кластеры, состоящие из нескольких молекул. Вязкость плотного газа определяется вкладом в поток импульса упорядоченного движения, который вносит каждый кластерный субкомпонент, что можно выразить следующей формулой [12]:

$$\eta = \sum_{g=1}^r C_g^{(c)} \eta_g, \quad (1)$$

где  $g$  – размер кластера, содержащего  $g$  молекул,  $C_g^{(c)}$  – концентрация  $g$  – мерных кластеров как доля относительно суммарного числа кластеров в единице объема,  $\eta_g$  – парциальный коэффициент вязкости кластерного субкомпонента.

Кинетическая теория многокомпонентных газов применительно к молекулярно-кластерной смеси дает следующую формулу для парциального коэффициента вязкости кластерного субкомпонента

$$\eta_g = \frac{h\sqrt{T}}{\sum_{l=1}^r C_g^{(c)} \sigma_{gl}^2 \sqrt{\frac{2M_{lg}}{M_g}} (5M_{gl} + 3M_{lg}) \chi_{gl}}, \quad (2)$$

где  $l$  – размер кластера, содержащего  $l$  молекул,

$$M_{gl} \equiv \frac{M_g}{M_g + M_l};$$

$M_g, M_l$  – масса моля  $g$  – мерных кластеров и  $l$  – мерных кластеров,

$h$  – размерный коэффициент:

$$h = 8009 \cdot 10^{-29} \text{ \AA} \hat{\alpha}^{1/2} \hat{E}^{-1/2} \hat{\epsilon} \hat{\nu} \hat{\nu}^{-1/2},$$

$\sigma_{gl}$  – эффективный диаметр столкновений соответствующих кластеров, зависящий от температуры,  $\chi_{gl}$  – радиальная функция распределения.

Как принято в теории Энскога, радиальная функция  $\chi_{gl}$  учитывает взаимную экранировку при столкновениях и собственный объем частиц [4-7]. Эффективный диаметр кластеров больше диаметров молекул, поэтому при их столкновениях необходимо учитывать механизм передачи импульса упорядоченного движения на расстояние их эффективного диаметра:

$$s_{gl} = \frac{\sigma_{gl}}{\tau_g} \sqrt{\frac{m_g}{3kT}}, \quad (3)$$

где  $\tau$  – время свободного пролета.

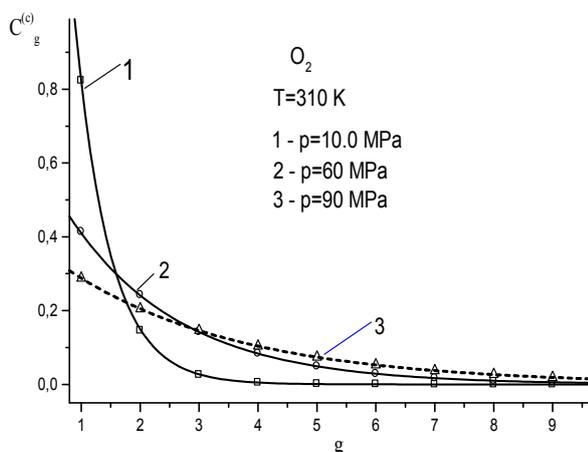
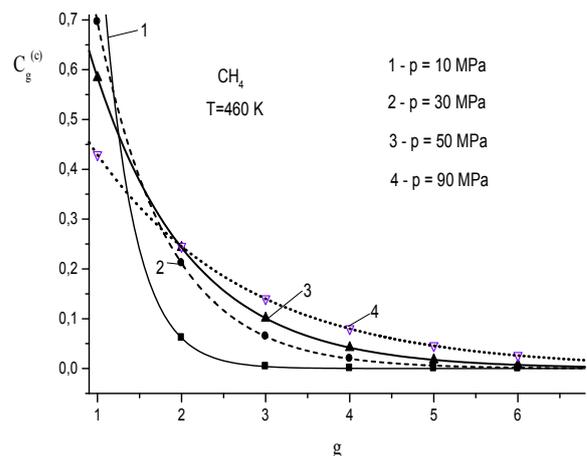
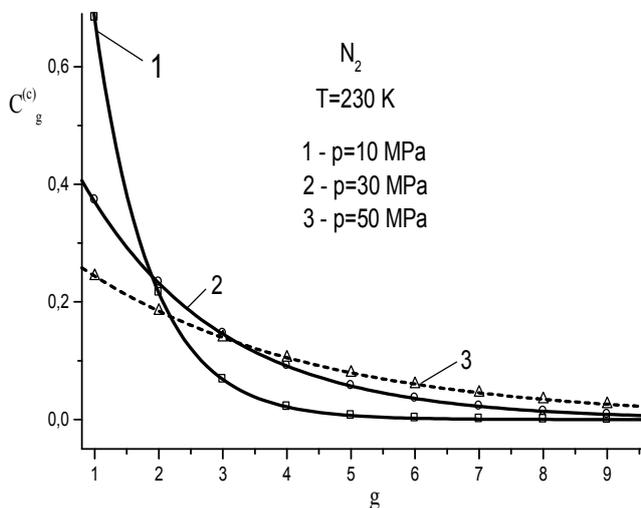
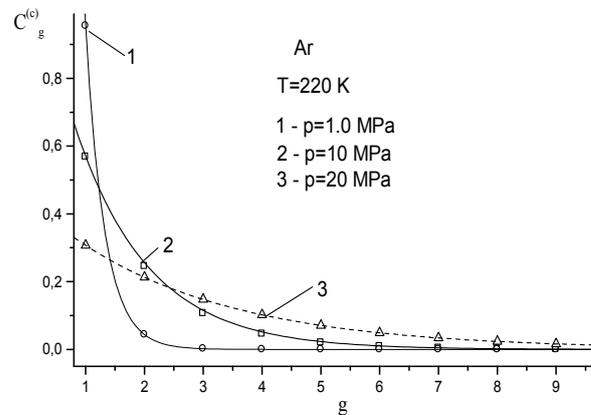
С учетом (3) радиальная функция записывается так:

$$\chi_{gl} = \frac{1}{S^3(1+s_{gl})} \left\{ S^2 + 3 \frac{\sigma_{gg}\sigma_{ll}}{\sigma_{gg} + \sigma_{ll}} S S_2 + 2 \left( \frac{\sigma_{gg}\sigma_{ll}}{\sigma_{gg} + \sigma_{ll}} \right)^2 S_2^2 \right\} \quad (4)$$

$$S_2 \equiv \frac{\pi n^{(n)}}{6} \sum_{l=1}^r C_l^{(c)} \sigma_{ll}^2, \quad (5)$$

$$S \equiv 1 - \frac{\pi n^{(n)}}{6} \sum_{l=1}^r C_l^{(c)} \sigma_{ll}^3. \quad (6)$$

Как видно из этих формул для расчетов вязкости молекулярно-кластерной смеси, каковой является плотный газ, необходимо иметь значения концентраций кластерных субкомпонентов при данных условиях. В работах [7-11] разработаны схемы расчетов концентраций кластерных субкомпонентов, расчеты по которым для различных газов приведены рисунках 1-4. В расчетах использованы величины, характеризующие индивидуальные свойства газов, взятые из работ [13-16].



ис. 2, 4—Распределения концентраций кластеров по размерам в аргоне и метане соответственно. Линии—расчеты по формуле:  $C_g^{(c)} = C_1^{(c)} \exp[-\beta(g-1)]$ .

Как видно из графиков, в исследованных газах при высоких давлениях могут существовать кластеры, состоящие из десяти молекул. Такие кластеры вносят существенный вклад в вязкость плотного газа, что отражается на барической зависимости.

На рисунках 5-10 приведены результаты расчетов вязкости этих газов с использованием концентраций кластеров по формулам (1), (2). Как видно из формул (1), (2) знание кластерного состава при различных условиях дает возможность рассчитывать также парциальный коэффициент вязкости каждого кластерного субкомпонента  $\eta_g$ , а также парциальную вязкость  $\eta_g C_g^{(c)}$ . Такие данные позволяют выяснять причину барической зависимости.

В кластерной модели в качестве существенной причины, приводящей к росту вязкости с повышением давления, принимается увеличение концентрации больших кластеров, которые имеют большой парциальный коэффициент вязкости. Увеличение коэффициента вязкости с ростом массы частиц (в данном случае-кластеров) имеет наглядное объяснение в рамках элементарной кинетической теории: тяжелые частицы при столкновении с легкими имеют большую сохраняемость (персистенцию) скорости после столкновений.

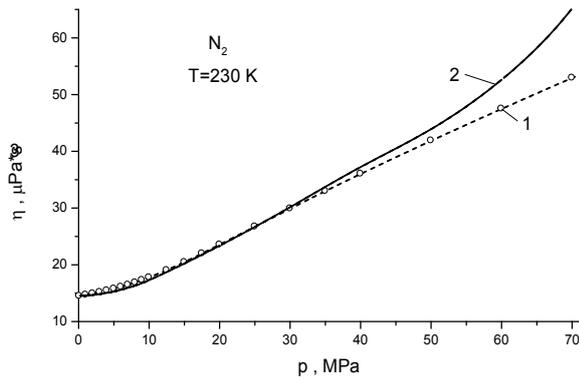


Рис.5–Барическая зависимость вязкости азота. 1–табличные сглаженные экспериментальные данные [14], 2–расчеты по формулам (1), (2).

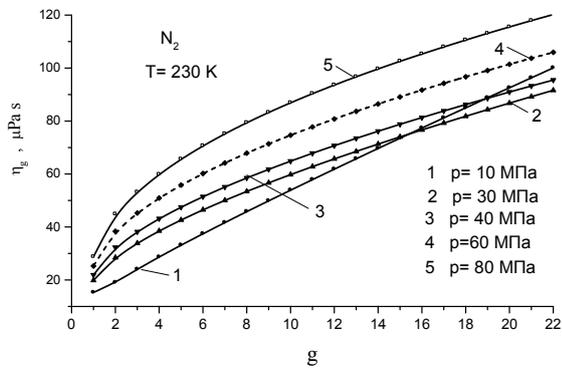


Рис. 6–расчеты по формуле (2) парциального коэффициента вязкости азота как функции размера кластера.

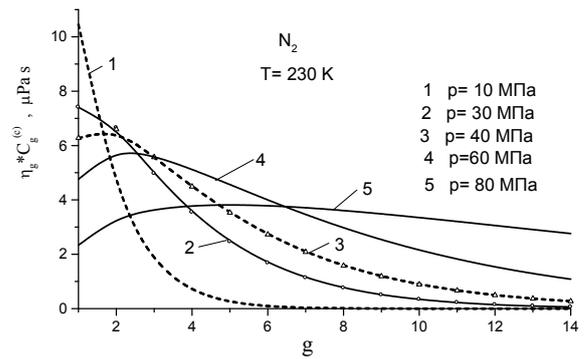


Рис. 7 – расчеты по формуле (1) парциальной вязкости азота.

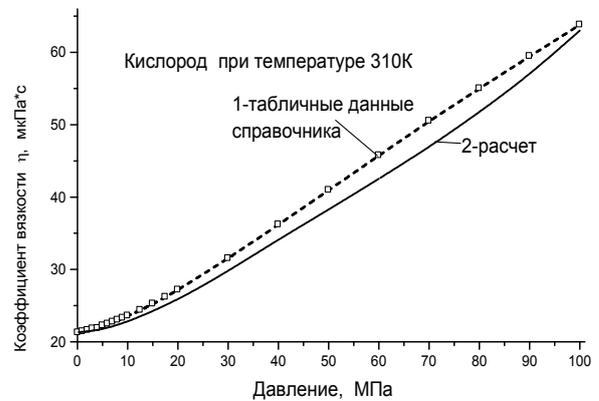


Рис.8–Барическая зависимость вязкости кислорода. 1–табличные сглаженные экспериментальные данные [14, 16], 2–расчеты по формулам (1), (2).

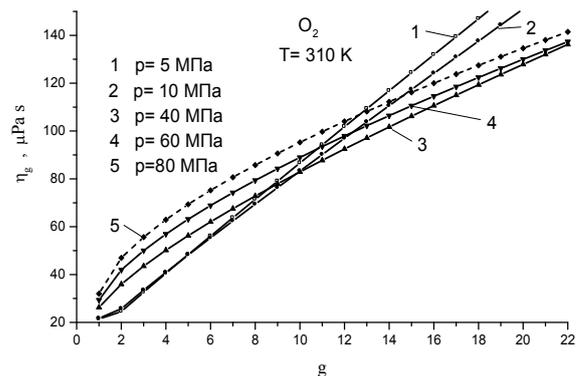


Рис. 9 – расчеты по формуле (2) парциального коэффициента вязкости кислорода как функции размера кластера.

2 – расчеты по формулам (1), (2).

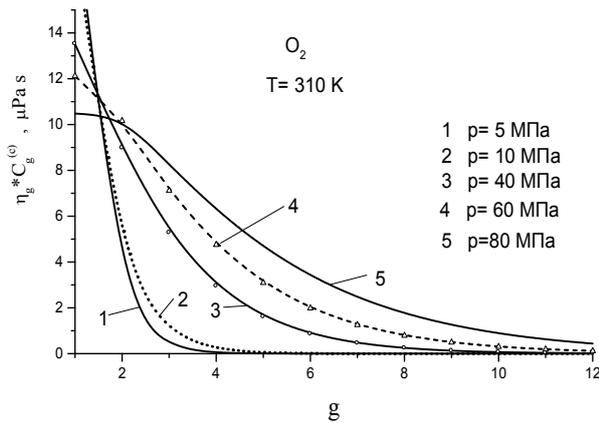


Рис. 10 – расчеты по формуле (1) парциальной вязкости кислорода как функции размера кластера.

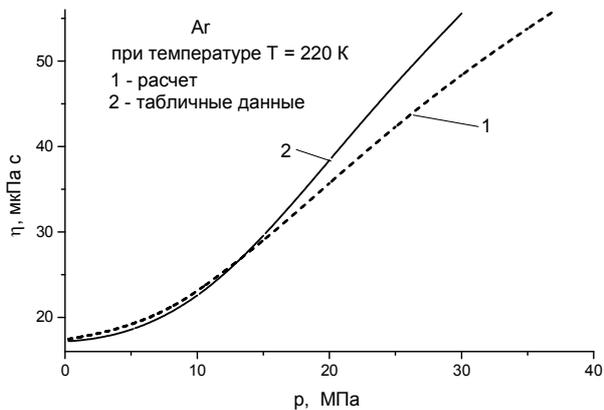


Рис.11 – Барическая зависимость вязкости аргона. 1 – табличные сглаженные экспериментальные данные [13], 2 – расчеты по формулам (1), (2).

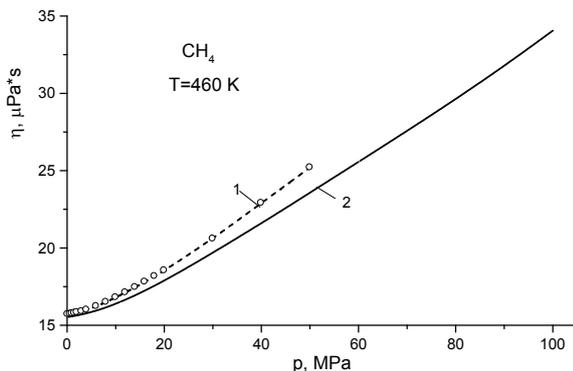


Рис.12 – Барическая зависимость вязкости метана. 1 – табличные сглаженные экспериментальные данные [14],

Как видно из графиков, кластерная модель правильно отражает рост вязкости газов с давлением. Отклонения расчетов от сглаженных экспериментальных данных объясняется не только несовершенством учета вклада больших кластеров в формулах кинетической теории, но и сложностями при экспериментальных исследованиях вязкости в плотных газах.

### Литература

1. Основатели кинетической теории материи: Сборник статей/Под ред. А.К. Тимирязева. – М.-Л.: Глав. ред. техн.-теор. лит., 1937. – 220 с.
2. Больцман Л. Лекции по теории газов. – М.: ГИТТЛ, 1956. – 554 с.
3. Матвеев А.Н. Молекулярная физика: Учебник для физич. спец. вузов. – 2-е изд., перераб. и доп. – М.: Высш. шк., 1987. – 360 с.: ил.
4. Гиршфельдер Дж., Кертисс Ч., Берд Р. Молекулярная теория газов и жидкостей. – М.: ИЛ, 1961. – 930 с.
5. Lopez de Haro M., Cohen E. G. D., Kincaid J. M. The Enskog Theory for Multicomponent Mixtures. I. Linear transport Theory//J. Chem. Phys. - 1983. - Vol. 78, № 5. - P. 2746 - 2759.
6. Курлапов Л.И. Описание диффузии газов умеренной плотности на основе уравнения Больцмана-Лоренца-Энскога//ЖТФ.-1986.-Т.56, №2.- С.386-388.
7. Курлапов Л.И. Расчет свойств газов на основе кластерной модели// ИФЖ.- 2003. – Т.76, №4. - С.23-29.
8. Курлапов Л.И. Физика кинетических явлений в газах. Монография.– Алматы,– 2001. 211 с.
9. Курлапов Л.И. Кластерная модель газа//ЖТФ. - 2003. – Т. 73, вып. 2.- С. 51-55.
10. Дьяченко Е.А. Влияние кластеров на диффузию умеренно плотных газов//Вестник КазГУ. Серия физическая. 2003.- №2 (12). - С. 85-109.
11. Курлапов Л.И., Ташимбетова А.Т. Расчет концентрации кластеров и фактора сжимаемости в газах//Вестник КазНУ. Серия физическая, №1(12), Алматы, 2002. – С. 112-116.
12. Курлапов Л.И. К кинетической теории вязкости газов//ЖТФ. - 1978. - Т.48, вып. 6. - С. 1302-1304.
13. Теплофизические свойства неона, аргона, криптона и ксенона. Рабинович В.А. и др. – М.: Изд-во стандартов, 1976, с. 636.
14. Варгафтик Н.Б. Справочник по теплофизическим свойствам газов и жидкостей. – М.: Наука, 1972. – 720 с.
15. Термодинамические свойства азота/Сычев В.В. и др. – М.: Издательство стандартов, 1977. - 352 с.
16. Термодинамические свойства кислорода: ГСССД. Серия монографий/Сычев В.В. и др. – М.: Изд-во стандартов, 1981. – 304 с.

Рецензент: д.ф.-м.н., профессор Жанабаев З.Ж.