

УДК 533.72

**ПРИМЕНЕНИЕ ПРИБЛИЖЕННЫХ ФОРМУЛ ДЛЯ РАСЧЕТА
МОДУЛЯ НЕСТАЦИОНАРНОЙ СОСТАВЛЯЮЩЕЙ
ДИФФУЗИОФОРЕТИЧЕСКОЙ СКОРОСТИ**

В.Е. Ефремов

*Московский государственный областной университет
105005, Москва, ул. Радио, 10а*

Аннотация. Проведено исследование нестационарной составляющей диффузиофоретической скорости по ее приближенным формулам для разных газов и для сферических частиц, состоящих из конкретных материалов.

Ключевые слова: нестационарная составляющая, диффузиофоретическая скорость, сферическая частица.

В работе [1] мы подробно рассмотрели конкретный случай диффузиофореза, когда нестационарный градиент концентрации задан с помощью функции, имеющей следующее аналитическое выражение:

$$g_{\infty}(t) = \left[\nabla C_1^{(2)}(t) \right]_{\infty} = A \cdot (1 - e^{-\omega t}),$$

где A и ω – положительные постоянные величины, имеющие размерности $1/m$ и $1/c$ соответственно. Получены приближенные формулы для вычисления модуля строго нестационарной составляющей диффузиофоретической скорости частицы:

$$\begin{aligned} |\bar{u}_{2D}(t)| \approx AK_{st}D_{12}\omega \cdot \left\{ \left[\sum_{j=1}^2 \lambda_j \frac{\omega}{\omega + z_j^2} + 2\Delta \frac{\omega^2 R^4}{\omega^2 R^4 + 4D_{12}^2} \right] \frac{4t}{3} \sqrt{\frac{t}{\pi}} - \frac{4\Delta\omega \cdot R^4}{\omega^2 R^4 + 4D_{12}^2} \sqrt{\frac{t}{\pi}} - \right. \\ \left. - \left[\sum_{j=1}^2 \lambda_j \frac{z_j}{\omega + z_j^2} - \frac{2\Delta R(\omega \cdot R^2 + 2D_{12})\sqrt{D_{12}}}{\omega^2 R^4 + 4D_{12}^2} \right] t \right\} \quad (\rho_e \neq \rho_i, \quad t \rightarrow 0), \end{aligned} \quad (1)$$

$$\begin{aligned} |\bar{u}_{2D}(t)| \approx AK_{st}D_{12} \left\{ 1 - \left[\sum_{j=1}^2 \frac{\lambda_j}{z_j^2} + 2\Delta \frac{\omega \cdot R^4}{\omega^2 R^4 + 4D_{12}^2} \right] \frac{1}{\sqrt{\pi t}} + \frac{1}{2} \left[\sum_{j=1}^2 \lambda_j \frac{\omega - z_j^2}{z_j^4 \omega} - \right. \right. \\ \left. \left. - 2\Delta \frac{R^4}{\omega^2 R^4 + 4D_{12}^2} \right] \frac{1}{t\sqrt{\pi t}} \right\} \quad (\rho_e \neq \rho_i, \quad t \rightarrow \infty), \end{aligned} \quad (2)$$

$$|\bar{u}_{2D}(t)| \approx \frac{2}{3} A\omega \cdot K_{st}D_{12} \left\{ \left[1 + \frac{D_{12}(\omega \cdot R^2 + 2D_{12})}{\omega^2 R^4 + 4D_{12}^2} \right] t - 2\sqrt{\frac{D_{12}t}{\pi}} \frac{\omega \cdot R^3}{\omega^2 R^4 + 4D_{12}^2} \left(1 - \frac{2\omega \cdot t}{3} \right) \right\} \\ (\rho_e = \rho_i, \quad t \rightarrow 0),$$

$$|\bar{u}_{2D}(t)| \approx AK_{st}D_{12} \left\{ 1 - \frac{2}{3} \sqrt{\frac{D_{12}}{\pi t}} \frac{\omega \cdot R^3}{\omega^2 R^4 + 4D_{12}^2} \left(1 + \frac{1}{2\omega \cdot t} \right) \right\} \quad (\rho_e = \rho_i, \quad t \rightarrow \infty),$$

где K_{sl} – коэффициент диффузионного скольжения, D_{12} – коэффициент диффузии, R – радиус частицы, t – время, ρ_e – плотность среды, ρ_i – плотность вещества частицы,

$z_j = -\frac{3\rho_e\sqrt{v}}{4R(\rho_e - \rho_i)} \left[3 + (-1)^j \sqrt{1 + 8\rho_i/\rho_e} \right]$ (v – коэффициент кинематической вязкости среды),

$$\Delta = \frac{3\rho_e\sqrt{v}}{R(5\rho_e + 4\rho_i)}, \quad \lambda_j = A_j + \frac{3\rho_e}{R^2(\rho_e - \rho_i)} (-1)^j \frac{v + Rz_j\sqrt{v}}{z_2 - z_1}.$$

Заметим, что

$$A_1 = \frac{2\sqrt{v} \cdot \Delta_1}{R[\Delta_1 + 16(\rho_e - \rho_i)^2] \sqrt{1 + 8\rho_i/\rho_e}}, \quad A_2 = -\frac{2\sqrt{v} \cdot \Delta_2}{R[\Delta_2 + 16(\rho_e - \rho_i)^2] \sqrt{1 + 8\rho_i/\rho_e}},$$

где

$$\Delta_1 = (5\rho_e + 4\rho_i - 3\rho_e\sqrt{1 + 8\rho_i/\rho_e})^2, \quad \Delta_2 = (5\rho_e + 4\rho_i + 3\rho_e\sqrt{1 + 8\rho_i/\rho_e})^2.$$

Известно, что к одним из вредных факторов металлообрабатывающего производства относятся повышенная запыленность и загазованность воздуха рабочей зоны.

Рассмотрим газовую резку легированной стали и плазменную резку алюминиевых сплавов [2]. При резке образуются оксид углерода (CO), диоксид азота (NO_2) и пыль оксида железа (Fe_2O_3 , $\rho_i = 5240 \text{ кг/м}^3$) или оксида алюминия (Al_2O_3 (корунд), $\rho_i = 3965 \text{ кг/м}^3$) соответственно. Поэтому в качестве примеров рассмотрим комбинации указанных газов с частицами данных оксидов металлов.

Рассмотрим одиночные частицы сферической формы ($R = 10^{-5} \text{ м}$), взвешенные в смеси воздуха и оксида углерода или диоксида азота. Будем считать, что температура $T = 293 \text{ К}$ и давление $P = 0,1 \text{ МПа}$. Заметим, что коэффициент диффузии для рассматриваемых бинарных смесей мы вычисляли, руководствуясь подходом Чена и Отмера [3], по формуле

$$D_{12} = \frac{0,43 \left(\frac{T}{100} \right)^{1,81} \left(\frac{1}{M_1} + \frac{1}{M_2} \right)^{0,5}}{P \left(\frac{T_{кр.1} T_{кр.2}}{10000} \right)^{0,1406} \left[\left(\frac{V_{мкр.1}}{100} \right)^{0,4} + \left(\frac{V_{мкр.2}}{100} \right)^{0,4} \right]^2},$$

где M_1 , M_2 – молекулярные массы газов, $T_{кр.1}$ и $T_{кр.2}$ – критические температуры газов, $V_{мкр.1}$ и $V_{мкр.2}$ – критические объемы газов. Для системы «воздух – CO » получаем $D_{12} = 0,087 \cdot 10^{-4} \text{ м}^2/\text{с}$, а для системы «воздух – NO_2 » – $D_{12} = 0,065 \cdot 10^{-4} \text{ м}^2/\text{с}$.

Используя формулу (1), построим графики, отражающие изменение скорости движения частиц при малых значениях времени (рис. 1).

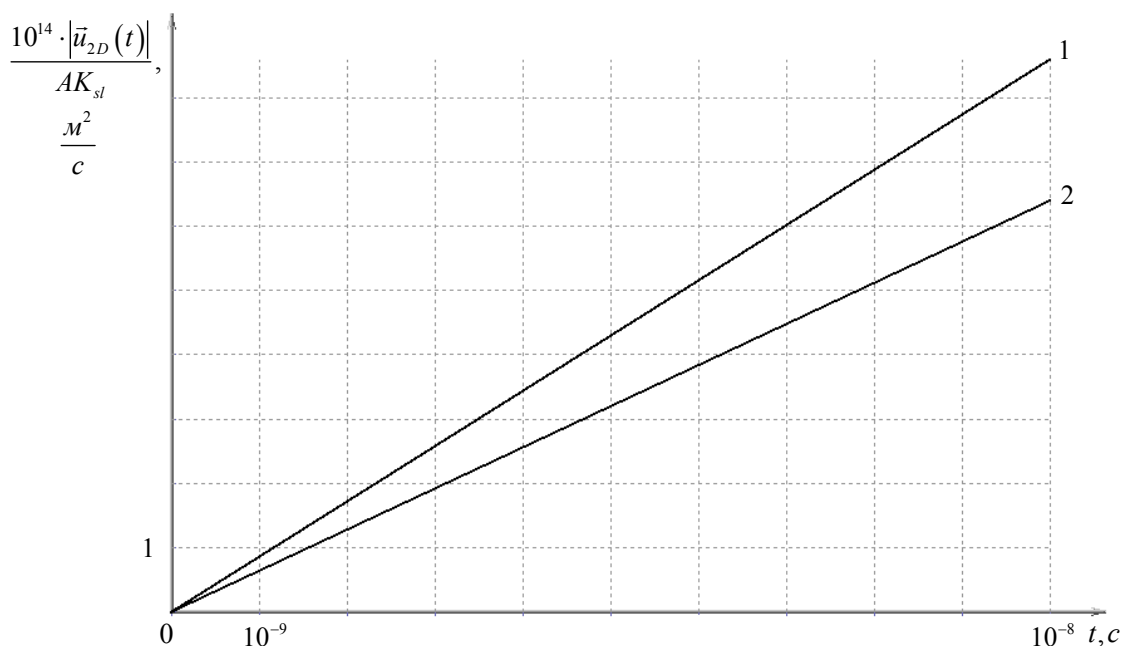


Рис.1. Линии 1, 2 отражают изменение нестационарной составляющей диффузиофоретической скорости сферической частицы в следующих случаях:
1) воздух – CO, Fe₂O₃, 2) воздух – NO₂, Fe₂O₃.

Как видно из рис.1, движение частиц при малых временах является ускоренным. Сравнивая линии 1, 2 можно сказать, что модуль нестационарной составляющей диффузиофоретической скорости частицы больше, когда коэффициент диффузии больше. Кроме того, взяв вторую производную от выражения (1), приходим к выводу, что графики функций вида $\frac{10^{14} |\vec{u}_{2D}(t)|}{AK_{sl}}$ имеют выпуклость, направленную вниз. Относительно случаев «воздух – CO, Al₂O₃», «воздух – NO₂, Al₂O₃» заметим, что значения скорости движения частиц незначительно превосходят (не более, чем на 0,5%) значения для соответствующих случаев с частицей оксида железа. Следовательно, модуль нестационарной составляющей диффузиофоретической скорости частицы больше, когда плотность частицы меньше.

Перейдем к исследованию диффузиофоретической скорости сферической частицы при больших значениях времени. При помощи формулы (2) построим графики функций для каждого из рассматриваемых примеров по выражению $|\vec{u}_{2D}(t) - AK_{sl} D_{12}$ (совмещаем все асимптоты с осью времени) (рис. 2).

При больших временах происходит замедление движения сферических частиц. При сравнении линий 1 и 2 или 3 и 4, замечаем, что модуль нестационарной составляющей диффузиофоретической скорости частицы больше, когда коэффициент диффузии меньше. Сравнивая линии 1 и 3 или 2 и 4, делаем вывод, что модуль нестационарной составляющей диффузиофоретической скорости частицы больше, когда плотность частицы больше.

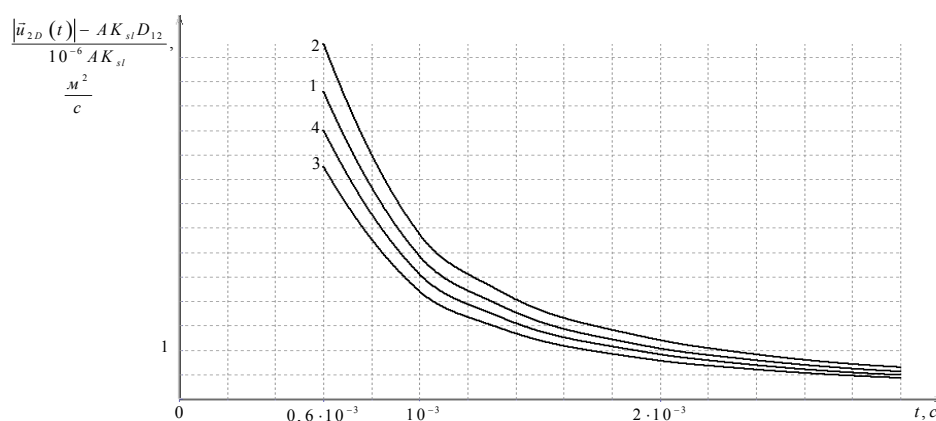


Рис.2. Линии 1 – 4 отражают изменение нестационарной составляющей диффузиофоретической скорости сферической частицы в следующих случаях:
 1) воздух – CO, Fe₂O₃, 2) воздух – NO₂, Fe₂O₃, 3) воздух – CO, Al₂O₃,
 4) воздух – NO₂, Al₂O₃.

Заметим, что при изменении температуры картина протекания процесса существенно не меняется. При повышении или понижении температуры модуль нестационарной составляющей диффузиофоретической скорости частицы соответственно увеличивается или уменьшается.

ЛИТЕРАТУРА

1. О нестационарной составляющей диффузиофоретической скорости твердой сферической частицы / Ефремов В.Е.; МГОУ. – М., 2013. – 19 с.: ил. – Библиогр.: 8 назв. – Рус. – Деп. в ВИНТИ 21.03.2013 № 82-В 2013
2. *Квашин И.М.* Промышленные выбросы в атмосферу. Инженерные расчеты и инвентаризация. – М.: АВОК-ПРЕСС, 2005. – 394 с.
3. *Бретинайдер С.* Свойства газов и жидкостей. Инженерные методы расчета. – М.: Издательство «Химия», 1966. – 536 с.

APPLICATION OF APPROXIMATE FORMULAE FOR NONSTATIONARY DIFFUSIOPHORESIS VELOCITY COMPONENT MODULE CALCULATION

V. Efremov

Moscow State Regional University
10a, Radio st., Moscow, 105005, Russia

Abstract. Investigation of nonstationary diffusio-phoresis velocity component on its approximate formulae was carried out for different gases and for spherical particles composed of concrete materials.

Keywords: nonstationary component, diffusio-phoresis veloc