



ФИЗИКА PHYSICS

УДК 533.72

ТЕРМОФОРЕТИЧЕСКОЕ ДВИЖЕНИЕ ТВЕРДЫХ ДВУХСЛОЙНЫХ УМЕРЕННО КРУПНЫХ ЦИЛИНДРИЧЕСКИХ АЭРОЗОЛЬНЫХ ЧАСТИЦ С ПОСТОЯННЫМИ КОЭФФИЦИЕНТАМИ ТЕПЛОПРОВОДНОСТИ ЯДРА И ОБОЛОЧКИ

THERMOPHORETIC MOTION OF A TWO-LAYERS OF MODERATELY LARGE SOLID CYLINDRICAL AEROSOL PARTICLES WITH CONSTANT COEFFICIENTS OF THERMAL CONDUCTIVITY OF NUCLEUS AND SHELL

¹А.Б. Поддоскин, ²Н.В. Малай, ³Е.Р. Щукин
A.B. Poddoskin, N.V. Malay, E.R. Shchukin

¹Московский государственный технический университет им. Н.Э. Баумана, Россия, 105005, г. Москва, 2-я Бауманская ул., 5

²Белгородский национальный исследовательский университет, Россия, 308015, г.Белгород, ул. Победы, 85

³Объединенный институт высоких температур РАН, Россия, 125412, Москва, ул. Ижорская, 13

Moscow State Technical University, 5 Baumanskaya 2-ya St, Moscow, 105005, Russia

Belgorod National Research University, 85 Pobedy St, Belgorod, 308015, Russia

Joint Institute for High temperatures of Russian Academy of Sciences, 13 Izhorskaya St, Moscow, 125412, Russia

E-mail: malay@bsu.edu.ru; evgrom@yandex.ru

Аннотация

В работе получены выражения для скорости термофореза твердой двухслойной длинной умеренно крупной цилиндрической аэрозольной частицы с отличающимися по величине постоянными коэффициентами теплопроводности ядра и оболочки. С помощью полученных формул можно также оценивать величину термофоретической скорости и неоднородных по теплопроводности сильно вытянутых крупных и умеренно крупных твердых двухслойных аэрозольных частиц с формой поверхности, близкой к цилиндрической.

Abstract

In article obtained the expressions for the velocity of thermophoresis of a two-layer moderately solid cylindrical aerosol particles with different the values of the constant coefficients of thermal conductivity of the nucleus and shell. Using the obtained formulas can also be estimated thermophoresis velocity and inhomogeneous at the thermal conductivity of strongly elongated large and moderately large solid aerosol two-layer particles with a surface shape close to the cylindrical.

Ключевые слова: термофорез двухслойной цилиндрической частицы.

Keywords: the thermophoresis of a double layered cylindrical particles.

Введение

Естественные и антропогенные аэрозоли, наряду с однородными, могут содержать двухслойные аэрозольные частицы [1-4,16,17], которые состоят из ядра и оболочки. Такие частицы могут образовываться, в частности, при конденсации на поверхности ядер молекул вещества оболочек [1-4] и в результате протекания на поверхности ядер химических реакций [1-4]. Ядра и оболочки 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 качестве материала регенераторов [5] или, когда требуется изолировать ядра от воздействия окружающей среды [1-4] и закрепить на внешнем слое специфические группы реагентов для направленной доставки лекарственных препаратов [18]. В связи с этим изучение различных вида закономерностей, в частности, и упорядоченного движения двухслойных аэрозольных частиц в несущих газообразных средах представляет как научный, так и практический интерес. В газообразных средах с, вызванном внешним градиентом температуры, неоднородным распределением температуры, упорядоченное движение двухслойных аэрозольных частиц может происходить под действием, молекулярной природы [1,4,6-11], термофоретической силы [16,17]. Эта сила перемещает частицы в области с более низкой температурой. Вызываемое термофоретической силой движение частиц называют термофоретическим. Оно обусловлено передачей частицам молекулами неоднородной по температуре газообразной среды не скомпенсированного импульса [1,4,6-11]. Когда термофоретическая сила становится равной по величине силе сопротивления среды движению частицы, то при этом частица начинает двигаться равномерно со скоростью, называемой термофоретической.

Термофоретическая сила может оказывать значительное влияние на процесс осаждения аэрозольных частиц в каналах тепло- и массообменников [1,13,14], на движение частиц в зонах просветления аэродисперсных систем [2,4] и в окрестностях, вымывающих частицы, капель [8]. Её можно использовать при проведении тонкой очистки небольших объёмов газов, отборе аэрозольных проб, нанесении, заданной толщины, специальных покрытий из аэрозольных частиц [1], получении методом VAD высококачественных оптических волокон [19].

Следует отметить, что скорости термофореза двухслойных крупных и умеренно крупных частиц [1,16,17], в отличие от малых частиц [15], непосредственно зависят от коэффициентов теплопроводности χ_1 , χ_2 их ядер и оболочек. К крупным, умеренно крупным и малым аэрозольным частицам относят, соответственно, частицы со следующими характерными числами Кнудсена: $Kn = \lambda / a \leq 0,01$; $0,01 \leq Kn \leq 0,3$; $Kn \gg 1$, где λ – средняя длина свободного пробега молекул газа, a – характерный размер частицы. Коэффициенты теплопроводности χ_1 и χ_2 двухслойных аэрозольных частиц могут иметь произвольные значения и значительно отличаться по величине. В связи с этим коэффициенты теплопроводности и ядра, и оболочки могут оказывать сильное влияние на скорость термофореза крупных и умеренно крупных двухслойных частиц. Поэтому самостоятельный интерес представляет вывод формул для скорости термофореза, встречающихся на практике, разного вида двухслойных крупных и умеренно крупных аэрозольных частиц, позволяющих оценивать термофоретическую скорость частиц с учётом влияния на их движение коэффициентов теплопроводности ядер и оболочек [1,3,4,21]. В работах [16,17] были найдены формулы для скорости термофореза в однокомпонентном газе твёрдых двухслойных умеренно крупных сферических аэрозольных частиц с постоянными коэффициентами теплопроводности ядра и оболочки. Вывод формул был проведён гидродинамическим методом [20,21]. При этом взаимодействие молекул газа с поверхностью частицы более полно было учтено в работе [16] с помощью специальных газокинетических граничных условий, приведённых в [6]. В настоящей работе получена формула для скорости термофореза твёрдой двухслойной длинной умеренно крупной цилиндрической аэрозольной частицы с



отличающимися по величине постоянными коэффициентами теплопроводности ядра и оболочки. С помощью этой формулы можно оценивать также величину термофоретической скорости и неоднородных по теплопроводности сильно вытянутых крупных и умеренно крупных твёрдых двухслойных аэрозольных частиц с формой поверхности, близкой к цилиндрической. Такие частицы могут образовываться в промышленности, например, при получении композиционных материалов и протекании природных, в частности, вулканических процессов [22,23]. С помощью этой формулы было показано, что при увеличении (уменьшении) коэффициентов теплопроводности ядра и оболочки умеренно крупной цилиндрической частицы её скорость термофореза соответственно уменьшается (увеличивается).

Постановка задачи

В неоднородном по температуре однокомпонентном газе в поле внешнего градиента температуры ∇T_{∞} происходит установившееся термофоретическое движение [1,16,17] двухслойной, с цилиндрическим ядром радиуса R_1 , умеренно крупной твердой цилиндрической частицы. Ось симметрии частицы перпендикулярна направлению ∇T_{∞} . Длина частицы L много больше её радиуса R_2 . Коэффициент теплопроводности ядра $\chi_1 = const$ может сильно отличаться по величине от коэффициента теплопроводности $\chi_2 = const$ цилиндрического слоя, окружающего ядро. На величину ∇T_{∞} наложено ограничение: $R_2 |\nabla T_{\infty}| / T_e \ll 1$. Движение частицы происходит при малых относительных перепадах температуры T_e в окрестности частицы. При этом газ можно считать несжимаемым, а его плотность ρ_e и коэффициенты динамической вязкости μ_e и теплопроводности χ_e - постоянными величинами. Описание процесса термофоретического движения проводится в квазистационарном приближении в силу малости времён релаксации температурных и гидродинамических полей [16,17,20,21]. Движение частицы происходит при малых числах Рейнольдса $Re \ll 1$ и Пекле $Pe \ll 1$. При таких числах Пекле и Рейнольдса термофоретическое движение частиц может происходить в реальных аэрозолях [1-4,6-11,21]. Когда числа $Re \ll 1$ и $Pe \ll 1$ в уравнениях Навье-Стокса и переноса тепла [20] можно пренебречь конвективными членами (т.е. не учитывать влияние движения среды на распределения температуры, давления и массовой скорости в окрестности частицы). При этом, решая гидродинамическим методом, задачу о термофоретическом движении аэрозольной частицы можно использовать уравнения Стокса и линеаризованные уравнения теплопереноса.

В случае установившегося термофоретического движения частицы, действующая на частицу, полная сила равна нулю. При этом термофоретический перенос частицы происходит при постоянном давлении газа в её окрестности. В этом случае, при решении задачи об установившемся термофоретическом движении, в уравнениях Стокса [20] можно не учитывать давление. Это обстоятельство существенно упрощает вывод формул для скорости термофореза.

Термофоретическая скорость. Анализ полученных результатов

При рассмотренных условиях решение задачи о скорости термофореза длинной умеренно крупной двухслойной цилиндрической частицы удобно проводить в цилиндрической системе координат, ось OZ которой совпадает с осью вращения цилиндра, а направление полярной оси OX совпадает с направлением ∇T_{∞} . Определенная в такой системе координат массовая скорость установившегося течения газа на бесконечности равна по величине скорости термофореза частицы, но противоположна ей по направлению.

В цилиндрической системе координат, в системе частица – газообразная среда распределения массовой скорости \mathbf{V} , температур газа T_e , ядра T_1 и оболочки T_2 описываются следующей системой уравнений:



$$\begin{aligned} \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} (rV_r) + \frac{1}{r} \frac{\partial V_\varphi}{\partial \varphi} = 0, \quad \left\{ \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} (r \frac{\partial}{\partial r} V_r) + \frac{1}{r^2} \frac{\partial^2 V_r}{\partial \varphi^2} - \frac{V_r}{r^2} - \frac{2}{r^2} \frac{\partial V_\varphi}{\partial \varphi} \right\} = 0, \\ \left\{ \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} (r \frac{\partial}{\partial r} V_\varphi) + \frac{1}{r^2} \frac{\partial^2 V_\varphi}{\partial \varphi^2} - \frac{V_\varphi}{r^2} + \frac{2}{r^2} \frac{\partial V_r}{\partial \varphi} \right\} = 0, \quad \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} (r \frac{\partial T_e}{\partial r}) + \frac{1}{r^2} \frac{\partial^2 T_e}{\partial \varphi^2} = 0, \\ \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} (r \frac{\partial T_1}{\partial r}) + \frac{1}{r^2} \frac{\partial^2 T_1}{\partial \varphi^2} = 0, \quad \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} (r \frac{\partial T_2}{\partial r}) + \frac{1}{r^2} \frac{\partial^2 T_2}{\partial \varphi^2} = 0, \end{aligned} \quad (1)$$

где r и φ - цилиндрические координаты [20], V_r и V_φ - компоненты массовой скорости в цилиндрической системе координат. Систему уравнений (1) нужно решать совместно с граничными условиями (2) – (7):

$$V_r|_{r=R_2} = C_V Kn \frac{v_e}{R_2 T_{eo}} \frac{\partial^2 T_e}{\partial \varphi^2} \Big|_{r=R_2}, \quad (2)$$

$$\begin{aligned} V_\varphi|_{r=R_2} = C_m Kn R_2 \left[r \frac{\partial}{\partial r} \left(\frac{V_\varphi}{r} \right) + \frac{1}{r} \frac{\partial V_r}{\partial \varphi} \right] + K_{TS}^{(0)} (1 + Kn \beta_R) \frac{v_e}{R_2 T_{eo}} \frac{\partial T_e}{\partial \varphi} + K_{TS}^{(0)} Kn \beta_R \frac{v_e}{T_{eo}} \frac{\partial^2 T_e}{\partial r \partial \varphi} - \\ - K_{TS}^{(0)} Kn \beta_B \frac{v_e}{2T_{eo}} R_2 \left[r \frac{\partial}{\partial r} \left(\frac{1}{r^2} \frac{\partial T_e}{\partial \varphi} \right) + \frac{1}{r} \frac{\partial^2 T_e}{\partial \varphi \partial r} \right] \Big|_{r=R_2} \end{aligned} \quad (3)$$

$$-\chi_e \frac{\partial T_e}{\partial r} + \chi_2 \frac{\partial T_2}{\partial r} \Big|_{r=R_2} = -C_q \chi_e Kn \frac{1}{r} \frac{\partial^2 T_e}{\partial \varphi^2} \Big|_{r=R_2}, \quad T_e - T_2 \Big|_{r=R_2} = C_I Kn R_2 \frac{\partial T_e}{\partial r} \Big|_{r=R_2} \quad (4)$$

$$\chi_1 \frac{\partial T_1}{\partial r} \Big|_{r=R_1} = \chi_2 \frac{\partial T_2}{\partial r} \Big|_{r=R_1}, \quad T_1 \Big|_{r=R_1} = T_2 \Big|_{r=R_1} \quad (5)$$

$$V_\varphi|_{r \rightarrow \infty} = -V_{\infty} \sin \varphi, \quad V_r|_{r \rightarrow \infty} = V_{\infty} \cos \varphi. \quad (6)$$

$$T_e|_{r \rightarrow \infty} = T_{eo} + r |\nabla T_{eo}| \cos \varphi \quad (7)$$

где $v_e = \mu_e / \rho_e$ - коэффициент кинематической вязкости, $Kn = \lambda / R_2$. Граничные условия на поверхности частицы (2)-(4) записаны с учётом всех эффектов, линейных по числу Кнудсена. В (2)-(4) $K_{TS}^{(0)}$, C_m - коэффициенты теплового и изотермического скольжений; β_R, β_R' и β_B - поправки на кривизну и барнеттовское скольжение; C_q, C_V - газокинетические коэффициенты потоков тепла и среднемассового переноса, растекающихся в слое Кнудсена; коэффициент C_I - коэффициент скачка температуры [6]. Выражения для газокинетических коэффициентов $K_{TS}^{(0)}, C_m, C_q, C_V, \beta_R, \beta_R', \beta_B$, приведены в [6], где они получены в ходе решения в слое Кнудсена уравнения Больцмана. При коэффициентах аккомодации тангенциальной проекции импульса и энергии молекул равных единице значения этих коэффициентов равны [6]:

$$\begin{aligned} C_V = 0.971, C_m = 1.131, K_{TS}^{(0)} = 1.161, \beta_R' = -0.701, \beta_R = 3.731, \beta_B = 3.651, K_T^{(T)} = 2.179, \\ C_q = 0.548. \end{aligned}$$

В результате решения граничной задачи (1)- (7), было получено следующее выражение для скорости термофореза умеренно крупных цилиндрических двухслойных частиц:

$$U_T = -v_e \frac{(\nabla T_{eo})}{T_{eo}} f_T \quad (8)$$



$$f_T = K_{TS}^{(0)} \frac{(1 + (\beta_R + \beta_B)Kn - (1 + 4C_m Kn)C_V Kn)\Delta_{01} + (\beta_R - \beta_B)Kn\Delta_{02}}{(1 + 2C_m Kn) \left(\left(1 + \frac{\chi_2}{\chi_1}\right) R_2^2 \Delta_{22} + \left(1 - \frac{\chi_2}{\chi_1}\right) R_1^2 \Delta_{12} \right)}, \quad \Delta_{11} = (1 - C_i Kn) + (1 + C_q Kn) \frac{\chi_e}{\chi_2},$$

$$\Delta_{12} = (1 + C_i Kn) - (1 - C_q Kn) \frac{\chi_e}{\chi_2}, \quad \Delta_{21} = (1 - C_i Kn) - (1 + C_q Kn) \frac{\chi_e}{\chi_2}, \quad \Delta_{22} = (1 + C_i Kn) + (1 - C_q Kn) \frac{\chi_e}{\chi_2},$$

$$\Delta_{01} = \left(1 + \frac{\chi_2}{\chi_1}\right) R_2^2 \left(C_i Kn + \frac{\chi_e}{\chi_2}\right) + \left(1 - \frac{\chi_2}{\chi_1}\right) R_1^2 \left(C_i Kn - \frac{\chi_e}{\chi_2}\right), \quad \Delta_{02} = \left(1 + \frac{\chi_2}{\chi_1}\right) R_2^2 \Delta_{21} + \left(1 - \frac{\chi_2}{\chi_1}\right) R_1^2 \Delta_{11}.$$

Найденная формула (8) позволяет непосредственно оценивать термофоретическую скорость при известных χ_1 и χ_2 . Она была выведена с учетом в граничных условиях всех эффектов, линейных по числу Кнудсена [6]. Поэтому её можно использовать при оценке термофоретической скорости и крупных и умеренно крупных частиц. При $R_1 \rightarrow R_2$ формула (8) переходит в более простую формулу для скорости термофореза однородной по теплофизическим свойствам умеренно крупной цилиндрической частицы с коэффициентом теплопроводности, равным χ_1 [7,10]. При $R_1 \rightarrow 0$ выражение (8) также переходит в формулу для скорости термофореза однородной умеренно крупной частицы [7,10, 24-26], но с коэффициентом теплопроводности, равным χ_2 . Из формулы (8) следует, что зависимость скорости термофореза U_T от коэффициентов теплопроводности ядра и оболочки определяется, входящим в термофоретическую скорость, скалярным коэффициентом

$$f_T = |U_T| \frac{v_e}{T_{\infty}} |\nabla T_{\infty}|. \text{ Только этот коэффициент непосредственно зависит от коэффициентов}$$

теплопроводности χ_1 и χ_2 . Кривые зависимости коэффициента f_T от коэффициента теплопроводности χ_1 ядра при $\chi_2 = 0,23$ Вт/мК (оболочка из бакелита) и коэффициента теплопроводности χ_2 оболочки при $\chi_1 = 1,63$ Вт/мК (ядро из анодного оксида алюминия) крупных и умеренно крупных твёрдых цилиндрических аэрозольных частиц, находящихся в воздухе с температурой $T_{\infty} = 20$ °С и давлением $P_{\infty} = 101325$ Па, приведены, соответственно, на рис 1,2. При проведении оценок были использованы значения газокинетических коэффициентов, найденные в [6]. Из рис. 1,2 следует, что:

1) скорость термофореза крупных и умеренно крупных двухслойных частиц может сильно зависеть от коэффициентов теплопроводности и ядра и оболочки (рис. 1,2);

2) увеличение коэффициентов теплопроводности и ядра и оболочки приводит к уменьшению скорости термофореза, а уменьшение χ_1, χ_2 - к её возрастанию (рис. 1,2);

3) с увеличением радиуса ядра, влияние его коэффициента теплопроводности χ_1 на термофоретическую скорость возрастает (рис. 1,2). При этом в случае коэффициента теплопроводности ядра $\chi_1 < \chi_2$ скорость термофореза увеличивается, а при $\chi_1 > \chi_2$ скорость термофореза уменьшается;

4) с увеличением числа Кнудсена (Кп) влияние на термофоретическую скорость поверхностных газокинетических эффектов возрастает (рис 1,2). 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 всё большее влияние оказывают поверхностные газокинетические эффекты.

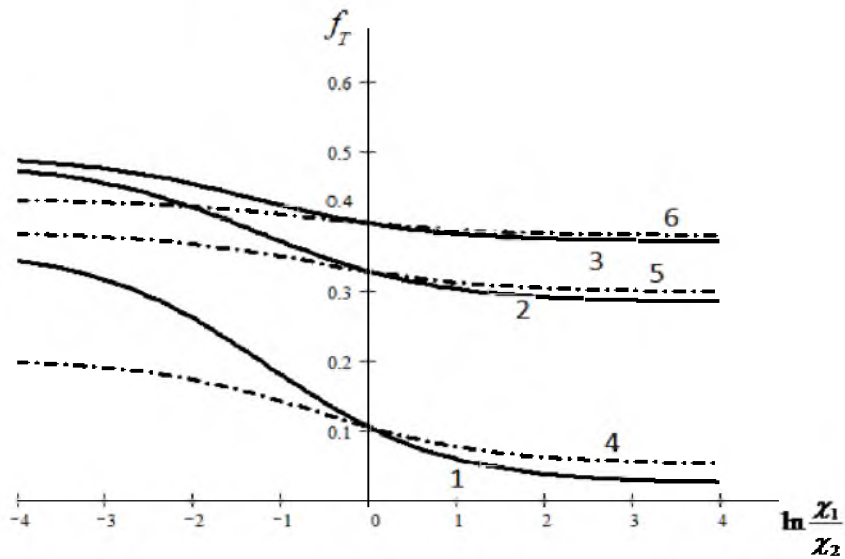


Рис. 1. Кривые зависимости коэффициента f_T от $\ln \chi_1 / \chi_2$ при $\chi_2 = 0,23 \text{ Вт/м} \cdot \text{К}$ и $R_1/R_2=0,8$ (линии 1, 2, 3 соответствуют $Kn=0, Kn=0,15, Kn=0,3$), $R_1/R_2=0,6$ (линии 4, 5, 6 соответственно $Kn=0, Kn=0,15, Kn=0,3$)

Fig. 1. Curves of the coefficient f_T from $\ln \chi_1 / \chi_2$ with $\chi_2 = 0,23 \text{ W/m} \cdot \text{K}$ and $R_1/R_2=0,8$ (lines 1, 2, 3 correspond to $Kn=0, Kn=0.15, Kn=0.3$), $R_1/R_2=0.6$ (lines 4, 5, 6, correspond to $Kn=0, Kn=0.15, Kn=0.3$)

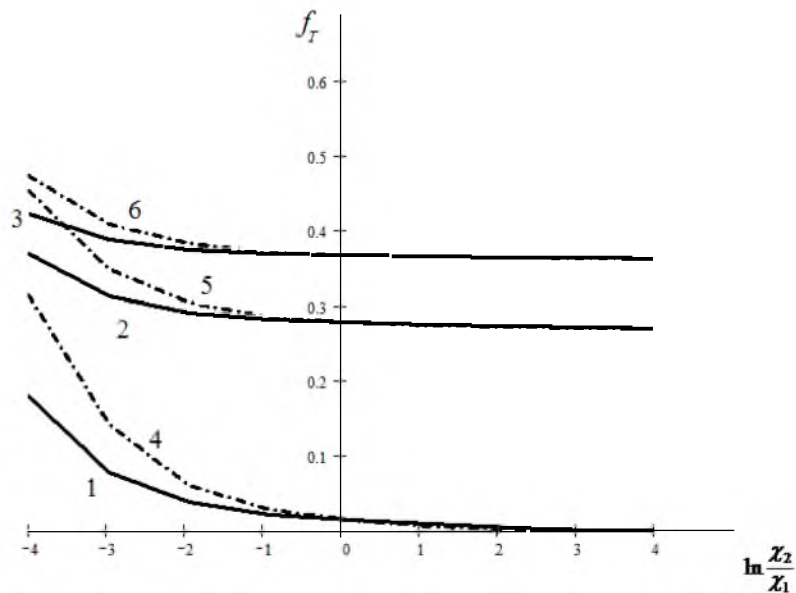


Рис. 2. Кривые зависимости коэффициента f_T от $\ln \chi_2 / \chi_1$ при $\chi_1 = 1,63 \text{ Вт/м} \cdot \text{К}$ и $R_1/R_2=0,8$ (линии 1, 2, 3 соответственно $Kn=0, Kn=0,15, Kn=0,3$), $R_1/R_2=0,6$ (линии 4, 5, 6 соответственно $Kn=0, Kn=0,15, Kn=0,3$)

Fig. 2. Curves of the coefficient f_T from f_T от $\ln \chi_2 / \chi_1$ with $\chi_1 = 1,63 \text{ W/m} \cdot \text{K}$ and $R_1/R_2=0,8$ (lines 1, 2, 3 correspond to $Kn=0, Kn=0.15, Kn=0.3$), $R_1/R_2=0.6$ (lines 4, 5, 6, correspond to $Kn=0, Kn=0.15, Kn=0.3$)



Список литературы References

1. Вальдберг А.Ю., Исянов Л.М., Яламов Ю.И. 1993. Теоретические основы охраны атмосферного воздуха от загрязнений промышленными отходами. Учебное пособие. СПб, 235.
Valdberg A. Yu., Isyanov L.M., Yalamov Yu. I. 1993. Theoretical bases of protection of atmospheric air pollution from industrial wastes. Textbook. SPb, 235.
2. Гейнц Ю.Э., Землянов А.А., Зуев В.Е., Кабанов А.И., Погодаев И.А. 1999. Нелинейная оптика атмосферы, Изд-во СО РАН, 260.
Geints Yu. E., Zemlyanov A. A., Zuev V. E., Kabanov A. I., Pogodaev A. I. 1999. Nonlinear optics of the atmosphere. Izd-vo SO RAN, 260.
3. Грин Х., Лейн В. 1969. Аэрозоли – пыли, дымы и туманы. М., Химия, 428.
Green, H., Lane B. 1969. Aerosols – dust, fumes and mists. Moscow, Khimiya, 428.
4. Ивлев Л.С., Довгальук Ю.А. Физика атмосферных аэрозольных систем. СПб: НИИХ СПб, 1999. 194.
Ivlev L. S., Dovgalyuk Yu. A. 1999. Physics of atmospheric aerosol systems. SPb: SPb NIEH, 194.
5. Numazava T., Kamiya K., Hiratsuka Y. 2007. Cooling Performance of Multilayer Ceramic Regenerator Materials. Cryocoolers 14. New York: Kluwer Academic: 362–372.
6. Поддоскин А.Б., Юшканов А.А., Яламов Ю.И. 1982. Теория термофореза умеренно крупных аэрозольных частиц. ЖТФ, 52(11): 2253-2661.
Poddocin A. B., Yushkanov A. A., Yalamov Y. I. 1982. Theory of thermophoresis of moderately large aerosol particles. Technical physics, 52(11): 2253-2661.
7. Яламов Ю.И., Афанасьев А.М. 1977. Термофорез цилиндрической аэрозольной частицы в режиме со скольжением. ЖТФ, 47(9) :1998-2004.
Yalamov Y. I., Afanasiev A. M. 1977. Thermophoresis of a cylindrical aerosol particles in the regime with slip. Technical physics, 47(9):1998-2004.
8. Щукин Е.Р., Трайтак С.Д. 1979. О роли термодиффузионного броуновского движения при захвате аэрозольных частиц каплями. Физика атмосферы и океана, 15(1): 122-125.
Shchukin E. R., Tritak S. D. 1979. On the role of thermodiffusion Brownian motion and the capture of aerosol particles by drops. Physics of atmosphere and ocean, 15(1): 122-125.
9. Яламов Ю.И., Сафиуллин Р.А. 1994. К теории термофореза цилиндрической аэрозольной частицы в умеренно разреженном газе. ТВТ, 32(2) : 271-275.
Yalamov Y. I., Safiullin R. A. 1994. On the theory of thermophoresis of a cylindrical aerosol particle in a moderately rarefied gas. TVT, 32(2): 271-275.
10. Huan J.Keh., Hung J.Tu. 2001. Thermophoresis and photophoresis of cylindrical particles. Colloids and Surfaces A: Physicochem. Eng. Aspects, 176: 213-223.
11. Zheng F. 2002. Thermophoresis of spherical and non-spherical particles: a review of theories and experiments. Advances in Colloid and Interface Science, 97: 255-278.
12. Щукин Е.Р. 1980. О движении аэрозольных частиц с неоднородным распределением тепловых источников в поле внешних градиентов температуры и концентрации, 50(6): 1332-1335.
Shchukin E. R. 1980. On the motion of aerosol particles with inhomogeneous distribution of heat sources in the field of external gradients of temperature and concentration. Technical physics, 50(6): 1332-1335.
13. Щукин Е.Р., Шулиманова З.Л. 1994. Особенности осаждения за счёт термофореза аэрозольных частиц в плоскопараллельных каналах со значительными поперечными перепадами температуры. ТВТ, 32(5): 726-731.
Shchukin E. R., Suleimanova Z. L. 1994. Characteristics of deposition due to thermophoresis of aerosol particles in plane-parallel channels with substantial transverse temperature drops. TVT, 32(5): 726-731.
14. Berger C., Harvath H., Scindler W. 1995. The deposition of soot particles from hot gas streams through pipes. Journal of Aerosol Science, 26 : 211-218.
15. Марков М.Г., Щукин Е.Р. 1984. Термодиффузионный термофорез малой летучей аэрозольной частицы в многокомпонентной газовой смеси. ДАН СССР, 246(3): 604- 609.
Markov M. G., Schukin E. R. 1984. Thermodiffusive low volatile aerosol particles in a multi-component gas mixture. DAN SSSR, 246(3): 604 - 609.



16. Щукин Е.Р. 2014. 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». Часть 1. М., 5 мая 2014: 123-126.

Shchukin E. R. 2014. A two-layered Motion of moderately large spherical aerosol particles in a nonuniform temperature gaseous environment //Collection of scientific works on materials of the International scientific-practical conference "Actual problems of science and education". Part 1. M., may 5, 2014: 123 -126.

17. Яламов Ю.И., Чермошенцева О.Ф. 1992. Гидродинамическая теория двухслойной аэрозольной частицы в неоднородной по температуре газовой смеси. ТВТ, 30: 422- 425.

Yalamov Y. I., Chermashentseva O. F. 1992. Hydrodynamic theory of two-layer aerosol particles in non-uniform on temperature of the gas mixture. TVT, 30: 422 - 425.

18. Zhang L., Gu F.X., Chan J.M., Wang A.Z. 2008. Nanoparticles in medicine: Therapeutic applications developments. Clinical Pharmacology and Therapeutics, 83(5) : 761-769.

19. Kosik I., Matejec V. 1995. New way for influencing thermophoretic efficiency in the MCV process. J. of Aerosol Science, 26: 399 – 407.

20. Ландау Л. Д., Лифшиц Е. М. 1988. Гидродинамика. М.: Наука, 733.

Landau L. D., Lifshits E. M. 1988. Hydrodynamics. M.: Nauka, 733.

21. Пискунов В. Н. 2010. Динамика аэрозолей. М.: Физматлит, 296.

Piskunov V. N. 2010. Dynamics of aerosols. M.: Fizmatlit, 296.

22. Бутырин Г. И. 1986. Высокопористые углеродные материалы: монография. М.: Химия, 192.

Butyrin G. I. 1986. Highly porous carbon materials. M.: Chemistry, 192.

23. Ивлев И.С. 1996. Микроструктурные особенности аэрозолей вулканического происхождения. Оптика атмосферы и океана, №8: 1039-1057.

Ivlev, I. S. 1996. Microstructural features of volcanic aerosols. Optics of atmosphere and ocean, №8: 1039-1057.

24. Щукин Е.Р., Малай Н.В., Щулиманова З.Л. 2015. О скорости термофореза твердых двухслойных крупных и умеренно крупных аэрозольных частиц. Вестник Адыгейского государственного университета. Серия 4: Естественно-математические и технические науки, 2(161): 23-30.

Shchukin E. R., Malai N. In. Suleimanova Z. L. 2015. On the rate of thermophoresis of a solid double layer of large and moderately large aerosol particles. The Bulletin of Adyghe state University. Series 4: Natural-mathematical and technical Sciences, 2(161): 23-30.

25. Щукин Е.Р., Малай Н.В., Щулиманова З.Л. 2015. О термофорезе неоднородных цилиндрических аэрозольных частиц. Научные ведомости Белгородского государственного университета. Серия: Математика. Физика, 41(23): 45-55.

Shchukin E. R., Malai N. In. Suleimanova Z. L. 2015. Thermophoresis of a cylindrical inhomogeneous aerosol particles. Bulletin of Belgorod state University. Series: Mathematics. Physics, 41(23): 45-55.

26. Малай Н.В., Лиманская А.В., Щукин Е.Р. 2016. Термофоретическое движение нагретых крупных аэрозольных частиц сферической формы. ПМТФ, 57, № 2(336): 164-171.

Malai N. In. Limansky A.V., Shchukin E. R. 2016. Thermophoretic motion of a heated large spherical aerosol particles form. J. Appl. Mechanics and Technical Physics, 57, № 2(336): 164-171.