

УДК 533.72:532

ББК 22.365.5

Щ 95

Щукин Е.Р.

Доктор физико-математических наук, профессор, ведущий научный сотрудник объединенного института высоких температур РАН, Москва, тел. (495) 977-51-07, e-mail: evgrom@yandex.ru

Малай Н.В.

Доктор физико-математических наук, профессор кафедры теоретической и математической физики Белгородского государственного национального исследовательского университета, Белгород, тел. (4722) 30-18-07, e-mail: malay@bsu.edu.ru

Шулиманова З.Л.

Доктор физико-математических наук, профессор, зав. кафедрой физики и химии Российской открытой академии транспорта Московского государственного университета путей сообщения (МИИТ), Москва, тел. (495) 799-95-32, e-mail: zinaida110@yandex.ru

О скорости термофореза твердых двухслойных крупных и умеренно крупных аэрозольных частиц (Рецензирована)

***Аннотация.** В приближении Стокса проведено теоретическое описание стационарного движения крупной и умеренно крупной твердой двухслойной сферической аэрозольной частицы в неоднородном по температуре одноатомном газе, когда коэффициенты теплопроводности ядра и оболочки двухслойной частицы значительно отличаются по величине.*

***Ключевые слова:** термофорез двухслойной аэрозольной частицы сферической формы.*

Shchukin E.R.

Doctor of Physics and Mathematics, Professor, the Leading Scientist of Joint Institute for High Temperatures of the Russian Academy of Science, Moscow, ph. (495) 977-51-07, e-mail: evgrom@yandex.ru

Malay N.V.

Doctor of Physics and Mathematics, Professor of Theoretical and Mathematical Physics Department, Belgorod State National Research University, Belgorod, ph. (4722) 30-18-07, e-mail: malay@bsu.edu.ru

Shulimanova Z.L.

Doctor of Physics and Mathematics, Professor, Head of Physics and Chemistry Department, Russian Open Academy of Transport, Moscow State University of Ways of Communication, Moscow, ph. (495) 799-95-32, e-mail: zinaida110@yandex.ru

On the velocity of thermophoresis of solid two-layer large and moderately large aerosol particles

***Abstract.** In the Stokes approximation, the theoretical description is carried out of steady-state motion of large and moderately large solid double-layer spherical aerosol particle in a nonuniform in temperature monatomic gas, when the thermal conductivity coefficients of the core and cover of the two-layer particle are considerably different in value.*

***Keywords:** thermophoresis, two-layer aerosol particle, spherical form.*

Естественные и антропогенные аэрозоли могут содержать двухслойные аэрозольные частицы [1-4]. Эти частицы состоят из ядра и оболочки.

Двухслойные частицы могут образовываться, в частности, при конденсации молекул и в результате протекания химических реакций на поверхности ядра [1-4]. Ядро и оболочка двухслойных частиц могут отличаться по составу, микроморфологии и, как правило, по функциональному назначению. Поэтому двухслойные частицы могут быть широко использованы в практических приложениях, например, в тех случаях, когда требуется изолировать ядро от воздействия окружающей среды [1, 2, 4], закрепить на внешнем слое специфические группы реагентов для направленной доставки лекарственных препаратов [4, 5]. В связи с этим изучение различных закономерностей, в частности, упорядоченного движения двухслойных аэрозольных частиц в газообразных

средах представляет значительный теоретический и практический интерес. Упорядоченное движение двухслойных аэрозольных частиц может происходить в газообразных средах с неоднородным распределением температуры [1, 4, 6, 7]. Это движение вызвано действием сил молекулярной природы [1, 6, 7] и обусловлено передачей частицам молекулами неоднородной газообразной среды нескомпенсированного импульса.

Если неоднородное распределение температуры в окрестности частиц вызвано внешним градиентом температуры (∇T_{∞}), то возникающее в этом случае движение частиц называют термофоретическим [1, 4, 6, 8, 9].

Силу, вызывающую термофоретическое движение частицы, называют термофоретической. Когда она становится равной по величине силе сопротивления среды ее движению, частица начинает двигаться равномерно. Скорость этого равномерного движения частицы относительно центра инерции газообразной среды называют термофоретической.

Термофоретическая сила может оказать значительное влияние на процесс осаждения аэрозольных частиц в каналах тепло- и массообменников [1, 4, 6, 7], на движение частиц в зонах просветления аэродисперсных систем [10] и в окрестности вымывающих частицы капель [11]. Термофоретический механизм переноса аэрозольных частиц может быть использован при тонкой очистке газов [6, 7] и при нанесении заданной толщины тонких покрытий [7].

Следует отметить, что скорость термофореза крупных (с числом Кнудсена $Kn \leq 0,01$) и умеренно крупных ($0,01 \leq Kn \leq 0,3$) [4, 6, 8, 9, 12] двухслойных аэрозольных частиц [9, 13], в отличие от малых частиц ($Kn \gg 1$) [4], непосредственно зависит от коэффициентов теплопроводности ε_1 , ε_2 ядра и оболочки. Коэффициенты теплопроводности ε_1 и ε_2 могут значительно отличаться по величине. В связи с этим коэффициенты теплопроводности ядра, и оболочки могут оказывать сильное влияние на скорость термофореза крупных и умеренно крупных двухслойных частиц. Поэтому самостоятельный интерес представляет проведение подробного анализа особенностей влияния коэффициентов теплопроводности ядра и оболочки на скорость термофореза крупных и умеренно крупных двухслойных аэрозольных частиц, который до настоящего времени проведен не был. В настоящей работе такой анализ был проведен в случае крупных и умеренно крупных твердых двухслойных сферических частиц с однородными ядром и оболочкой. При этом была использована формула для скорости термофореза, полученная гидродинамическим методом в работе [14].

При выводе формул для силы и скорости термофореза в [14] предполагалось, что в поле внешнего градиента температуры ∇T_{∞} находится твердая двухслойная умеренно крупная сферическая частица с радиусом R_2 .

Коэффициент теплопроводности $\varepsilon_1 = \text{const}$ ядра радиуса R_1 может сильно отличаться по величине от коэффициента теплопроводности $\varepsilon_2 = \text{const}$ шарового слоя, окружающего ядро. Движение частицы происходит в однокомпонентной газообразной среде при малых относительных перепадах температуры в окрестности частицы [4, 8, 9, 12]. При этом коэффициенты теплопроводности κ_e и динамической вязкости μ_e можно считать постоянными величинами, а сам газ – сплошной средой [4, 8, 9, 12]. В этом случае при выводе выражения для скорости термофореза можно использовать гидродинамический метод [4, 8, 9, 12, 15-17]. В силу малости времен релаксации температурного и гидродинамических полей [4, 8, 12] описание процесса движения частицы проводится в квазистационарном приближении [8, 12, 15]. Движение частицы происходит при числе Рейнольдса $Re \ll 1$ и Пекле $Pe \ll 1$ [8, 12].

При рассмотренных условиях распределения в системе частица–газообразная среда массовой скорости \vec{V} , давления P и температур газа T_e , ядра T_1 и оболочки T_2 частицы описываются следующей системой уравнений переноса [8, 12, 15]:

$$\operatorname{div}\vec{V} = 0, \quad \operatorname{grad}P = \mu_e \Delta \vec{V}, \quad \Delta T_e = 0, \quad \Delta T_1 = 0, \quad \Delta T_2 = 0, \quad (1)$$

где символ Δ – оператор Лапласа. Так как частица имеет сферическую форму, решение системы (1) проводилось в сферической системе координат, начало которой совпадает с центром частицы. При этом предполагалось, что направление оси OZ совпадает с направлением внешнего градиента температуры и скорости газа на бесконечности [8, 9, 12]. Решение системы (1) проводилось совместно с граничными условиями (2)–(8) [8]:

$$V_r|_{r=R} = c_V Kn \frac{v_e}{RT_{\infty}} \left[\frac{\partial^2 T_e}{\partial \theta^2} + \operatorname{ctg} \theta \frac{\partial T_e}{\partial \theta} \right]_{r=R}, \quad (2)$$

$$V_{\theta}|_{r=R} = c_m Kn R \left[r \frac{\partial}{\partial r} \left(\frac{V_{\theta}}{r} \right) + \frac{1}{r} \frac{\partial V_r}{\partial \theta} \right] + K_{TS}^{(0)} (1 + Kn \beta'_R) \frac{v_e}{RT_{\infty}} \frac{\partial T_e}{\partial \theta} + K_{TS}^{(0)} Kn \beta_R \frac{v_e}{T_{\infty}} \frac{\partial^2 T_e}{\partial r \partial \theta} - \\ - K_{TS}^{(0)} Kn \beta_B \frac{v_e}{2T_{\infty}} R \left[r \frac{\partial}{\partial r} \left(\frac{1}{r^2} \frac{\partial T_e}{\partial \theta} \right) + \frac{1}{r} \frac{\partial^2 T_e}{\partial \theta \partial r} \right]_{r=R}, \quad (3)$$

$$T_e - T_2|_{r=R_2} = K_T^{(T)} Kn R \frac{\partial T_e}{\partial r} \Big|_{r=R_2}, \quad (4)$$

$$- \kappa_e \frac{\partial T_e}{\partial r} + \varepsilon_2 \frac{\partial T_2}{\partial r} \Big|_{r=R_2} = -c_q \kappa_e Kn \frac{1}{r} \left(\frac{\partial^2 T_e}{\partial \theta^2} + \operatorname{ctg} \theta \frac{\partial T_e}{\partial \theta} \right) \Big|_{r=R_2}, \quad (5)$$

$$T_1 \Big|_{r=R_1} = T \Big|_{r=R_1}, \quad \varepsilon_1 \frac{\partial T_1}{\partial r} \Big|_{r=R_1} = \varepsilon_2 \frac{\partial T_2}{\partial r} \Big|_{r=R_1}, \quad (6)$$

$$V_r|_{r \rightarrow \infty} = V_{\infty} \cos \theta, \quad V_{\theta}|_{r \rightarrow \infty} = -V_{\infty} \sin \theta, \quad P|_{r \rightarrow \infty} = P_{\infty}, \quad (7)$$

$$T_e|_{r \rightarrow \infty} = T_{\infty} + r \left| \vec{\nabla} T_{\infty} \right| \cos \theta, \quad (8)$$

где r и θ – сферические координаты [8, 15]; V_r, V_{θ} – компоненты скорости газа \vec{V} в сферической системе координат; $\nu_e = \mu_e / \rho_e$ – коэффициент кинематической вязкости; $Kn = \lambda / R_2$. Граничные условия на поверхности частицы (2)–(5) записаны с учетом всех эффектов, линейных по числу Кнудсена [8]. В (2)–(5) $K_{TS}^{(0)}, c_m$ – коэффициенты теплового и изотермического скольжений; $\beta'_R, \beta_R, \beta_B$ – поправки на кривизну и барнеттовское скольжение; c_q, c_V – газокинетические коэффициенты потоков тепла и среднемассового переноса, растекающихся в слое Кнудсена; $K_T^{(T)}$ – коэффициент скачка температуры [8]. Выражения для газокинетических коэффициентов $K_{TS}^{(0)}, c_m, c_q, c_V, \beta'_R, \beta_R, \beta_B$ и их конкретные значения приведены в [8]. В ходе решения граничной задачи (1)–(8) были получены выражения для распределений \vec{V}, P, T_e, T_1 и T_2 . После этого, при интегрировании по поверхности частицы нормальной и касательной составляющей тензора напряжений [8, 15], было получено следующее выражение для действующей на частицу полной силы \vec{F}_p , которая складывается из силы вязкого сопротивления \vec{F}_{μ} и термофоретической силы \vec{F}_T :

$$\vec{F}_p = \vec{F}_{\mu} + \vec{F}_T, \quad (9)$$

$$\vec{F}_{\mu} = -6\pi R \mu_e f_{\mu} \vec{U}_p, \quad \vec{F}_T = -6\pi R \mu_e f_{\mu} f_T \frac{v_e}{T_{\infty}} \nabla T_{\infty}, \quad (10)$$

где \vec{U}_p – скорость частицы относительно лабораторной системы координат;

$$c_V^* = c_V / K_{TS}^{(0)}, \quad y = r / R_2; \quad f_\mu = \frac{(1 + 2c_m Kn)}{(1 + 3c_m Kn)},$$

$$f_T = 2K_{TS}^{(0)} \left\{ [1 + Kn(\beta_R' + \beta_A)] - (1 + 6c_m Kn)c_V^* Kn \left[\kappa_e \Delta_1 + \varepsilon_2 K_T^{(T)} Kn \Delta_2 \right] + \right. \\ \left. + Kn(\beta_R - \beta_B) (\varepsilon_2 \Delta_2 - 2\kappa_e c_q Kn \Delta_1) \right\} / (1 + 2c_m Kn) d_e, \quad (11)$$

$$d = [2\kappa_e (1 - c_q Kn) \Delta_1 + \varepsilon_2 (1 + 2K_T^{(T)} Kn) \Delta_2]. \quad (12)$$

В выражениях (11), (12) $y_1 = R_1 / R_2$,

$$\Delta_1 = [\varepsilon_1 (1 - y_1^3) + \varepsilon_2 (2 + y_1^3)], \quad \Delta_2 = [\varepsilon_1 (1 + 2y_1^3) + 2\varepsilon_2 (1 - y_1^3)]. \quad (13)$$

После приравнивания полной силы \vec{F}_p (9) нулю, была получена следующая формула для скорости термофореза:

$$\vec{U}_T = -f_T \frac{V_e}{T_{e\infty}} \nabla T_{e\infty}. \quad (14)$$

Эта формула позволяет непосредственно оценивать термофоретическую скорость при известных ε_1 и ε_2 . Формула (14) была выведена с учетом в граничных условиях всех эффектов, линейных по числу Кнудсена [8]. Поэтому ее можно использовать при оценке термофоретической скорости и крупных и умеренно крупных частиц. При $R_1 = R_2$ это выражение переходит в формулу для скорости термофореза однородной по теплофизическим свойствам умеренно крупной частицы с коэффициентом теплопроводности, равным ε_1 [8]. При $R_1 \rightarrow 0$ выражение (14) также переходит в формулу для скорости термофореза однородной умеренно крупной частицы [8], но с коэффициентом теплопроводности, равным ε_2 . Из формулы (14) следует, что зависимость скорости термофореза \vec{U}_T от коэффициентов теплопроводности ядра и оболочки определяется входящим в

термофоретическую скорость скалярным коэффициентом $f_T = |\vec{U}_T| \left| \frac{V_e}{T_{e\infty}} |\nabla T_{e\infty}| \right|^{-1}$. Только

этот коэффициент непосредственно зависит от коэффициентов теплопроводности ε_1 и ε_2 . Проведенный с помощью выражения для f_T (11) численный анализ зависимости скорости термофореза \vec{U}_T (14) от коэффициентов теплопроводности ε_1 , ε_2 ядра и оболочки, в частности, показал, что:

1) скорость термофореза крупных и умеренно крупных двухслойных частиц может сильно зависеть от коэффициентов теплопроводности ядра, и оболочки (рис. 1-4);

2) увеличение коэффициентов теплопроводности ядра, и оболочки приводит к уменьшению скорости термофореза, а уменьшение ε_1 , ε_2 – к ее возрастанию (см. рис. 1, 2);

3) наибольшее влияние коэффициенты теплопроводности ядра и оболочки оказывают на движение крупных частиц (см. рис. 1, 2);

4) с увеличением радиуса ядра влияние его коэффициента теплопроводности ε_1 на термофоретическую скорость возрастает (см. рис. 1, 2). При этом в случае коэффициента теплопроводности ядра $\varepsilon_1 < \varepsilon_2$ скорость термофореза увеличивается (см. рис. 2), а при $\varepsilon_1 > \varepsilon_2$ скорость термофореза уменьшается (см. рис. 1, 2);

5) с увеличением числа Кнудсена (Kn) сильное влияние на термофоретическую скорость, сравнимое с влиянием коэффициентов теплопроводности ядра и оболочки, могут оказывать поверхностные газокинетические эффекты (см. рис. 3, 4). Это обстоятельство может привести к сближению величин скоростей термофореза частиц с числом Кнудсена, сравнимым с $Kn=0,3$. Сближение величины скоростей можно объяснить тем, что при увеличении числа Кнудсена на термофоретическое движение частиц все

большее влияние оказывают поверхностные газокинетические эффекты, а влияние коэффициентов теплопроводности ядра и оболочки уменьшается.

Кривые рисунков 1-4 показывают зависимость скорости термофореза от коэффициента ε_1 при $\varepsilon_2 = \text{const}$ (см. рис. 1), от ε_2 при $\varepsilon_1 = \text{const}$ (см. рис. 2) и числа Кнудсена (Kn) при $\varepsilon_2 = \text{const}$ (см. рис. 3, 4) двухслойных с однородными ядром и оболочкой крупных и умеренно крупных твердых сферических частиц, находящихся в воздухе с температурой $T_{\infty} = 20^{\circ}\text{C}$ и давлением $p_{\infty} = 101325$ Па.

Расчеты были проведены при приведенных в [8] следующих значениях газокинетических коэффициентов:

$$c_V = 0,971, c_m = 1,131, K_{TS}^{(0)} = 1,161, \beta'_R = -0,701, \beta_R = 3,731, \beta_B = 3,651, K_T^{(T)} = 2,179, \\ c_q = 0,548.$$

Эти значения были найдены при коэффициентах аккомодации тангенциальной проекции импульса и энергии, равных единице.

Сплошные линии на рисунках 1 и 2 построены при $y_1 = 0,8$, пунктирные – при $y_1 = 0,6$. Кривые рисунка 1 построены при $\varepsilon_2 = 0,23$ Вт/м·К (оболочка из бакелита). Кривые рисунка 2 построены при $\varepsilon_1 = 1,63$ Вт/м·К (ядро из анодного оксида алюминия). Кривые рисунков 3 и 4 построены при $y_1 = 0,8$ (рис. 3) и $y_1 = 0,6$ (рис. 4) при $\varepsilon_2 = 0,23$ Вт/м·К, отношении $\varepsilon_1/\varepsilon_2 = 1$ (кривые 4), $\varepsilon_1/\varepsilon_2 = e^{-4}$ (кривые 1), $\varepsilon_1/\varepsilon_2 = e^{-2}$ (кривые 2), $\varepsilon_1/\varepsilon_2 = e^{-1}$ (кривые 3), $\varepsilon_1/\varepsilon_2 = e$ (кривые 5), $\varepsilon_1/\varepsilon_2 = e^2$ (кривые 6), $\varepsilon_1/\varepsilon_2 = e^4$ (кривые 7).

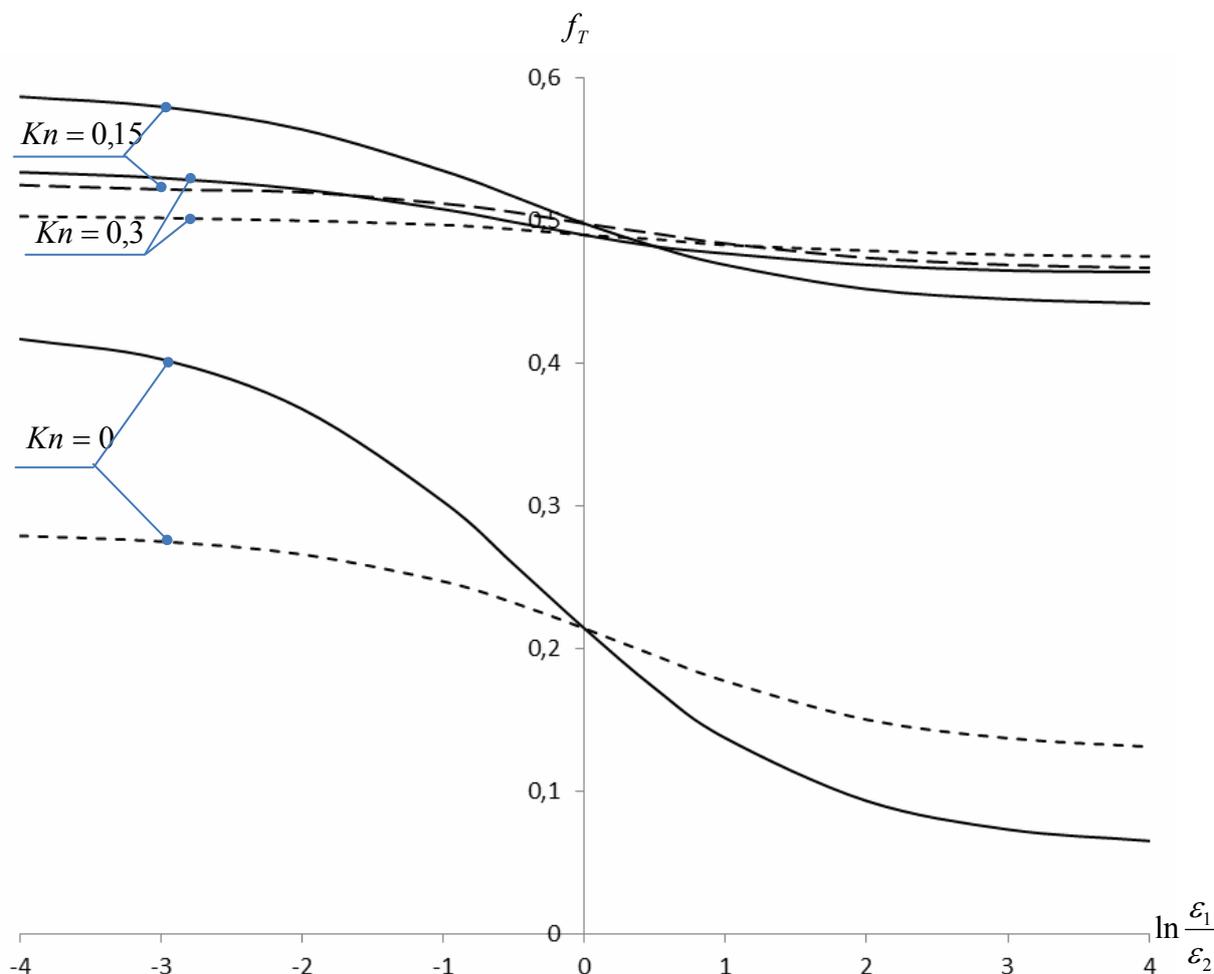


Рис. 1. Кривые зависимости коэффициента f_T от $\ln \varepsilon_1/\varepsilon_2$ при $\varepsilon_2 = 0,23$ Вт/м·К и $y_1 = 0,8$ (сплошные линии), $y_1 = 0,6$ (пунктирные линии)

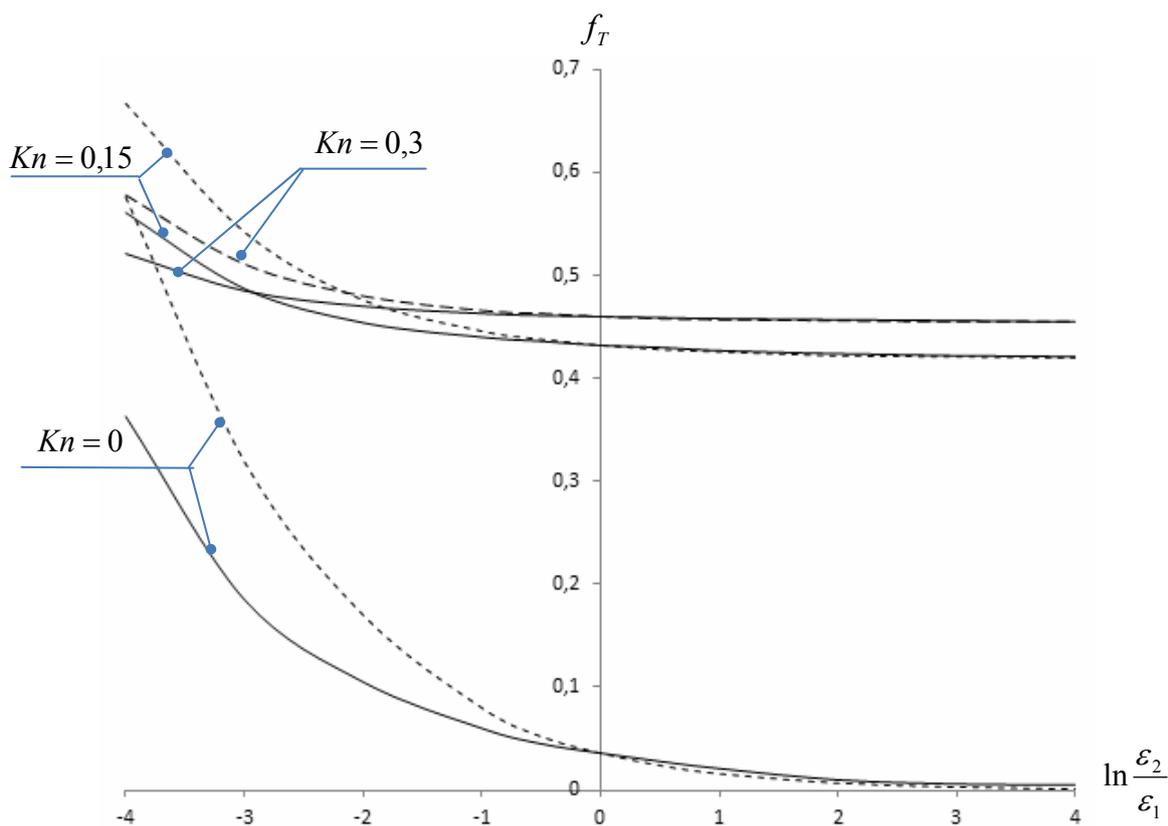


Рис. 2. Кривые зависимости коэффициента f_T от $\ln \varepsilon_2/\varepsilon_1$ при $\varepsilon_1=1,63$ Вт/м·К и $y_1=0,8$ (сплошные линии), $y_1=0,6$ (пунктирные линии)

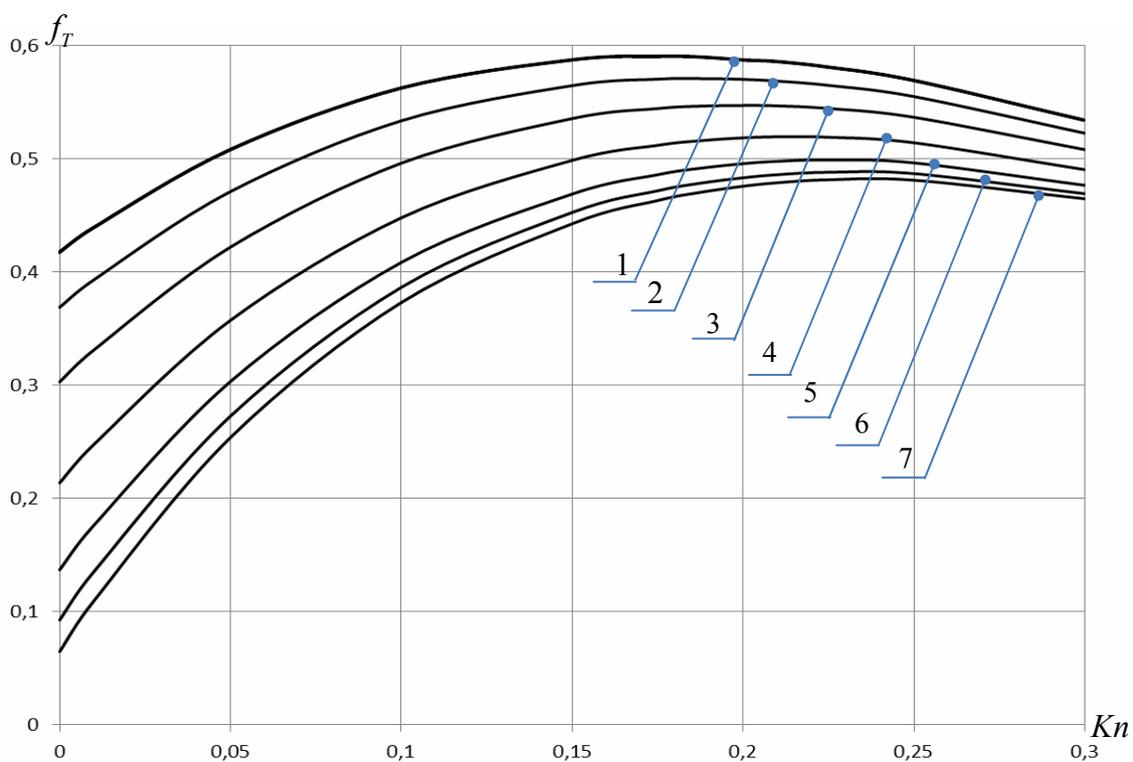


Рис. 3. Кривые зависимости коэффициента f_T от числа Кнудсена (Kn) при $\varepsilon_2=0,23$ Вт/м·К и $y_1=0,8$, отношениях $\varepsilon_1/\varepsilon_2=1$ (кривая 4), $\varepsilon_1/\varepsilon_2=e^{-4}$ (кривая 1), $\varepsilon_1/\varepsilon_2=e^{-2}$ (кривая 2), $\varepsilon_1/\varepsilon_2=e^{-1}$ (кривая 3), $\varepsilon_1/\varepsilon_2=e$ (кривая 5), $\varepsilon_1/\varepsilon_2=e^2$ (кривая 6), $\varepsilon_1/\varepsilon_2=e^4$ (кривая 7)

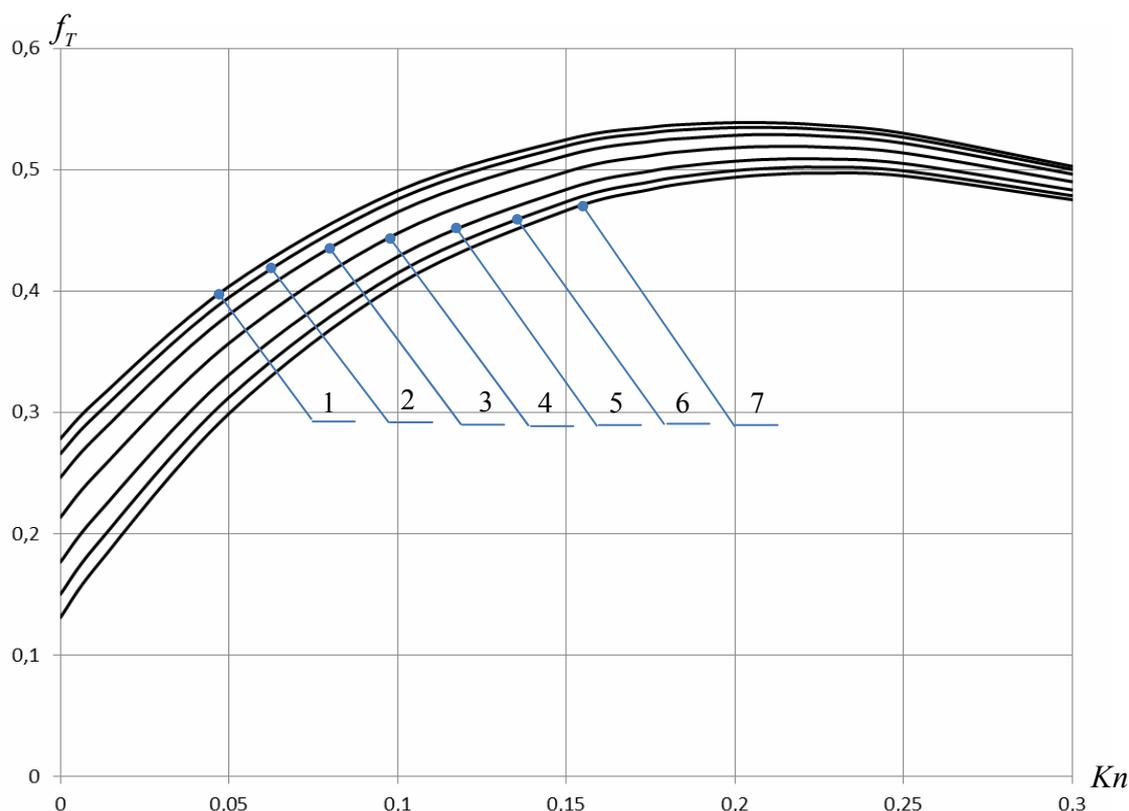


Рис. 4. Кривые зависимости коэффициента f_T от числа Кнудсена (Kn) при $\varepsilon_2=0,23$ Вт/м·К и $y_1=0,6$, отношениях $\varepsilon_1/\varepsilon_2=1$ (кривая 4), $\varepsilon_1/\varepsilon_2=e^{-4}$ (кривая 1), $\varepsilon_1/\varepsilon_2=e^{-3}$ (кривая 2), $\varepsilon_1/\varepsilon_2=e^{-1}$ (кривая 3), $\varepsilon_1/\varepsilon_2=e$ (кривая 5), $\varepsilon_1/\varepsilon_2=e^2$ (кривая 6), $\varepsilon_1/\varepsilon_2=e^4$ (кривая 7)

Примечания:

1. Грин Х., Лейн В. Аэрозоли – пыли, дымы и туманы. М.: Химия, 1969. 428 с.
2. Ивлев Л.С., Довгалюк Ю.А. Физика атмосферных аэрозольных систем. СПб.: НИИХ СПб., 1999. 194 с.
3. Мазин Н.П., Шметер С.М. Облака, строение и физика образования. Л.: Гидрометеиздат, 1983. 280 с.
4. Zheng F. Thermophoresis of spherical and non-spherical particles: a review of theories and experiment // Advances in Colloid and Interface Science. 2002. Vol. 97. P. 255-278.
5. Nanoparticles in medicine: Therapeutic applications developments / L. Zhang, F.X. Gu, J.M. Chan, A.Z. Wang // Clinical Pharmacology and Therapeutics. 2008. Vol. 83, No. 5. P. 761-769.
6. Вальдберг А.Ю., Исянов Л.М., Яламов Ю.И. Теоретические основы охраны атмосферного воздуха от загрязнений промышленными отходами: учеб. пособие. СПб.: «НИИОГАЗ-ФИЛЬТР», 1993. 235 с.
7. Шукин Е.Р., Шулиманова З.Л. Особенности осаждения за счет термофореза аэрозольных частиц в плоскопараллельных каналах со значительными поперечными перепадами температуры // ТВТ. 1994. Т. 32, № 5. С. 726-731.

References:

1. Green H., Lane V. Aerosols: dusts, smokes and fogs. M.: Chemistry, 1969. 428 pp.
2. Ivlev L.S., Dovgalyuk Yu.A. Physics of atmospheric aerosol systems. SPb: NIIC. SPb, 1999. 194 pp.
3. Mazin N.P., Shmeter S.M. Clouds, structure and physics of formation. L: Hidrometeoizdat, 1983. 280 pp.
4. Zheng F. Thermophoresis of spherical and non-spherical particles: a review of theories and experiment // Advances in Colloid and Interface Science. 2002. Vol. 97. P. 255-278.
5. Nanoparticles in medicine: Therapeutic applications developments / L. Zhang, F.X. Gu, J.M. Chan, A.Z. Wang // Clinical Pharmacology and Therapeutics. 2008. Vol. 83, No. 5. P. 761-769.
6. Valdberg A.Yu., Isyanov L.M., Yalamov Yu.I. Theoretical foundations of protection of atmospheric air from pollution by industrial aerosols: a manual. SPb.: NIIOGAZ-FILTR, 1993. 235 pp.
7. Shchukin E.R., Shulimanova Z.L. Features of sedimentation due to thermophoresis of aerosol particles in plane-parallel channels with considerable cross-section temperature drops // Thermophysics of High Temperatures. 1994. Vol. 32, No.

8. Поддоскин А.Б., Юшканов А.А., Яламов Ю.И. Теория термофореза умеренно крупных аэрозольных частиц // ЖТФ. 1982. Т. 52, вып. 11. С. 2253-2661.
9. Шукин Е.Р., Мягков Ю.К., Островский Ю.К. Теория движения летучих и нелетучих двухслойных аэрозольных частиц в газовых смесях с неоднородным // ЖТФ. 1978. Т. 52, № 6. С. 1545.
10. Нелинейная оптика атмосферы / Ю.Э. Гейнц, А.А. Землянов, В.Е. Зуев, А.И. Кабанов, И.А. Погодаев. М.: Изд-во СО РАН, 1999. 260 с.
11. Шукин Е.Р., Трайтак С.Д. О роли термодиффузиофоретического и броуновского движения при захвате аэрозольных частиц каплями // Физика атмосферы и океана. 1979. Т. 15, № 1. С. 122-125.
12. Шукин Е.Р. О движении аэрозольных частиц с неоднородным распределением тепловых источников в поле внешних градиентов температуры и концентрации // ЖТФ. 1980. Т. 50, вып. 6. С. 1332-1335.
13. Яламов Ю.И., Чермошентцева О.Ф. Гидродинамическая теория двухслойной аэрозольной частицы в неоднородной по температуре газовой смеси // ТВТ. 1992. Т. 30. С. 422-425.
14. Шукин Е.Р. Движение двухслойной умеренно крупной сферической аэрозольной частицы в неоднородной по температуре газообразной среде // Сборник научных трудов по материалам Международной научно-практической конференции «Актуальные проблемы развития науки и образования», 5 мая 2014 г. Ч. 1. М., 2014. С. 123-126.
15. Ландау Л.Д., Лившиц Е.М. Гидродинамика. М.: Наука, 1988. 733 с.
16. Малай Н.В. К вопросу о термофорезе твердой сферической частицы в жидкости // Изв. АН РФ МЖГ. 2003. № 6. С. 145-154.
17. Малай Н.В., Шукин Е.Р. К вопросу о термофорезе твердой аэрозольной частицы сферической формы // ЖТФ. 2003. Т. 73, вып. 9. С. 39-43.
5. P. 726-731.
8. Poddoskin A.B., Yushkanov A.A., Yalamov Yu.I. Theory of thermophoresis of moderately large aerosol particles // ZhTF. 1982. Vol. 52, Iss. 11. P. 2253-2661.
9. Shchukin E.R., Myagkov Yu.K., Ostrovskiy Yu.K. Theory of movement of flying and non-flying two-layer aerosol particles in gas mixtures with non-uniform distribution of temperature and concentration // ZbTF. 1978. Vol. 52, No. 6. P. 1545.
10. Nonlinear optics of atmosphere / Yu.E. Geynts, A.A. Zemlyanov, V.E. Zuev, A.I. Kabanov, I.A. Pogodaev. M.: Publishing House of the RAS Siberian Branch, 1999. 260 pp.
11. Shchukin E.R., Traytak S.D. On the role of thermodiffusiophoretic and Brownian motion when capturing aerosol particles by drops // Atmospheric and Oceanic Physics. 1979. Vol. 15, No. 1. P. 122-125.
12. Shchukin E.P. On the movement of aerosol particles with non-uniform distribution of thermal sources in the field of external gradients of temperature and concentration // ZhTF. 1980. Vol. 50, Iss. 6. P. 1332-1335.
13. Yalamov Yu.I., Chermoshentseva O.F. The hydrodynamic theory of a two-layer aerosol particle in a gas mixture having non-uniform temperature // Thermophysics of High Temperatures. 1992. Vol. 30. P. 422-425.
14. Shchukin E.R. Movement of a two-layer moderately large spherical aerosol particle in the gaseous environment having non-uniform temperature / Collection of proceedings based on materials of the International scientific and practical conference «Actual problems of development of science and education». May, 5th, 2014. Pt. 1. M., 2014. P. 123-126.
15. Landau L.D., Livshits E.M. Hydrodynamics. M.: Nauka, 1988. 733 pp.
16. Malay N.V. On the problem of thermophoresis of a solid spherical particle in liquid // News of the RF AS MZhG. 2003. No. 6. P. 145-154.
17. Malay N.V., Shchukin E.R. On the problem of thermophoresis of a solid aerosol particle of a spheroidal form // ZhTF. 2003. Vol. 73, Iss. 9. P. 39-43.