

УДК 533.72:532

DOI: 10.18413/2075-4639-2018-50-2-152-160

**К ТЕРМОФОРЕЗУ КРУПНЫХ И УМЕРЕННО КРУПНЫХ ДВУХСЛОЙНЫХ
ЦИЛИНДРИЧЕСКИХ ЧАСТИЦ С ПОСТОЯННЫМ КОЭФФИЦИЕНТОМ
ТЕПЛОПРОВОДНОСТИ ЯДРА И ПЕРЕМЕННЫМ КОЭФФИЦИЕНТОМ
ТЕПЛОПРОВОДНОСТИ ОБОЛОЧКИ**

**THE THERMOPHORESIS OF LARGE AND MODERATELY LARGE
TWO-LAYERED CYLINDRICAL PARTICLES WITH A CONSTANT
COEFFICIENT OF THERMAL CONDUCTIVITY OF CORE AND VARIABLE
COEFFICIENT OF THERMAL CONDUCTIVITY OF THE 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: apoddoskin@yandex.ru; malay@bsu.edu.ru; evgrom@yandex.ru

Аннотация

В работе получены выражения для скорости термофореза твердой двухслойной умеренно крупной длинной цилиндрической аэрозольной частицы, позволяющие оценивать ее величину с учётом в граничных условиях всех поверхностных газокинетических эффектов линейных по числу Кнудсена, постоянного коэффициента теплопроводности ядра и зависящего от радиальной координаты переменного коэффициента теплопроводности оболочки. Рассматриваемая частица расположена перпендикулярно к градиенту температуры газа. Проведенный анализ показал, что увеличение (уменьшение) коэффициента теплопроводности ядра и среднего значения переменного коэффициента теплопроводности оболочки приводят к уменьшению (увеличению) скорости термофореза.

Abstract

In article obtain the expression for the velocity of thermophoresis of a moderately large solid two-layer long cylindrical aerosol particle, allowing to estimate the value given in the boundary conditions, all surface gas-kinetic effects linear in the Knudsen number, a constant coefficient of thermal conductivity of kernels and depend on the radial coordinate variable coefficient of thermal conductivity of the shell. The particle under consideration is perpendicular to the gas temperature gradient. The carried out analysis showed, in particular, that an increase in the value of the thermal conductivity of the core and the average value of the variable coefficient of thermal conductivity of the shell lead to a decrease in the thermophoresis velocity, and their decrease to its increase

Ключевые слова: термофорез, двухслойные цилиндрические аэрозольные частицы, умеренно крупные частицы.

Keywords: thermophoresis, cylindrical two-layer aerosol particles, moderately large particles.

Введение

Аэрозольные частицы входят в состав естественных и антропогенных аэродисперсных систем. Упорядоченное движение этих частиц могут вызывать силы различной природы [1-4]. Так, например, в газообразных средах с неоднородным распределением температуры, которое вызвано внешним градиентом температуры ($\nabla T_{\text{вн}}$), на частицы действует термофоретическая сила молекулярной природы [1-3]. Под действием этой силы происходит упорядоченное движение частиц, называемое термофоретическим. Это движение обусловлено передачей частицам молекулами неоднородной по температуре газообразной среды не скомпенсированного импульса [2-6]. Термофоретическая сила перемещает частицы в области с более низкой температурой. Когда термофоретическая сила становится равной по величине силе сопротивления среды движению частицы, частица начинает двигаться равномерно. Скорость этого равномерного движения частиц относительно центра инерции газообразной среды называют термофоретической [1-6]. Термофоретическая сила может оказывать значительное влияние на процесс осаждения аэрозольных частиц, в частности, в каналах тепло- и массообменников [1,3,7], на движение частиц в зонах просветления облаков и туманов [1,3,8] 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 [1,3,7], получении методом VAD высококачественных оптических волокон [9].

Наибольшее влияние термофоретическая сила оказывает на движение используемых на практике крупных и умеренно крупных аэрозольных частиц [1-6]. К крупным и умеренно крупным аэрозольным частицам относят, соответственно, частицы со следующими характеристическими числами Кнудсена: $\text{Kn} = \lambda / a \leq 0,01$; $0,01 \leq \text{Kn} \leq 0,3$, где λ – средняя длина свободного пробега молекул газа, a – характерный размер частицы. Вывод формул для скорости термофореза таких частиц удобно проводить гидродинамическим методом [1-6].

Величина термофоретической скорости крупных и умеренно крупных аэрозольных частиц, в отличие от малых частиц [10], сильно зависит от их коэффициентов теплопроводности [1-6]. Значения этих коэффициентов могут непосредственно зависеть от пространственных координат точек объёма частиц [1-6]. В связи с этим крупные и умеренно крупные частицы могут быть неоднородными по своим теплофизическим свойствам.

Неоднородными по теплофизическим свойствам могут быть частицы, представляющие значительный интерес для практических приложений, например, твердые крупные и умеренно крупные двухслойные аэрозольные частицы [4,5]. Эти частицы состоят из ядра и оболочки. Они могут образовываться, в частности, при конденсации на поверхности ядер молекул вещества оболочек [1,3,11] и в результате протекания на поверхности ядер химических реакций [11]. Ядра и оболочки твёрдых двухслойных частиц могут отличаться по составу, физико-химическим свойствам, микроморфологии и, как правило, по функциональному назначению. Поэтому главными достоинствами таких двухслойных частиц являются их полифункциональность, реализуемая за счёт разделения функций ядра и оболочки, а также возможность оптимизации целевых функций их физико-химических свойств. Благодаря этим достоинствам твёрдые двухслойные частицы могут быть широко использованы в практических приложениях, например, в качестве материала регенераторов [12] или в тех случаях, когда необходимо изолировать ядра от воздействия окружающей среды [1,3,5], закрепить на внешнем слое специфические группы реагентов для направленной доставки лекарственных препаратов [13], интенсифицировать процессы поглощения и испускания энергии люминесцентными частицами [14] и др. В связи с этим изучение закономерностей, в частности, упорядоченного термофоретического движения различного вида твёрдых двухслойных, в том числе крупных и умеренно крупных аэрозольных частиц, термофоретическая скорость которых одновременно зависит не только от газокинетических граничных условий, но и от коэффициентов теплопроводности χ_1 и χ_2 их



ядер и оболочек [3-5], представляет как научный, так и практический интерес. Но в опубликованных работах наиболее подробно было рассмотрено термофоретическое движение только крупных и умеренно крупных твёрдых двухслойных сферических частиц [1,4,5]. Встречающиеся на практике двухслойные аэрозольные частицы могут иметь отличающуюся от сферической форму поверхности [1,11,15-19]. К таким частицам относятся, в частности, сильно вытянутые крупные и умеренно крупные двухслойные частицы с формой поверхности близкой к цилиндрической. Но формулы, которые приведены в опубликованных до настоящего времени работах, позволяют оценивать термофоретическое движение крупных и умеренно крупных твёрдых двухслойных цилиндрических частиц только с постоянными коэффициентами теплопроводности ядра и оболочки [16]. Выведенные в настоящей работе формулы позволяют находить величину термофоретической скорости одиночных твёрдых крупных и умеренно крупных неоднородных по теплопроводности двухслойных длинных цилиндрических частиц уже с переменным коэффициентом теплопроводности их оболочки. Проведённые при этом оценки показали, что зависимость коэффициента теплопроводности оболочки от радиальной координаты может оказать заметное влияние на термофоретическое движение двухслойной цилиндрической частицы.

Постановка задачи

В однокомпонентном газе в поле внешнего градиента температуры ∇T_{∞} происходит установившееся термофоретическое движение одиночной твердой двухслойной умеренно крупной цилиндрической частицы с цилиндрическим ядром радиуса R_1 . Длина цилиндрической частицы L много больше её радиуса R_2 . Частица расположена перпендикулярно направлению ∇T_{∞} . При этом неоднородность её теплофизических свойств сказывается на скорости термофоретического движения частицы в наибольшей степени. Коэффициент теплопроводности оболочки частицы χ_2 зависит от радиальной координаты r . Его значения могут сильно отличаться по величине от значения коэффициента теплопроводности $\chi_1 = \text{const}$ ядра. На величину ∇T_{∞} наложено ограничение: $R_2 |\nabla T_{\infty}| / T_{\infty} \ll 1$. Движение частицы происходит при малых относительных перепадах температуры T_e в её окрестности. 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 [1-3,6]. Движение частицы происходит при малых числах Рейнольдса $Re \ll 1$ и Пекле $Pe \ll 1$. При таких числах Пекле (Pe) и Рейнольдса (Re) термофоретическое движение частиц происходит в реальных аэрозолях [1-6]. Когда числа $Re \ll 1$ и $Pe \ll 1$, в уравнениях Навье-Стокса и переноса тепла можно пренебречь конвективными членами [20], (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.

Термофоретическая скорость

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:

$$\text{div} \vec{v} = 0, \quad \text{grad} P = \mu_e \Delta \vec{v}, \quad \Delta T_e = 0, \quad \Delta T_1 = 0, \quad \text{div}(\chi_2 \nabla T_2) = 0, \quad (1)$$

где символ « Δ » – оператор Лапласа.

Так как частица имеет цилиндрическую форму, решение системы (1) проводилось в цилиндрической 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.

В процессе решения системы (1) учитывались граничные условия (2)- (8):

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

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

$$T_e - T_2|_{r=R_2} = C_i Kn R_2 \frac{\partial T_e}{\partial r} \Big|_{r=R_2} \tag{4}$$

$$-\chi_e \frac{\partial T_e}{\partial r} + \chi_2 \frac{\partial T_2}{\partial r} \Big|_{r=R_2} = -C_q \chi_e Kn \frac{1}{r} \frac{\partial^2 T_e}{\partial \varphi^2} \Big|_{r=R_2}, \tag{5}$$

$$\chi_1 \frac{\partial T_1}{\partial r} \Big|_{r=R_1} = \chi_2 \frac{\partial T_2}{\partial r} \Big|_{r=R_1}, \quad T_1|_{r=R_1} = T_2|_{r=R_1} \tag{6}$$

$$V_\varphi|_{r \rightarrow \infty} = -V_{z\infty} \sin \varphi, \quad V_r|_{r \rightarrow \infty} = V_{z\infty} \cos \varphi, \quad P|_{r \rightarrow \infty} = P_\infty, \tag{7}$$

$$T_e|_{r \rightarrow \infty} = T_\infty + r |\nabla T_\infty| \cos \varphi, \tag{8}$$

где r и φ – цилиндрические координаты; V_r, V_φ - компоненты скорости газа \vec{V} в цилиндрической системе координат; $v_e = \mu_e / \rho_e$ - коэффициент кинематической вязкости; $\chi_2(r) = \chi_{02} (r/R_2)^\alpha$ – переменный коэффициент теплопроводности оболочки, $Kn = \lambda / R_2$.

Граничные условия на поверхности частицы (2)-(5) записаны с учётом всех эффектов, линейных по числу Кнудсена. В (2)-(5) $K_{TS}^{(0)}, C_m$ – коэффициенты теплового и изотермического скольжений; $\beta_R, \beta_B, \beta_B$ - поправки на кривизну и барнеттовское скольжение; C_q, C_V – газокинетические коэффициенты потоков тепла и среднемассового переноса, растекающихся в слое Кнудсена; $C_V^* = C_V / K_{TS}^{(0)}$, $y = r / R_2, C_i$ – коэффициент скачка температуры. Выражения для газокинетических коэффициентов $K_{TS}^{(0)}, C_m, C_q, C_V, \beta_R, \beta_B$ и их значения приведены в [3,16].

В ходе решения граничной задачи (1)-(8) были получены выражения для распределений $\vec{V}, P, T_e, T_1, T_2$ и, после приравнивания к нулю полной силы, действующей на частицу, была получена формула для скорости термофореза. В результате выражение для скорости термофореза твёрдых умеренно крупных цилиндрических двухслойных частиц было приведено к следующему виду:

$$\vec{U} = -\frac{v_e}{T_{0e}} f_T \text{grad} T, \tag{9}$$

где

$$f_T = K_{TS}^{(0)} \left\{ [1 + Kn(\beta_R + \beta_B) - (1 + 4C_m Kn) C_V^* Kn] \Delta_{01} + Kn(\beta_R - \beta_B) \Delta_{02} \right\} / (1 + 2C_m Kn) \Delta_{03}, \tag{10}$$

$$\Delta_{11} = \alpha_2 (1 - C_i Kn) + (1 + C_q Kn) \frac{\chi_e}{\chi_{02}}, \quad \Delta_{11} = \alpha_2 (1 - C_i Kn) + (1 + C_q Kn) \frac{\chi_e}{\chi_{02}},$$

$$\Delta_{21} = \alpha_1 (1 - C_i Kn) - (1 + C_q Kn) \frac{\chi_e}{\chi_{02}}, \quad \Delta_{22} = \alpha_1 (1 + C_i Kn) + (1 + C_q Kn) \frac{\chi_e}{\chi_{02}},$$



$$d_1 = R_1^{(\alpha_1 + \alpha_2)} \left[1 - \alpha_1 \left(\frac{R_1}{R_2} \right)^\alpha \frac{\chi_{02}}{\chi_1} \right], \quad d_2 = R_2^{(\alpha_1 + \alpha_2)} \left[1 + \alpha_2 \left(\frac{R_1}{R_2} \right)^\alpha \frac{\chi_{02}}{\chi_1} \right], \quad (11)$$

$$\Delta_{01} = d_1 \left(\alpha_1 C_1 Kn - \frac{\chi_e}{\chi_{02}} \right) + d_2 \left(\alpha_1 C_1 Kn + \frac{\chi_e}{\chi_{02}} \right), \quad \Delta_{02} = d_1 \left(\alpha_2 + C_q Kn \frac{\chi_e}{\chi_{02}} \right) + d_2 \left(\alpha_1 - C_q Kn \frac{\chi_e}{\chi_{02}} \right),$$

$$\Delta_{03} = d_1 \Delta_{12} + d_2 \Delta_{22}, \quad \alpha_1 = (\sqrt{\alpha^2 + 4} - \alpha) / 2, \quad \alpha_2 = (\sqrt{\alpha^2 + 4} + \alpha) / 2.$$

Формула (9) позволяет непосредственно оценивать термофоретическую скорость при известных χ_1 и $\chi_2(r)$. Она была выведена с учетом в граничных условиях всех эффектов, линейных по числу Кнудсена [16]. Поэтому её можно использовать при оценке термофоретической скорости и крупных и умеренно крупных частиц.

Анализ полученных результатов

В работе решена задача об установившемся термофоретическом движении в однокомпонентном газе, расположенной перпендикулярно к внешнему градиенту температуры газа, умеренно крупной твёрдой двухслойной длинной цилиндрической аэрозольной частицы с коэффициентом теплопроводности оболочки частицы, зависящем от радиальной координаты и постоянным коэффициентом теплопроводности ядра.

Найденная формула для скорости термофореза позволяет, при известных коэффициентах теплопроводности ядра χ_1 и оболочки χ_2 оценивать термофоретическую скорость крупных и умеренно крупных двухслойных частиц в связи с тем, что при решении задачи в граничных условиях на поверхности частицы были учтены все газокINETические эффекты, линейные по числу Кнудсена [6,16]. Поэтому, с помощью найденной формулы можно определять величину термофоретической скорости с учётом, в частности, зависимости коэффициента теплового скольжения от кривизны поверхности, барнеттовского теплового скольжения, связанного с градиентом температуры, растекания молекул вдоль слоя Кнудсена, обусловленного неоднородным распределением температуры.

Полученная формула для скорости термофореза при увеличении радиуса ядра частицы переходит в формулу для скорости термофореза умеренно крупной однослойной твёрдой цилиндрической частицы с постоянным коэффициентом теплопроводности χ_1 , а при уменьшении радиуса ядра – в формулу для скорости термофореза однослойной частицы с переменным коэффициентом теплопроводности χ_2 .

Из формулы (9) следует, что зависимость скорости термофореза \vec{U}_T от коэффициентов теплопроводности ядра и оболочки определяется, входящим в выражение для термофоретической скорости, скалярным коэффициентом $f_T = |\vec{U}_T| \sqrt{\frac{V_e}{T_\infty}} |\nabla T_\infty|$. Только этот коэффициент непосредственно зависит от коэффициентов теплопроводности χ_1 и χ_2 . Проведенный с помощью выражения для f_T (10) численный анализ зависимости скорости термофореза \vec{U}_T (9) от коэффициентов теплопроводности χ_1 и χ_2 ядра и оболочки, в частности, показал, что:

- 1) скорость термофореза крупных и умеренно крупных двухслойных частиц может сильно зависеть от коэффициентов теплопроводности их ядра и оболочки (см. рис.1 и 2);
- 2) увеличение коэффициента теплопроводности ядра и среднего значения переменного коэффициента теплопроводности оболочки приводит к уменьшению скорости термофореза, а их уменьшение – к увеличению термофоретической скорости (см. рис.1,2);
- 3) при увеличении радиуса ядра, влияние его коэффициента теплопроводности χ_1 на термофоретическую скорость возрастает (см. 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) при увеличении числа Кнудсена на термофоретическое движение двухслойных частиц большее влияние оказывают поверхностные газокINETические эффекты.

Кривые на рисунке 1 показывают зависимости коэффициента f_T от χ_1 при $\chi_2=0,23$ Вт/м·К (оболочка из бакелита), а кривые на рисунке 2 – зависимости при $\chi_1=1,63$ Вт/м·К (ядро из анодного оксида алюминия) коэффициента f_T от скалярного коэффициента α , входящего в переменный коэффициент теплопроводности $\chi_2(r)=\chi_{02}(r/R_2)^\alpha$ с $\chi_{02}=0,23$ Вт/м·К цилиндрических частиц, находящихся в воздухе с температурой $T_{\infty} = 20^0$ С и давлением $p_{\infty}=101325$ Па. Сплошные линии на рисунках 1 и 2 построены при $y_1= R_1/ R_2= 0,8$, пунктирные – при $y_1= 0,6$.

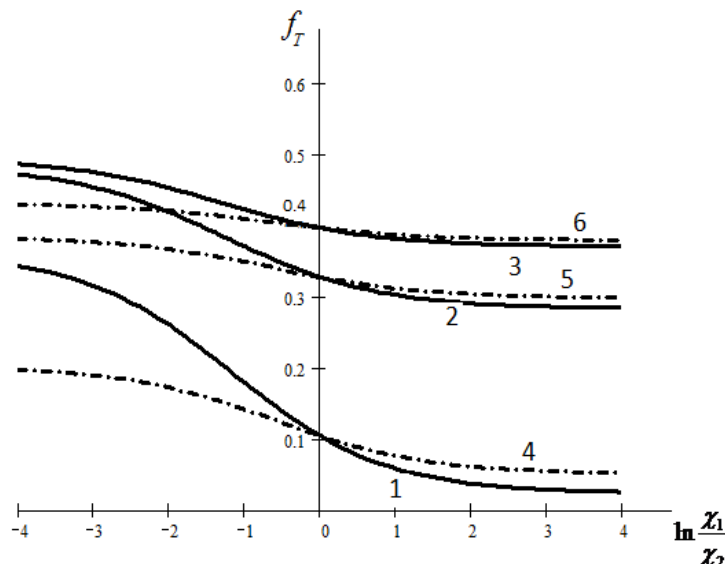


Рис. 1. Кривые зависимости коэффициента f_T от $\ln \chi_1/ \chi_2$ при $\chi_2= 0,23$ Вт/м·К и $y_1=R_1/R_2=0,8$ (линии 1, 2, 3 соответственно $Kn=0, Kn=0,15, Kn=0,3$), $y_1= 0,6$ (линии 4, 5, 6 соответственно $Kn=0, Kn=0,15, Kn=0,3$)

Fig.1. Curves of dependence the coefficient f_T from $\ln \chi_1/ \chi_2$ with $\chi_2= 0,23$ W/m·K and $y_1=R_1/R_2=0,8$ (lines 1, 2, 3, respectively, $Kn=0, Kn=0.15$ and $Kn=0.3$), $y_1= 0,6$ (lines 4, 5, 6, respectively, $Kn=0, Kn=0.15$ and $Kn=0.3$)

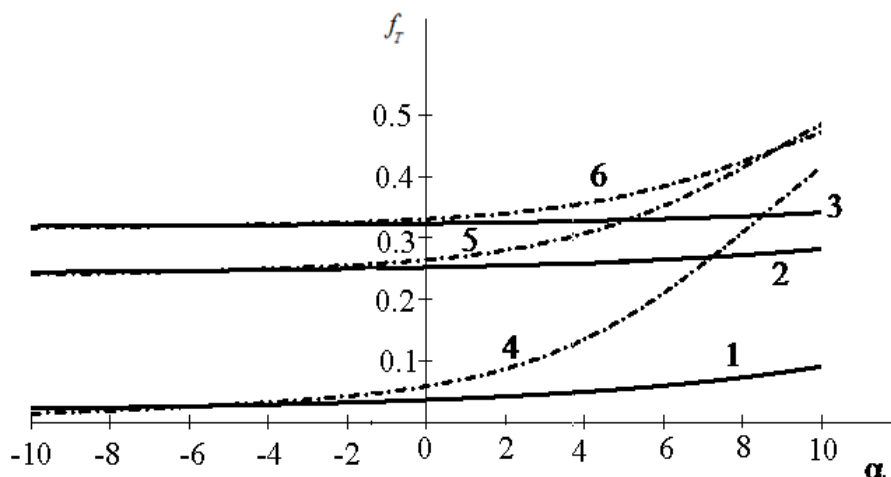


Рис.2. Кривые зависимости коэффициента f_T от переменной α при $\chi_1=1,63$ Вт/м·К, $\chi_{02}=0,23$ Вт/м·К, $y_1=0,8$ (линии 1,2,3 соответственно $Kn=0,Kn=0,15,Kn=0,3$), $y_1= 0,6$ (линии 4, 5, 6 соответственно $Kn=0, Kn=0,15, Kn=0,3$)

Fig.2. Curves of dependence the coefficient f_T on α variable with $\chi_1=1,63$ W/m·K, $\chi_{02}=0,23$ W/m·K, $y_1=0,8$ (lines 1, 2, 3, respectively, $Kn=0, Kn=0,15, Kn=0,3$), $y_1= 0,6$ (lines 1, 2, 3, respectively, $Kn=0, Kn=0,15, Kn=0,3$).

Все расчеты были сделаны при приведенных в [2] следующих значениях газокинетических коэффициентов, найденных при коэффициентах аккомодации тангенциального импульса и энергии, равных единице:



$$C_v = 0,971, C_m = 1,131, K_{TS}^{(0)} = 1,161, \\ \beta_R = -0,701, \beta_R = 3,731, \beta_B = 3,651, K_T^{(T)} = 2,179, C_q = 0,548.$$

Кривые на рисунке 2 построены при степенной зависимости коэффициента теплопроводности оболочки частицы от радиальной координаты. При этом увеличение показателя степени α приводит к уменьшению среднего значения коэффициента теплопроводности оболочки.

Следует отметить, что полученные в работе формулы могут быть использованы также и при оценке термофоретического движения полых и с жидким ядром крупных и умеренно крупных цилиндрических аэрозольных частиц.

Заклучение

В работе проведено математическое моделирование процесса установившегося термофоретического движения в однокомпонентном газе твёрдой длинной умеренно крупной двухслойной цилиндрической аэрозольной частицы с постоянным коэффициентом теплопроводности ядра и зависящим от поперечной радиальной координаты переменным коэффициентом теплопроводности оболочки. Такие частицы могут быть широко использованы в различных практических, в том числе технических и медицинских, приложениях. Проведённый анализ показал, что термофоретическое движение рассмотренной двухслойной частицы зависит и от поверхностных газокинетических эффектов, линейных по числу Кнудсена, и от коэффициентов теплопроводности ядра и оболочки. Это нужно учитывать, оценивая скорость термофореза двухслойных аэрозольных частиц в газообразных средах.

Список литературы References

1. Пискунов В.Н. 2010. Динамика аэрозолей. М.: Физматлит, 296.
Piskunov V. N. 2010. Dynamics of aerosols. M.: Fizmatlit, 296.
2. Поддоскин А.Б., Юшканов А.А., Яламов Ю.И. 1982. Теория термофореза умеренно крупных аэрозольных частиц. ЖТФ, 52(11): 2253-2661.
Poddoskin A. B., Yushkanov A. A., Yalamov Yu. I. 1982. Theory of thermophoresis of moderately large aerosol particles. Technical physics, 52(11): 2253-2661.
3. 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 from industrial wastes. Textbook. SPb, 235.
4. Щукин Е.Р. 2014. Движение двухслойной умеренно крупной сферической аэрозольной частицы в неоднородной по температуре газообразной среде. Актуальные проблемы развития науки и образования: Сборник научных трудов по материалам международной научно-практической конференции 5 мая 2014 г. Часть 1. М.: АР-Консалт : 123.
Shchukin E. R. 2014. Two-layered Motion of moderately large spherical aerosol particles in a nonuniform temperature gaseous medium. Actual problems of development of science and education: Collection of scientific works on materials of the international scientific-practical conference 5 may 2014 Part 1. M.: AR-consult: 123.
5. Щукин Е. Р., Малай Н. В., Шулиманова З. Л. 2014. Движение в поле градиента температуры двухслойной с неоднородным ядром умеренно крупной сферической аэрозольной частицы. Вестник ТГУ, 19(3): 933-936.
Shchukin E. R., Malai N. V., Suleimanova Z. L. 2014. Motion in the field of the temperature gradient with inhomogeneous double-layer core of moderately large spherical aerosol part-Tzu. Bulletin of the TSU, 19(3): 933-936.

6. 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.

7. 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, No. 5: 726 – 731.

8. Щукин Е.Р., Трайтак С.Д. 1997. О роли термодиффузиофоретического и броуновского движения при захвате аэрозольных частиц каплями. *Физика атмосферы и океана*, 15, №1: 122-125.

Shchukin E. R., Tritak S. D. 1997. On the role thermodiffuziophoretical and brownian motion the capture of aerosol particles by drops. *Physics of atmosphere and ocean*, 15. No. 1: 122-125

9. Kosik I., Matejec V. 1995. New way for influencing thermophoretic efficiency in the MCV Process. *Journal of Aerosol Science*, 26: 399-407.

10. Марков М.Г., Щукин Е.Р. 1984. Термодиффузиофорез малой летучей аэрозольной частицы в многокомпонентной газовой смеси. *ДАН СССР*, 246, №3: 604-609.

Markov M. G., Schukin E. R. 1984. Thermodiffusiophoresis low volatile aerosol particles in multicomponent gas mixtures. *DAN SSSR*, 246, No. 3: 604-609.

11. Ивлев Л.С., Довгальюк Ю.А. 1999. *Физика атмосферных аэрозольных систем*. СПб.: НИИХ СПбГУ, 194 с.

Ivlev L. S., Dovgalyuk Yu. A. 1999. *Physics of atmospheric aerosol systems*. SPb.: NIIN St. Petersburg state University. 1999, 194 p.

12. Numazava T., Kamiya K., Hiratsuka Y. 2007. *Cooling Performance of Multilayer Ceramic Regenerator Materials*. Cryocoolers 14. New York: Kluwer Academic. Plenum Publishers: 362 – 372.

13. 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.

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.

14. Ищенко А.А., Гольдштрах М.А. 2009. *Люминисцентный анализ.. Учебное пособие*. М.: МИТХТ им. М.В.Ломоносова, 36 .

Ishchenko A. A., Goldstraw M. A. 2009. *Fluorescent analysis.. Textbook*. Moscow: MITHT M. V. Lomonosov, 36 .

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

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

16. Поддоскин А.Б., Малай Н.В., Щукин Е.Р. 2017. Термофоретическое движение твёрдых двухслойных умеренно крупных цилиндрических аэрозольных частиц с постоянными коэффициентами теплопроводности ядра и оболочки. *Научные ведомости Белгородского государственного университета. Серия: Математика. Физика*, № 27(276), Вып.49: 60-67.

Poddoskin A. B., Malai N. In. Shchukin E. R. 2017. Thermophoretic motion of a rigid two-layer of moderately large cylindrical aerosol particles with constant coefficients of thermal conductivity of core and shell. *Scientific statements of Belgorod-ray state University. Series: Mathematics. Physics*, No. 27 (276) (49): 60-67.

17. Щукин Е.Р., Малай Н.В., Шулиманова 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.



18. 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.

19. 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.

20. Ландау Л.Д., Лифшиц Е.М. 1988. Теоретическая физика: Учебное пособие. Т.6. Гидродинамика, М.: Наука, 736

Landau L. D., Lifshits E. M. 1988. Hydrodynamics, M.: Nauka, 736