

РАСЧЕТЫ ВЯЗКОСТИ КЛАСТЕРНЫХ ГАЗОВ В ШИРОКОЙ ОБЛАСТИ ДАВЛЕНИЙ

Аннотация

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. Эксперименты говорят о том, что при повышении давления вязкость растет с давлением. Чтобы учесть такую зависимость в формулы для вязкости вводятся поправки.

Ключевые слова: кластеры, вязкость газов, барическая зависимость газов.

Keywords: the cluster, baric dependences of viscosity of dense gases, subcomponents.

В кластерной модели газов каждый газ рассматривается в виде смеси из кластеров различного размера [1-7]. С повышением давления в газе появляются кластеры, состоящие из нескольких молекул

Распространение кинетической теории на плотные газы в виде теории Энскога дает следующую формулу для коэффициентов вязкости простых (однокомпонентных) умеренно плотных газов [7]:

$$\eta = \frac{1}{\chi} \left(1 + \frac{4}{15} \pi n \sigma_{11}^3 \right) \eta^{(0)} + \frac{5}{3} \left(\frac{4}{9} n^2 \sigma^4 \chi \sqrt{\pi m k T} \right), \quad (1)$$

где $\eta^{(0)}$ - коэффициент сдвиговой вязкости разреженного газа,

χ - параметр, который определяется из сравнения данных с экспериментом (здесь сохранено обозначение работы [11], поэтому эта χ не совпадает с радиальной функцией).

При удачном подборе параметров эта формула хорошо описывает известные барические зависимости вязкости [12; 13]. Однако в ней не учитывается существование кластеров, поэтому мы не будем приводить результаты расчетов по ней, а также по различным ее модификациям. Не учет кластеров в таком рассмотрении приводит к отличию от экспериментов уже на уровне фактора сжимаемости: он по этой теории не может быть меньше единицы. Это видно из формулы для него, в которую входят те же положительные поправки, которые входят и в формулу для коэффициента вязкости [12]:

$$z_e = 1 + \frac{2}{3} n \pi \sigma^3 \chi. \quad (2)$$

Формула кинетической теории многокомпонентных смесей (2) с учетом парциальных поправок поправки энскоговского типа $\chi_{\alpha\beta}$ и зависимости эффективного диаметра столкновений от температуры имеет вид:

$$[\eta]_1 = \sum_{\alpha=1}^s \frac{x_{\alpha} h \sqrt{T}}{\sum_{\beta=1}^s \chi_{\alpha\beta} x_{\beta} \sigma_{\alpha\beta}^2 \sqrt{\frac{2M_{\beta\alpha}}{M_{\alpha}} (5M_{\alpha\beta} + 3M_{\beta\alpha})}}. \quad (3)$$

Влияние кластеров на перенос импульса не ограничивается зависимостью сдвиговой вязкости от давления. При напорном течении плотного газа проявляется объемная вязкость.

В молекулярно-кластерной смеси объемная вязкость связана с эволюцией кластерной смеси при изменении давления. Переход группы кластеров определенного давления из области с одним давлением в область с другим давлением происходит образование или распад кластеров с появлением новых кластеров или с изменением концентраций кластеров. Это сказывается на переносе импульса. Количественно это явление описывается объемной вязкостью, которая в тензоре напряжений стоит перед дивергенцией скорости упорядоченного движения. Кинетическая теория многокомпонентных смесей дает следующую формулу для объемной вязкости молекулярно-кластерной смеси:

$$\kappa = \sum_{l=1}^r \left(\frac{2}{3} \pi n_l \sigma_{lk}^3 \right)^2 \chi_{kl} \eta_l, \quad (4)$$

где η_l – парциальный коэффициент сдвиговой вязкости кластерного субкомпонента размера l ,

n_l – парциальная числовая плотность l – мерных кластеров.

Вязкость плотного газа определяется вкладом в поток импульса упорядоченного движения, который вносит каждый кластерный субкомпонент, что можно выразить следующей формулой [12]:

$$\eta = \sum_{g=1}^r C_g^{(c)} \eta_g, \quad (5)$$

где g – размер кластера, содержащего g молекул,

$C_g^{(c)}$ – концентрация g – мерных кластеров как доля относительно суммарного числа кластеров в единице объема,

η_g – парциальный коэффициент вязкости кластерного субкомпонента.

Кинетическая теория многокомпонентных газов применительно к молекулярно-кластерной смеси дает следующую формулу для парциального коэффициента вязкости кластерного субкомпонента [7-9]:

$$\eta_g = \frac{h\sqrt{T}}{\sum_{l=1}^r C_g^{(c)} \sigma_{gl}^2 \sqrt{\frac{2M_{lg}}{M_g}} (5M_{gl} + 3M_{lg}) \chi_{gl}}, \quad (6)$$

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: $h = 8009 \cdot 10^{-29} \text{ Дж}^{1/2} \text{ К}^{-1/2} \text{ кмоль}^{1/2}$,

σ_{gl} – эффективный диаметр столкновений соответствующих кластеров, зависящий от температуры,

χ_{gl} – радиальная функция распределения.

Как принято в теории Энскога, радиальная функция χ_{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:

$$s_{gl} = \frac{\sigma_{gl}}{\tau_g} \sqrt{\frac{m_g}{3kT}}, \quad (7)$$

где τ – время свободного пролета.

С учетом (3) радиальная функция записывается так:

$$\chi_{gl} = \frac{1}{S^3(1+s_{gl})} \left\{ S^2 + 3 \frac{\sigma_{gg} \sigma_{ll}}{\sigma_{gg} + \sigma_{ll}} S S_2 + 2 \left(\frac{\sigma_{gg} \sigma_{ll}}{\sigma_{gg} + \sigma_{ll}} \right)^2 S_2^2 \right\}, \quad (8)$$

$$S_2 \equiv \frac{\pi n^{(n)}}{6} \sum_{l=1}^r C_l^{(c)} \sigma_{ll}^2, \quad (9)$$

$$S \equiv 1 - \frac{\pi n^{(n)}}{6} \sum_{l=1}^r C_l^{(c)} \sigma_{ll}^3. \quad (10)$$

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 на рисунках 1-4. В расчетах использованы величины, характеризующие индивидуальные свойства газов, взятые из работ [13-16].

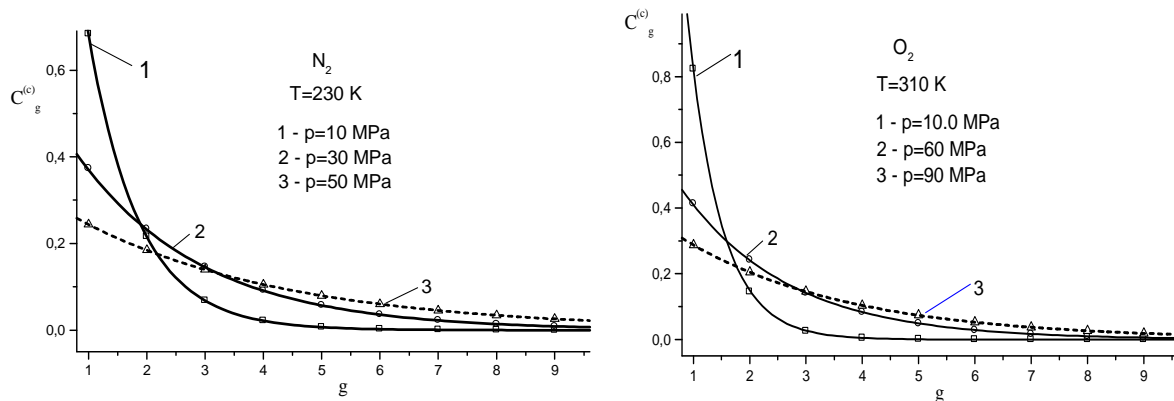


Рис. 1, 2 - Распределения концентраций кластеров по размерам в азоте и кислороде соответственно.

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.

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. ISBN 9965-489-81-5.

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.