

01;03
©1995

ЗАВИСИМОСТИ СКОРОСТИ ДИФФУЗИОФЕРЕЗА УМЕРЕННО КРУПНЫХ АЭРОЗОЛЬНЫХ ЧАСТИЦ В БИНАРНОЙ ГАЗОВОЙ СМЕСИ ОТ ФОРМЫ ИХ ПОВЕРХНОСТИ

Р.А.Сафиуллин

Встречающиеся в природе и в промышленных установках реальные твердые аэрозольные частицы имеют самую различную форму, отличающуюся от сферической [1,2]. Из сравнения результатов экспериментальных и теоретических работ, посвященных теории диффузиофереза крупных твердых аэрозольных частиц произвольной формы ($Kn \ll 1$, $Kn = \lambda/L$) — число Кнудсена, где λ — средняя длина свободного пробега молекул среды, L — характерный размер частиц) в бинарной газовой смеси, был сделан вывод о том, что скорость диффузиофереза для таких частиц не зависит от формы частиц [1,2]. В отличие от крупных частиц, для умеренно крупных ($0.01 \leq Kn \leq 0.3$) твердых аэрозольных частиц, такой анализ до настоящего времени не проводился в связи с тем, что из-за наличия слоя Кнудсена на скорость диффузиофереза очень сильное влияние оказывают поверхностные газокинетические эффекты [3-6]. Данная статья восполняет этот пробел.

Представим выражения для скоростей диффузиофереза U_D сферической и цилиндрической умеренно крупных аэрозольных частиц, которые были получены в работах [3,4], в общем виде

$$U_D = U_D^* D_{12} (\nabla C_{1e})_{\infty}, \quad (1)$$

где U_D^* для сферической частицы имеет вид

$$U_D^* = - \left\{ K_{DSI} + Kn \left[K_{DSI}^R - K_{DSI}^B (1 + 2Kn C_D) - \right. \right. \\ \left. \left. - C_v (1 + 6Kn K_{SI}) + K_{TSI} \frac{\nu_e}{T_e} \frac{2p^e}{\left(1 + 2\frac{\kappa_e}{\kappa_i} + 2\frac{K_T^{(T)}}{R} \right) \kappa_i} \times \right. \right. \\ \left. \left. \times \left(C_q - K_T \frac{n_e^2}{n_{1e} n_{2e}} C_D - \frac{C_D}{D_{12}} \frac{T_e}{p^{(e)}} \frac{K_T^{(n)}}{R} \kappa_i \right) \right] \right\} \cdot M. \quad (2)$$

Для цилиндрической частицы:

$$\begin{aligned}
 U_D^* = & - \left\{ K_{DSI} + Kn \left[K_{DSI}^R - K_{DSI}^B (1 + Kn C_D) - \right. \right. \\
 & - C_v (1 + 4Kn K_{SI}) + K_{TSI} \frac{\nu_e}{T_e} \frac{p^{(e)}}{\left(1 + \frac{\kappa_e}{\kappa_i} + \frac{K_T^{(T)}}{R} \right) \kappa_i} \times \\
 & \left. \left. \times \left(C_q - K_T \frac{n_e^2}{n_{1e} n_{2e}} C_D - \frac{C_D}{D_{12}} \frac{T_e}{p^{(e)}} \frac{K_T^{(n)}}{R} \kappa_i \right) \right] \right\} \cdot M; \quad (3) \\
 M = & \left((1 - Kn C_D) \cdot (1 + 2Kn K_{SI}) \right)^{-1}.
 \end{aligned}$$

В (1)–(3) имеем: (∇C_{1e}) — градиент относительной концентрации первой компоненты смеси; $C_{1e} = n_{1e}/n_e$, $C_{2e} = n_{2e}/n_e$, где n_{1e} и n_{2e} — числа молекул компонентов газовой смеси в единице объема, $(\nabla C_{1e}) = -(\nabla C_{2e})$. K_{DSI} , K_{TSI} , K_{SI} — коэффициенты диффузионного, теплового и изотермического скольжения; K_{DSI}^R , K_{DSI}^B — поправки на кривизну и барнеттовское скольжение; D_{12} — коэффициент взаимной диффузии смеси; T и κ — температура и теплопроводность; $\nu_e = \eta_e/\rho_e$ — коэффициент кинематической вязкости смеси; C_D , C_q , C_v — газокинетические коэффициенты потоков диффузии и тепла, среднемассового потока, растекающихся в слое Кнудсена [5]; $K_T^{(T)}$, $K_T^{(n)}$ — коэффициенты скачка температуры [6]; $p^{(e)}$ — давление смеси; K_T — термодиффузионное отношение. Индексы “e”, “i” принадлежат величинам, характеризующим газовую смесь и аэрозольную частицу радиуса R .

На рис. 1 и 2 представлены графики зависимости безразмерной величины U_D^* сферической (линии 1–5) и цилиндрической (линии 1'–5') от числа Кнудсена ($0 \leq Kn \leq 0.3$) для бинарных газовых смесей N_2 – H_2 (линии 1, 1'), N_2 – O_2 (линии 2, 2'), N_2 – C_2 – H_2 (линии 3, 3'), N_2 – Ag (линии 4, 4'), N_2 – CO_2 (линии 5, 5'). Все численные значения параметров бинарных газов, входящих в формулы (1)–(3) взяты из таблиц I и XII книги [7] для температуры 20°C. Значения газокинетических коэффициентов брались из работ [5,6].

Из рис. 1 и 2 видно, что величина U_D^* может быть как положительной, когда диффузиофоретическая скорость направлена в сторону роста концентрации n_{2e} (отрицательный диффузиофорез), так и отрицательной, когда диффузиофоретическая скорость направлена в сторону убывания

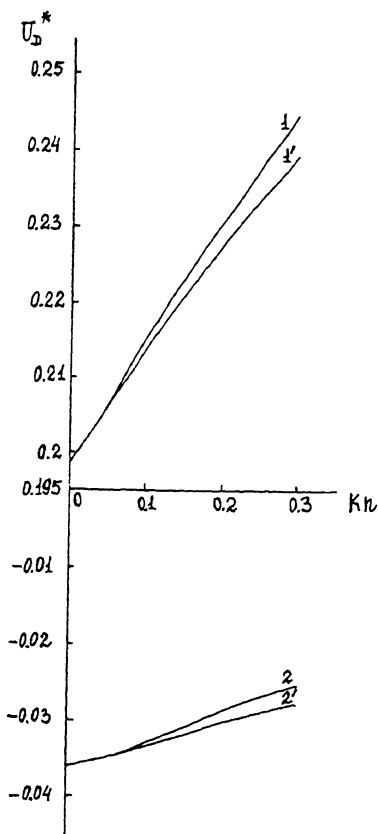


Рис. 1. Зависимость величины U_D^* от числа Kn .

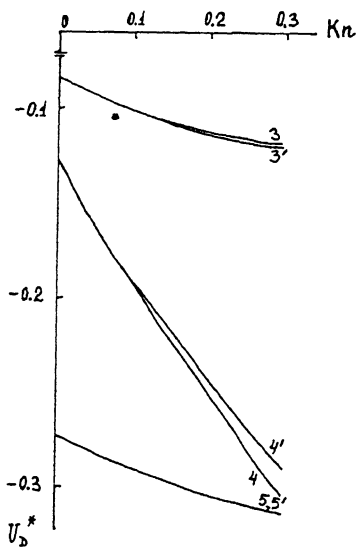


Рис. 2. Зависимость величины U_D^* от числа Kn .

концентрации n_{2e} (положительный диффузиофорез). Здесь n_{2e} — относительная концентрация более легкого компонента бинарных газовых смесей. Отношение членов безразмерной величины U_D^* для указанных бинарных газовых смесей показало, что для крупных твердых аэрозольных частиц основным эффектом является диффузионное скольжение вдоль поверхности частицы. Для умеренно крупных твердых аэрозольных частиц основное влияние на U_D^* оказывают барнеттовское и диффузионное скольжения, растекание в слое Кнудсена среднемассового потока, кривизна поверхности и скачок температуры в слое Кнудсена. Вклад эффектов, связанных с растеканием потока тепла (слагаемое, пропорциональное C_q) и явления термодиффузии (слагаемое, пропорциональное K_T) несущественны.

Численный анализ по формулам (1)–(3) показал, что скорость диффузиофореза крупных аэрозольных частиц не зависит от формы частиц, для умеренно крупных аэрозольных частиц фактор формы имеет существенное значение. Обозначим $U_D^{(sil)}/U_D^{(sf)} = A$ и $U_D^{(sf)}/U_D^{(sil)} = B$. Численные значения для $U_D^{(sf)}$ взяты по формулам (1), (2), а для $U_D^{(sil)}$ по формулам (1), (3) при $Kn = 0.3$. Для бинарной газовой смеси N_2-H_2 величина B 2%, для N_2-O_2 величина A 10.2%, для N_2-Ar величина B 5%, для $N_2-C_2H_2$ величина A 0.7%, для N_2-CO_2 величина A 0%. Рассмотрим также влияние числа Kn на величины A и B . Так, при $Kn = 0.3$ для бинарной газовой смеси N_2-H_2 величина B составляет 12%, для N_2-O_2 величина B 45.8%, для N_2-Ar величина B 7.9%, для $N_2-C_2H_2$ величина A 2.7%, для N_2-Cl_2 величина A 0.6%.

Отсюда можно сделать вывод о том, что скорость диффузиофореза умеренно крупных аэрозольных частиц зависит от их формы. Отличие в скоростях диффузиофореза для сферической и цилиндрической частиц проявляется влиянием на скорость диффузиофореза теплового и барнеттовского скольжения, растекания в слое Кнудсена среднemasового потока и скачка температуры в слое Кнудсена.

Список литературы

- [1] Сафиуллин Р.А. Деп. в ВИНТИ 07.09.94. № 2155-В94.
- [2] Сафиуллин Р.А., Яламов Ю.И. Обзор теорий термодиффузиофореза несферических аэрозольных частиц. М., 1994. 22 с. Деп. в ВИНТИ 12.09.94. № 2174-В94.
- [3] Яламов Ю.И., Сафиуллин Р.А. Диффузиофорез цилиндрической аэрозольной частицы в бинарной газовой смеси. М., 1994. 7 с. Деп. в ВИНТИ 31.01.94, № 266-В94.
- [4] Яламов Ю.И., Сафиуллин Р.А. К теории диффузиофореза умеренно крупных нелетучих сферических аэрозольных частиц в бинарной газовой смеси. М., 1994. 14 с. Деп. в ВИНТИ 07.09.94, № 2156-В94.
- [5] Яламов Ю.И., Юшканов А.А., Савков С.А. // ДАН СССР. 1988. Т. 301. В. 5. С. 1111–1114.
- [6] Алегин Е.И. Граничные условия в динамике разреженных неоднородных многокомпонентных газов. Автореф. канд. Дисс. М., 1990. 125 с.
- [7] Гирифельдер Дж., Кертисс Ч., Берд Р. Молекулярная теория газов и жидкостей. М.: ИЛ, 1961. 930 с.

Московский педагогический
университет

Поступило в Редакцию
21 ноября 1994 г.