



# ФИЗИКА

УДК 533.72:532

## О ФОТОФОРЕЗЕ ОДНОРОДНОЙ ПО ТЕПЛОПРОВОДНОСТИ УМЕРЕННО КРУПНОЙ ЧЕРНОЙ АЭРОЗОЛЬНОЙ ЧАСТИЦЫ

### ABOUT THE PHOTOPHORESIS OF A HOMOGENEOUS THERMAL CONDUCTIVITY OF MODERATELY LARGE AEROSOL PARTICLES BLACK

Е.Р. Шукин <sup>1</sup>, Н.В. Малай <sup>2</sup>, Э.Л. Шулиманова <sup>3</sup>, А.А. Стукалов <sup>4</sup>  
 E.R. Shchukin <sup>1</sup>, N.V. Malay <sup>2</sup>, Z.L. Shulimanova <sup>3</sup>, A.A. Stukalov <sup>4</sup>

<sup>1)</sup> Объединенный институт высоких температур РАН, Россия, Москва, ул. Ижорская, д. 13/19  
 The Leading Scientist of Joint Institute for High Temperatures of the Russian Academy of Science,  
 13/19 Izhora St, Moscow, Russia

<sup>2)</sup> Белгородский национальный исследовательский университет, Россия, 308015, г. Белгород, ул. Победы, 85  
 Belgorod National Research University, 85 Pobedy St, Belgorod, 308015, Russia

<sup>3)</sup> Российская открытая академия транспорта, Россия, 125190, Москва, ул. Часовая, д. 22/2  
 Russian open Academy of Transport, 22/2 Hour St, Moscow, 125190, Russia

<sup>4)</sup> Автономная некоммерческая организация высшего образования  
 «Белгородский университет кооперации, экономики и права»,  
 Россия, 308023, г. Белгород, ул. Садовая, 116 а  
 Belgorod University of Cooperation, Economics and Law, 116 a Sadovaya St, Belgorod, 308023, Russia

E-mail: malay@bsu.edu.ru; evgrom@yandex.ru; zinaida110@yandex.ru; pochtovyk@gmail.com

**Аннотация.** В квазистационарном приближении при числах Рейнольдса много меньших единицы решена задача о фотофоретическом движении однородной по теплопроводности твердой умеренно крупной черной сферической аэрозольной частицы. При этом были получены достаточно простые формулы для фотофоретической силы и скорости рассматриваемой частицы. Вывод формул проведен с учетом в граничных условиях всех поверхностных газокинетических эффектов линейных по числу Кнудсена. Из полученных формул, в частности, следует, что поверхностные газокинетические эффекты могут оказывать заметное влияние на величину фотофоретической силы и скорости. Увеличение числа Кнудсена умеренно крупной частицы приводит к монотонному уменьшению ее скорости фотофореза.

**Resume.** In the quasistationary approximation for small Reynolds number solution the problem of photophoretic motion on the thermal conductivity of a homogeneous solid black moderately large spherical aerosol particles. Were obtained the formula for the photophoretic force and velocity. The conclusion of formulas is carried out subject to the boundary conditions of all surface gas-kinetic effects linear in the Knudsen number.

**Ключевые слова:** фотофорез аэрозольной частицы сферической формы.

**Key words:** photophoresis of an aerosol particle of the spherical form.

## Введение

Важное для практических приложений, установившееся упорядоченное движение аэрозольных частиц относительно газообразной среды может происходить в лучах лазеров и мощных ламп [1-4].

В этих лучах, наряду с силой давления электромагнитного излучения [1-4], на каждую частицу действует так называемая, молекулярной природы, фотофоретическая сила [1-4], возникающая в результате взаимодействия молекул окружающего частицу газа с неоднородно нагретой электромагнитным излучением поверхностью частицы. В результате частица приобретает не скомпенсированный импульс, направленный от ее стороны с большей температурой к стороне с меньшей температурой [5]. Как правило, величина фотофоретической силы намного больше (от-



личие может достигать нескольких порядков) величины силы давления излучения [6]. Исключения составляют лишь следующие случаи: 1) низкого давления газа [6]; 2) слабо поглощающих излучение частиц, практически не нагреваемых в луче [1]; 3) высокотеплопроводных частиц, например, металлических, распределение температуры вдоль поверхности которых близко к однородному, что в силу этого приводит к малой величине фотофоретической силы [5]. Движение частиц, вызванное фотофоретической силой, называют фотофоретическим. Когда сила фотофореза становится равной по величине силе сопротивления среды движению частицы, частица начинает двигаться равномерно со скоростью, называемой фотофоретической [3,4].

Фотофоретическое движение аэрозольных частиц происходит в зонах просветления аэрозолей лазерным излучением [7], фотофоретических спектрометрах [8], при лазерном мониторинге атмосферы [9] и лазерном спектро-химическом анализе аэрозолей [10]. Фотофорез может оказывать существенное влияние на протекание атмосферных процессов [11]. Его можно использовать на практике, например, в устройствах, предназначенных для тонкой очистки газов, нанесения заданной толщины покрытий из аэрозольных частиц, разделения частиц по размерам [12]. Поэтому изучение особенностей фотофоретического движения различного вида аэрозольных частиц является важным и актуальным вопросом, представляющим как научный, так и практический интерес.

Значительное влияние фотофоретическая сила может оказывать на движение твердых черных крупных и умеренно крупных аэрозольных частиц [1]. К крупным частицам относят частицы с числом Кнудсена  $Kn \leq 0,01$ , а к умеренно крупным – частицы с  $0,01 \leq Kn \leq 0,3$  [13], где  $Kn = \lambda/d$  [4,13,15],  $\lambda$  – средняя длина свободного пробега газовых молекул,  $d$  – наименьший характерный размер частицы.

Черные частицы поглощают электромагнитное излучение сильнее других частиц, например, бесцветных или белых [1]. Это обстоятельство связано с тем, что глубина проникновения поля в черную частицу много меньше ее характерных размеров. Поэтому поглощение черной частицей излучения происходит в тонком слое, прилегающем к нагреваемой части поверхности, т. е. поглощение носит поверхностный характер [3,4]. При этом коэффициент поглощения частицей излучения близок к единице. Черными могут быть твердые частицы аэрозолей многих материалов, например, углеродных [14] (в частности, угля и графита [1], углеродной керамики), глиноземных кварцов, содержащих калий [1], черных окисей металлов, например, меди, хрома, никеля и др.

Теоретическое описание, происходящего при малых числах Рейнольдса, фотофоретического движения твердой черной однородной по теплопроводности умеренно крупной аэрозольных частицы было впервые проведено в работах [3,4]. В этих работах с помощью гидродинамического метода [3,4,13,15] были найдены следующие формулы для силы и скорости фотофореза твердой черной умеренно крупной сферической частицы при малых относительных перепадах температуры газа  $T_e$  в ее окрестности:

$$\vec{F}_{ph} = 2\pi K_{TS}^{(0)} \eta \nu R f_{ph} (qI / T_{co} \varepsilon) \vec{n}_z, \quad (1)$$

$$\vec{U}_{ph} = K_{TS}^{(0)} \nu f_{ph} (qI / 3T_{co} \varepsilon) [(1 + 3c_m Kn) / (1 + 2c_m Kn)] \vec{n}_z, \quad (2)$$

где  $\eta, \nu$  - коэффициенты динамической и кинематической вязкости газа;  $K_{TS}^{(0)}, c_m, K_T^{(T)}$  – соответственно, коэффициенты теплового и изотермического скольжений и скачка температуры [3,4];



$R$  - радиус частицы;  $I$  - интенсивность падающего излучения;  $q$  - коэффициент поглощения излучения частицей;  $T_{\infty}$  - средняя температура газа у поверхности частицы;  $\varepsilon$ ,  $\kappa_e$  - коэффициенты теплопроводности частицы и газа;  $Kn = \lambda / R$ ;  $\bar{n}_z$  - единичный вектор в направлении излучения,  $f_{ph} = 1 / (1 + 3c_m Kn) [2(\kappa_e / \varepsilon) + 1 + 2K_T^{(T)} Kn]$ .

Следует отметить, что в работах [3,4] при выводе формул для силы и скорости фотофореза (1) и (2) в граничных условиях на поверхности частицы были учтены только три газокINETИЧЕСКИХ эффекта: тепловое и изотермическое скольжения газа - в граничном условии для касательной компоненты скорости и скачок температуры - в условии для температуры.

Но, как показано в работе [16], на, вызванное тепловым скольжением, движение неоднородно нагретых умеренно крупных частиц дополнительное влияние, сравнимое с влиянием изотермического скольжения и скачка температуры, могут оказывать и другие, линейные по числу Кнудсена, поверхностные газокINETИЧЕСКИЕ эффекты. К таким эффектам относятся, в частности, зависимость скорости теплового скольжения газа от кривизны поверхности частицы, неоднородности градиента температуры газа в слое Кнудсена, барнеттовских температурных напряжений, а также разрывность потоков тепла и массы (из-за растекания части потоков тепла и массы по слою Кнудсена) на границе частицы [16]. Эти эффекты нужно, дополнительно, учитывать в граничных условиях при последовательном выводе гидродинамическим методом формул и для фотофоретических силы и скорости умеренно крупных аэрозольных частиц. Вывод таких формул в случае твердой черной умеренно крупной сферической частицы и был проведен в данной работе. Используемые при этом газокINETИЧЕСКИЕ граничные условия были найдены с помощью методов кинетической теории неоднородных газов авторами работы [16].

### 1.1. Постановка задачи

В однокомпонентном газе происходит установившееся фотофоретическое движение твердой черной умеренно крупной однородной по теплопроводности сферической частицы с коэффициентом теплопроводности  $\varepsilon$ . Движение частицы происходит при малых относительных перепадах температуры газа  $T_e$  в ее окрестности, когда  $(T_e - T_{\infty}) / T_{\infty} \ll 1$  [3,4]. При этом газ можно считать несжимаемым [3,4], а его плотность  $\rho_e$  и коэффициенты динамической вязкости  $\mu_e$  и теплопроводности  $\kappa_e$  - постоянными величинами. В связи с тем, что у частицы число  $Kn \leq 0,3$ , вывод формул для силы и скорости фотофореза проводится с помощью гидродинамического метода [2-6,13,15-17] (то есть с помощью уравнений гидродинамики). При этом взаимодействие неоднородно нагретой частицы с молекулами, окружающего ее газа, учитывается с помощью специальных поверхностных газокINETИЧЕСКИХ граничных условий, выведенных, в частности, в работе [16]. В связи малостью времен релаксации температурного и гидродинамических полей [3-6,13,15-17], описание процесса фотофоретического движения проводится в квазистационарном приближении. Движение частицы происходит при малых числах Рейнольдса  $Re \ll 1$  и Пекле  $Pe \ll 1$ . При таких числах Пекле ( $Pe$ ) и Рейнольдса ( $Re$ ) фотофоретическое движение частиц часто 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 [3-6,15-17], (т.е. не учитывать влияние движения сре-



ды на распределения температуры, давления и массовой скорости в окрестности частицы). При этом, решая гидродинамическим методом, задачу о фотофоретическом движении аэрозольной частицы можно использовать уравнения Стокса и линеаризованные уравнения теплопереноса.

В случае установившегося фотофоретического движения одиночной частицы, действующая на эту частицу полная сила равна нулю [3-6]. При этом фотофоретическое движение частицы происходит при постоянном давлении газа в ее окрестности. В этом случае, при решении задачи об установившемся фотофоретическом движении частицы, в уравнениях Стокса [3,6] можно не учитывать давление. Это обстоятельство существенно упрощает вывод формул для скорости и силы фотофореза.

### 1.2. Формулы для скорости и силы фотофореза

При рассмотренных условиях распределения в системе частица – газообразная среда массовой скорости  $\vec{V}$ , температур газа  $T_e$  и частицы  $T$ , знание которых необходимо при выводе формулы для скорости фотофореза частицы, описываются следующей системой уравнений переноса:

$$\operatorname{div} \vec{V} = 0, \quad \operatorname{grad} P = \mu_e \Delta \vec{V}, \quad \Delta T_e = 0, \quad \Delta T = 0, \quad (3)$$

где  $\Delta$ -оператор Лапласа. Решение системы (3) было проведено в сферической системе координат, с началом, совпадающим с центром частицы и направлением оси Oz, совпадающим с направлением распространения излучения. При этом на поверхности частицы были учтены граничные условия (4)-(7) [16], а на бесконечности (8):

$$V_r|_{r=R} = C_v \operatorname{Kn} \frac{v_e}{RT_{\infty}} \left[ \frac{\partial^2 T_e}{\partial \theta^2} + \operatorname{ctg} \theta \frac{\partial T_e}{\partial \theta} \right] \Big|_{r=R}, \quad (4)$$

$$V_{\theta}|_{r=R} = C_m \operatorname{Kn} R \left[ r \frac{\partial}{\partial r} \left( \frac{V_{\theta}}{r} \right) + \frac{1}{r} \frac{\partial V_r}{\partial \theta} \right] + K_{TS}^{(0)} (1 + \operatorname{Kn} \beta'_R) \frac{v_e}{RT_{\infty}} \frac{\partial T_e}{\partial \theta} + K_{TS}^{(0)} \operatorname{Kn} \beta_R \frac{v_e}{T_{\infty}} \frac{\partial^2 T_e}{\partial r \partial \theta} - K_{TS}^{(0)} \operatorname{Kn} \beta_B \frac{v_e}{2T_{\infty}} R \left[ r \frac{\partial}{\partial r} \left( \frac{1}{r^2} \frac{\partial T_e}{\partial \theta} \right) + \frac{1}{r} \frac{\partial^2 T_e}{\partial \theta \partial r} \right] \Big|_{r=R} \quad (5)$$

$$T_e - T|_{r=R} = K_T^{(T)} \operatorname{Kn} R \frac{\partial T_e}{\partial r} \Big|_{r=R}, \quad (6)$$

$$-B(\theta) - \kappa_e \frac{\partial T_e}{\partial r} + \varepsilon \frac{\partial T}{\partial r} \Big|_{r=R} = -C_q \kappa_e \operatorname{Kn} \frac{1}{r} \left( \frac{\partial^2 T_e}{\partial \theta^2} + \operatorname{ctg} \theta \frac{\partial T_e}{\partial \theta} \right) \Big|_{r=R}, \quad (7)$$

$$V_{\theta}|_{r \rightarrow \infty} = -V_{z\infty} \sin \theta, \quad V_r|_{r \rightarrow \infty} = V_{z\infty} \cos \theta, \quad P = P_{\infty}, \quad T_e|_{r \rightarrow \infty} = T_{e\infty}, \quad (8)$$

где  $B(\theta) = \begin{cases} 0, & 0 < \theta < \frac{\pi}{2}, \\ -Iq \cos \theta, & \frac{\pi}{2} < \theta < \pi, \end{cases}$ ;  $I$  - интенсивность излучения;  $q$ -коэффициент поглощения излучения частицы;  $v_e = \mu_e / \rho_e$  - коэффициент кинематической вязкости;  $V_r, V_{\theta}$  - компоненты скорости газа  $\vec{V}$  в сферической системе координат,  $\vec{V}_{\infty}$  - скорость газа относительно частицы на бесконечности,  $P$  - давление газа,  $T_{\infty}$  - температура газа в месте нахождения частицы,  $T_{e\infty}$  - средняя температура газа у поверхности частицы. Граничные условия на поверхности частицы

лучения частицы;  $v_e = \mu_e / \rho_e$  - коэффициент кинематической вязкости;  $V_r, V_{\theta}$  - компоненты скорости газа  $\vec{V}$  в сферической системе координат,  $\vec{V}_{\infty}$  - скорость газа относительно частицы на бесконечности,  $P$  - давление газа,  $T_{\infty}$  - температура газа в месте нахождения частицы,  $T_{e\infty}$  - средняя температура газа у поверхности частицы. Граничные условия на поверхности частицы



(4)-(7) записаны с учетом газокинетических эффектов, линейных по числу Кнудсена [16]. В (4)-(7)  $K_{TS}^{(0)}, C_m$  - коэффициенты теплового и изотермического скольжений газа вдоль плоской поверхности; коэффициенты  $\beta'_R, \beta_R, \beta_B$  позволяют, соответственно, учесть влияние, оказываемое на тепловое скольжение газа вдоль поверхности частицы кривизной ее поверхности, неоднородностью градиента температуры газа в слое Кнудсена, барнеттовскими температурными напряжениями;  $C_q, C_v$  - газокинетические коэффициенты потоков тепла и среднемассового переноса, растекающихся в слое Кнудсена; коэффициент  $K_T^{(T)}$  - коэффициент скачка температуры [16]. Выражения для газокинетических коэффициентов  $K_{TS}^{(0)}, C_m, C_q, C_v, \beta'_R, \beta_R, \beta_B, K_T^{(T)}$  приведены в [16]. При коэффициентах аккомодации тангенциальной проекции импульса и энергии молекул, равных единице, значения газокинетических коэффициентов, приведенные в [16] равны:

$$C_v = 0,971, C_m = 1,131, K_{TS}^{(0)} = 1,161, \beta'_R = -0,701, \beta_R = 3,731, \beta_B = 3,651, K_T^{(T)} = 2,179, \\ C_q = 0,548. \quad (9)$$

Условие непротекания молекул через поверхность частицы (4) записано с учетом растекание молекул вдоль слоя Кнудсена; условие (5) учитывает изотермическое и тепловое скольжения; условие (6) учитывает скачок температуры газа у поверхности частицы; при записи условия (7) для непрерывности теплового потока учтено растекание потока тепла вдоль слоя Кнудсена.

В процессе решения граничной задачи (3)-(8) было получено следующее выражение для скорости фотофореза твердой черной однородной по теплопроводности умеренно крупной сферической аэрозольной частицы:

$$\vec{U}_{ph}^{(1)} = v_e f_{ph}^{(1)} (qI / 3T_{\infty} \varepsilon) \vec{n}_z, \quad (10)$$

$$f_{ph}^{(1)} = K_{TS}^{(0)} \left\{ \left[ 1 + (\beta'_R + 3\beta_B - 2\beta_R)Kn - (1 + 6C_m Kn)C_v^* Kn \right] \frac{1}{d_e^{(1)}} \right\}, \quad (11)$$

$$d_e^{(1)} = (1 + 2C_m Kn) \left[ (2\kappa_e / \varepsilon)(1 - C_q Kn) + (1 + 2K_T^{(T)} Kn) \right], \quad (12)$$

$$T_{\infty} = T_{\infty} + (qIR / 4\kappa_e), \quad (13)$$

где  $C_v^* = C_v / K_{TS}^{(0)}$ ,  $\vec{n}_z$  - единичный вектор в направлении распространения излучения.

При установившемся фотофоретическом движении частицы на нее действует следующая сила вязкого сопротивления  $\vec{F}_{\mu}^{(1)}$  [3;4]:

$$\vec{F}_{\mu}^{(1)} = -6\pi\mu_e R f_{\mu} \vec{U}_{ph}^{(1)}, \quad (14)$$

$$\text{где } f_{\mu} = \frac{(1 + 2C_m Kn)}{1 + 3C_m Kn}.$$

Сумма фотофоретической силы  $\vec{F}_{ph}^{(1)}$  и силы вязкого сопротивления среды  $\vec{F}_{\mu}^{(1)}$  равна нулю [3;4].

Отсюда следует, что

$$\vec{F}_{ph}^{(1)} = -\vec{F}_{\mu}^{(1)} = 6\pi\mu_e R f_{\mu} \vec{U}_{ph}^{(1)} = 2\pi\mu_e v_e R f_{\mu} f_{ph}^{(1)} (qI / T_{\infty} \varepsilon) \vec{n}_z. \quad (15)$$



### 1.3. Анализ результатов

В работе рассмотрено установившееся фотофоретическое движение в однокомпонентном газе твердой черной умеренно крупной однородной по теплопроводности сферической частицы. Выведенные при этом, достаточно простые, формулы позволяют оценивать фотофоретические скорость и силу умеренно крупных частиц в связи с тем, что при решении задач в граничных условиях на поверхности частицы были учтены все газокинетические эффекты, линейные по числу Кнудсена. Поэтому, с помощью найденных формул можно определять величину фотофоретических скорости и силы с учетом, в частности, и зависимости коэффициента теплового скольжения от кривизны поверхности частицы, неоднородности градиента температуры в слое Кнудсена, барнеттовских температурных напряжений, а также, обусловленного неоднородным распределением температуры, растекания молекул вдоль слоя Кнудсена.

Из выведенных формул для силы и скорости фотофореза видно, что газокинетические поверхностные граничные эффекты могут оказывать заметное влияние на фотофоретическое движение частицы. Например, барнеттовские температурные напряжения вызывают появление дополнительной составляющей фотофоретической силы, направленной в сторону распространения излучения. Граничные эффекты, учитывающие, соответственно, влияние на скорость теплового скольжения вдоль поверхности частицы кривизны ее поверхности и неоднородности градиента температуры в слое Кнудсена, а также растекание вдоль поверхности частицы молекул, замедляют движение частицы. Влияние на силу и скорость фотофореза перечисленных выше эффектов, соответственно, учтено с помощью коэффициентов  $\beta_B, \beta_R', \beta_R, C_V$ .

Численные оценки показали, что при увеличении числа Кнудсена (уменьшении радиуса) умеренно крупных частиц величина их скорости фотофореза монотонно уменьшается. Это достаточно хорошо показывают данные таблиц 1 и 2. В табл.1 приведены зависимости от числа Кнудсена  $K_n$  безразмерного отношения  $f_{Ph}^{(1)} = \left| \vec{U}_{Ph}^{(1)} \right| / (v_e q I / 3 T_{\infty} \varepsilon)$  частиц каменного угля с  $\varepsilon = 0,24 \cdot 10^{-2}$  Вт/см·К, находящихся в воздухе с  $T_{\infty} = 300$ К и давлением  $P = 101325$ Па. Значения отношения  $f_{Ph}^{(1)}$  (11), приведенные в первой строке табл.1, найдены при газокинетических коэффициентах (9). Приведенные, для сравнения, во второй строке табл.1 значения  $f_{Ph}^{(1)}$  вычислены при  $K_{TS}^{(0)} = 1,161, C_m = 1,131, K_T^{(1)} = 2,179, \beta_R' = \beta_R = \beta_B = C_V = C_q = 0$ .

**Таблица 1.** Зависимости от числа Кнудсена безразмерного отношения

$f_{Ph}^{(1)} = \left| \vec{U}_{Ph}^{(1)} \right| / (v_e q I / 3 T_{\infty} \varepsilon)$  сферических частиц каменного угля, находящихся в воздухе с температурой  $T_{\infty} = 300$  К.

$K_n$	0	0,05	0,1	0,15	0,2	0,25	0,3
$f_{Ph}^{(1)}$	0,953	0,791	0,657	0,545	0,450	0,369	0,299
$f_{Ph}^{(1)}$	0,953	0,727	0,573	0,463	0,383	0,321	0,274



Данные табл. 2 показывают, что под действием фотофоретической силы аэрозольные частицы могут приобретать заметную скорость. В табл.2 приведены значения скорости фотофореза частиц каменного угля в воздухе при  $I = 10^3$  Вт/см<sup>2</sup>. Оценка скорости была проведена по формуле (10) при приведенных выше газокинетических коэффициентах (9), температуре  $T_{\infty} = 300$  К,  $\nu_e = 0,15$  см<sup>2</sup>/сек,  $\lambda = 6,2 \cdot 10^{-6}$  см,  $q = 1$ ,  $\varepsilon = 0,24 \cdot 10^{-2}$  Вт/см<sup>2</sup>·К.

Таблица 2

Скорость фотофореза частиц каменного угля в воздухе

Kn	0,1	0,15	0,2	0,25	0,3
$U_{Ph}^{(1)}$ , см / с	38	33	28	24	19

Уменьшение скорости фотофореза частиц связано с тем, что при уменьшении радиуса частиц степень неоднородности распределения температуры вдоль их поверхности уменьшается.

Следует также отметить, что в последнее время возрос интерес к движению частиц сферической формы и при значительных перепадах температуры в окрестности частиц, например, [18, 19, 20, 21]. В частности, в случае фотофореза в этих работах показано, что зависимость силы и скорости фотофореза от средней температуры поверхности частицы носит нелинейный характер.

### Список литературы

#### References

1. Спурный К., Йех Ч. Седлачек Б. 1964. Аэрозоли. М., Атомиздат 360.  
Spurny K., Yeow C. B. Sedlacek B. Aerosols. M., Atomizdat, 360.
2. Preining O. 1969. Photophoresis. Aerosol Science. Ed. by C.N. Davies. London, Academic Press : .111-135.
3. Кутуков В. Б., Шукин Е. Р. 1976. О фотофоретическом движении крупной аэрозольной частицы в поле оптического излучения. ЖТФ, .46(3): 626-627.  
Kutukov V. B. and Shchukin E. R. 1976. On photophoretic motion of large aerosol particles in the field of optical radiation. ZhTF, 46.(3): 626-627 .
4. Reed L.D. 1977. Low Knudsen Number Photophoresis. J. Aerosol Sci., 8: 123-131.
5. Шукин Е. Р., Шулиманова З. Л. 1997. Избранные вопросы физики аэрозолей. Учебное пособие для студентов и аспирантов. Москва, МПУ, 297.  
Shchukin E. R., Suleimanova Z. L. 1992. Selected topics in physics of aerosols. M., IPA, 297.
6. Кутуков В. Б. 1977. Движение макрочастиц в вязких средах в поле оптического излучения. Канд. физ.- мат. наук. М., 159 с.  
Kutukov V. B. 1977. The Movement of particles in viscous media in the field of optical radiation. PhD thesis. Fiz. - Mat. Sciences. M., 159.
7. Зуев Е.В., Землянов А.А., Копытин Ю. Д. Кузиковский А.В. 1984. Мощное лазерное излучение в атмосферном аэрозоле. Новосибирск: Наука, .223.  
Zuev V. E., Zemlyanov A. A., Kopytin Y. D. Kozikowski A.V. 1984. High-power laser radiation in atmospheric aerosols. Novosibirsk, Nauka, 223.
8. Arnold S., Amani Y., Orenstein A. 1980. Photophoretic Spectrometer // Rev. Scient. Instrum., 51 : 1202-1204.
9. Привалов В. Е., Фотиади А.Е. 2013. Лазеры и экологический мониторинг атмосферы. Учебное пособие. Санкт- Петербург: Лань, 288.  
Privalov V. E., Fotiadi A. E. 2013. Lasers and environmental monitoring of the atmosphere. Training manual. St. Petersburg, DOE, 288.
10. Беляев Е. Б., Годлевский А. П., Копытин Ю. Д. 1978. Лазерный спектро-химический анализ аэрозолейю Квантовая электроника, 6 (12): 1152- 1156.  
Belyaev E. B., Godlevskii A. P., Kopytin Y. D. 1978. Laser Spectro-chemical analysis of aerosols. Quantum electronics, 6(12): 1152 - 1156.
11. Береснев С.А., Кочнева Л.Б., Суетин П.Е. 2003. Фотофорез аэрозолей в атмосфере Земли. Теплофизика и аэромеханика, №2 : 297-311.  
Beresnev S. A., Kochneva L. B., Suetin P. E. 2003. Photophoresis of aerosols in the Earth's atmosphere. Thermophysics and Aeromechanics, No. 2: 297-311.



12. Боголепов А.И., Суетин П.Е., Береснев С.А., Быстрой Г.П. 1996. Фотофорез модельных аэрозольных частиц. ТВТ, 34(5) : 751-756.  
Bogolepov A. I., Suetin P. E., Beresnev S. A., Bystray G. P. 1996. Photophoresis of model aerosol particles. TVT, 34(5): 751-756.
13. Яламов Ю.И., Галоян В.С. 1985. Динамика капель в неоднородных вязких средах. Ереван, Луис, 205.  
Yalamov, Y. I. and Galoyan V. S. 1985. Dynamics of droplets in an inhomogeneous viscous media. Yerevan, Luys, 205.
14. Bells S. N. 2016. of Natural and artificial carbon materials. M., "Lenand", 264.
15. Хашпель Дж., Бреннер Г. 1976. Гидродинамика при малых числах Рейнольдса. Москва, Мир, 630.  
Happel J., Brenner H. 1976. Low Reynolds number hydrodynamics. M., Mir, 630.
16. Поддоскин А.Б., Юшканов А.А., Яламов Ю.И. 1982. Теория термофореза умеренно крупных аэрозольных частиц. ЖТФ, Т.52. Вып.11.:2253-2661.  
Poddoskin A.B., Jushkanov A.A., Jalamov JU.I. 1982. Theory thermophoresa moderately large aerosol particles. ZbTF, 52.(11): 2253-2661.
17. Ландау Л.Д., Лифшиц Е.М. 1988. Теоретическая физика: учебное пособие. Т.6. Гидродинамика. Москва, Наука, 736.  
Landau L.D., Lifshits E.M. 1988. Hydrodynamics. M., Nauka, 736.
18. Малай Н.В., Лиманская А.В., Шукин Е.Р., Стукалов А.А. 2012. Фотофорез нагретых крупных аэрозольных частиц сферической формы. Журнал технической физики, 82. № 10: 42-19.  
Malai N.V., Limanskaya A.V., Shchukin E.R., Stukalov A.A. 2012. Photophoresis of Heated Large Spherical Aerosol Particles. ZbTF, 57(10): 1364-1371.
19. Малай Н.В., Рязанов К.С., Шукин Е.Р., Стукалов А.А. О силе, действующей на нагретую сферическую каплю движущуюся в газообразной среде // Прикладная механика и техническая физика. 2011. Т. 52. № 4(308). С. 63-71.  
Malai N.V., Ryazanov K.S., Shchukin E.R., Stukalov A.A. 2011. On the Force acting on a Heated Spherical Drop Moving in a Gaseous Medium. Journal of Applied Mechanics and Technical Physics, 52(4): 553-559.
20. Малай Н.В., Шукин Е.Р., Плесканев А.А., Стукалов А.А. 2006. Особенности фотофоретического движения умеренно крупных аэрозольных частиц сферической формы. Оптика атмосферы и океана, 19(5): 413-418.  
Malai N.V., Shchukin E.R., Pleskanev A.A., Stukalov A.A. 2006. Features of Photophoretic Motion of Moderately Large Spherical Aerosol Particles Form. Optic of atmosphere and ocean, 19(5): 413-418.
21. Шукин Е.Р., Малай Н.В., Шулиманова З.Л. 2013. Молекулярный теплообмен твердой сферической частицы с газообразной средой. Теплофизика высоких температур, 51(4): 552-556.  
Shchukin E.R., Malai N.V., Shulimanova Z.L. 2013. Molecular Heat Exchange of a Solid Spherical Particle with a Gaseous Medium. High Temperature, 51(4): 495-499.