



УДК 533.72

ОСАЖДЕНИЕ В ПЛОСКОПАРАЛЛЕЛЬНОМ ПРЕЦИПИТАТОРЕ АЭРОЗОЛЬНЫХ ЧАСТИЦ ПРИ СОВМЕСТНЫМ ФОТОФОРЕТИЧЕСКИМ И БРОУНОВСКИМ ПЕРЕНОСЕ

*Е.Р. Щукин, **Н.В. Малай, ***З.Л. Шулиманова

*ОИВТ РАН,

Москва, Россия, e-mail: www.oivtran.ru,

**Белгородский государственный университет,

ул. Победы 85, Белгород, 308015, Россия, e-mail: malay@bsu.edu.ru,

***РОАТ, Москва, Россия

Аннотация. Проведено математическое моделирование, обусловленного фотофоретическим и броуновским механизмами, процесса осаждения монодисперсных аэрозольных частиц из ламинарного потока, проходящего через плоскопараллельный фотопреципитатор. При этом получены формулы для коэффициента осаждения и распределения концентрации частиц в поперечных сечениях фотопреципитатора в случае нулевой концентрации частиц у его пластин. Анализ теоретических результатов показал, что броуновская диффузия, в зависимости от размеров частиц, может оказать значительное влияние на процесс захвата частиц в фотопреципитаторе.

Ключевые слова: фотофорез, броуновская диффузия, фотопреципитатор.

1. Введение. На частицы, находящиеся в поле электромагнитного излучения, действует фотофоретическая сила, которая вызывает их упорядоченное движение, называемое фотофорезом [1-4,13]. В случае твердых частиц фотофоретическое движение вызывают две силы: сила радиационного давления и радиометрическая сила молекулярной природы [4-6,13]. Величины фотофоретических силы и скорости зависят от оптических и тепловых свойств частицы, её формы и размеров, длины волны излучения [5-10].

С фотофорезом часто встречаются на практике, например, при просветлении облаков и туманов [11], левитации частиц в электронной промышленности [12] и стратосфере [10].

Высокая монохроматичность лазерного излучения и возможность перестройки длины волны позволяют легко управлять фотофоретическим движением аэрозольных частиц. Поэтому фотофорез может быть широко использован в практических приложениях, например, при выделении и осаждении наночастиц, получаемых в газовой фазе [13], при селективном разделении частиц по размерам [1], при нанесении покрытий из аэрозольных частиц [2], при тонкой доочистке от вредных аэрозольных частиц небольших объемов газа [14], что требуется, в частности, при создании стерильных условий в здравоохранении, микробиологической промышленности, точном машиностроении. Все это можно проводить в фотопреципитаторах, например, плоскопараллельных, где направленное фотофоретическое движение частиц происходит в поле, например, лазерного излучения. Следует отметить, что на процесс осаждения в фотопреципитаторе микронных и субмикронных частиц, наряду с фотофоретической силой значительное влияние



может оказать и броуновская диффузия [1,15]. В результате действия Броуновского механизма [1,15] аэрозольные частицы в фотопреципитаторе перемещаются в области с их меньшей концентрацией, что может сказаться на интенсивности захвата частиц и характере их распределения в поперечных сечениях фотопреципитатора. Ниже это будет показано на примере осаждения частиц монодисперсного аэрозоля из, проходящего через плоскопараллельный фотопреципитатор, установившегося ламинарного газового потока.

2. Основная модель. Мы построим математическую модель, которая учитывает влияние броуновской диффузии и фотофореза на процесс осаждения аэрозольных частиц в плоскопараллельном фотопреципитаторе. Рассмотрим вертикально расположенный плоскопараллельный фотопреципитатор, через который проходит ламинарный газовый поток. В потоке во взвешенном состоянии находятся монодисперсные аэрозольные частицы, которые оседают на поверхностях пластин фотопреципитатора. Фотопреципитатор образован двумя прозрачными для излучения пластинами. Пластины могут быть съёмными или жестко закрепленными.

Осаждение частиц в фотопреципитаторе обусловлено совместным действием фотофоретического и броуновского механизмов. Фотофоретическое движение частиц происходит в направлении второй пластины. Ширина b и длина l_c пластин фотопреципитатора много больше расстояния $H = 2h$ между пластинами. В проходящем через фотопреципитатор газовом потоке концентрация N аэрозольных частиц достаточно мала, чтобы можно было пренебречь влиянием частиц на распределение в потоке газодинамических величин и взаимное движение частиц. Оценка осаждения частиц проводится в зоне полностью развитого ламинарного течения с пуазейлевским профилем продольной координаты массовой скорости

$$V_z = V_0 (1 - t^2) , \quad (1)$$

где $t = x/h$, $V_0 = 3Q/4h\rho b$, Q — массовый расход газа в канале; ρ — плотность газа. Если при этом основное влияние на процесс осаждения оказывает только фотофорез, то в этом случае длина, на которой происходит полное фотофоретическое осаждение частиц равна

$$l_c = (4hV_0/3U_q) , \quad (2)$$

где U_q — поперечная координата фотофоретической скорости.

В фотопреципитаторе, в связи с малой инертностью, величина продольной координаты скорости частиц U_z равна продольной координате V_z массовой скорости газа (1). Поперечная координата скорости частиц U_{px} равна поперечной координате U_q фотофоретической скорости. Диффузионные продольные числа Пекле частиц в фотопреципитаторе много больше единицы. При этом можно пренебречь продольным Броуновским переносом частиц. В зону полностью развитого течения поступает поток газа с однородно распределенными частицами. Концентрацию частиц у стенок фотопреципитатора будем считать равной нулю [1]. Рассмотрение процесса осаждения проводится в ортогональной декартовой системе координат $xOyz$, начало которой совпадает с центром входного сечения зоны с пуазейлевским профилем течения. При рассмотренных выше



условиях в зоне осаждения частиц распределение концентрации N частиц описывается уравнением сохранения числа частиц (3) с граничными условиями (4)

$$V_0 (1 - t^2) \frac{\partial N}{\partial z} + U_{px} \frac{\partial N}{\partial x} = D_B \frac{\partial^2 N}{\partial z^2}, \quad (3)$$

$$N|_{x=\pm h} = 0, \quad N|_{z=0} = N_0. \quad (4)$$

В формуле (3) $D_B = (kT/6\pi\mu_e R) \{1 + Kn [A + B \exp(-C/Kn)]\}$ — коэффициент броуновской диффузии [1], k — постоянная Больцмана, μ_e — динамическая вязкость газа, R — средний размер частиц, $Kn = \lambda/R$, λ — средняя длина свободного пробега молекул газа, $A = 1, 246$, $B = 0, 42$, $C = 0, 89$ [1].

Решение граничной задачи (3)-(4) было проведено методом разделения переменных. При этом было получено следующее выражение для распределения частиц N :

$$N = e^{\beta t} N_0 \sum_{n=0}^{\infty} \left[A_n^{(S)} \theta_n^{(S)}(t) e^{\lambda_n^{(S)2} \xi} + A_n^{(a)} \theta_n^{(a)}(t) e^{\lambda_n^{(a)2} \xi} \right], \quad (5)$$

где $\beta = U_q h / 2D_B$, $\xi = D_B z / V_0 h^2$. Функции $\theta_n^{(S)}(t)$ и $\theta_n^{(a)}(t)$ находятся по формулам (6), (7)

$$\theta_n^{(S)}(t) = F_n^{(S)} \exp(-\lambda_n^{(S)} t^2 / 2), \quad F_n^{(S)}(t) = F_1(b_n^{(S)}; d^{(S)}; \lambda_n^{(S)} t^2), \quad (6)$$

$$\theta_n^{(a)}(t) = t F_n^{(a)} \exp(-\lambda_n^{(a)} t^2 / 2), \quad F_n^{(a)}(t) = F_1(b_n^{(a)}; d^{(a)}; \lambda_n^{(a)} t^2), \quad (7)$$

$$b_n^{(S)} = \frac{1}{4} \left[1 - \left(\lambda_n^{(S)} - \frac{\beta^2}{\lambda_n^{(S)}} \right) \right], \quad d^{(S)} = \frac{1}{2}, \quad b_n^{(a)} = \frac{1}{4} \left[3 - \left(\lambda_n^{(a)} - \frac{\beta^2}{\lambda_n^{(a)}} \right) \right], \quad d^{(a)} = \frac{3}{2}.$$

В формулах (6) и (7) функция $F_1(b; d; \lambda t^2)$ — вырожденная гипергеометрическая функция, равная

$$F_1(b; d; \lambda t^2) = 1 + \sum_{k=1}^{\infty} \frac{b(b+1) \dots (b+k-1)}{d(d+1) \dots (d+k-1) k!} \lambda^k t^{2k}. \quad (8)$$

Значения $\lambda_n^{(S)}$ и $\lambda_n^{(a)}$ находятся из условия

$$\theta_n^{(S)}(t)|_{t=1} = 0, \quad \theta_n^{(a)}(t)|_{t=1} = 0. \quad (9)$$

Функции $\theta_n^{(S)}(t)$ и $\theta_n^{(a)}(t)$ — ортогональные с весом $(1 - t^2)$ функции. Коэффициенты $A_n^{(S)}$ и $A_n^{(a)}$ находятся по формулам

$$A_n^{(S)} = \int_{-1}^1 (1 - t^2) \theta_n^{(S)}(t) \exp(-\beta t) dt / \int_{-1}^1 (1 - t^2) \theta_n^{(S)2}(t) dt, \quad (10)$$

$$A_n^{(a)} = \int_{-1}^1 (1 - t^2) \theta_n^{(a)}(t) \exp(-\beta t) dt / \int_{-1}^1 (1 - t^2) \theta_n^{(a)2}(t) dt.$$



Плотность потоков в каждой точке левой и правой пластин фотопреципитатора находятся по формулам (11)

$$q_1 = D_B \left. \frac{\partial N}{\partial x} \right|_{x=-h}, \quad q_2 = -D_B \left. \frac{\partial N}{\partial x} \right|_{x=h}. \quad (11)$$

После проведения интегрирования формул (11) вдоль поверхности пластин фотопреципитатора с учетом выражения для N (5) были получены следующие формулы для потоков Q_1 и Q_2 частиц, оседающих на первой и второй пластине на длине z :

$$Q_1 = V_0 h b \Phi_1^{(S)}(\xi), \quad Q_2 = V_0 h b \Phi_2^{(S)}(\xi), \quad (12)$$

в которых

$$\Phi_1^{(S)}(\xi) = e^{-\beta} \sum_{n=0}^{\infty} \{ G_n^{(S)} [1 - \exp(-\lambda_n^{(S)2} \xi)] - G_n^{(a)} [1 - \exp(-\lambda_n^{(a)2} \xi)] \},$$

$$\Phi_2^{(S)}(\xi) = e^{\beta} \sum_{n=0}^{\infty} \{ G_n^{(S)} [1 - \exp(-\lambda_n^{(S)2} \xi)] + G_n^{(a)} [1 - \exp(-\lambda_n^{(a)2} \xi)] \},$$

$$G_n^{(S)} = -\frac{1}{\lambda_n^{(S)2}} A_n^{(S)} \left(\frac{d}{dt} F_n^{(S)}(t) \Big|_{t=1} \right) \exp(-\lambda_n^{(S)2}/2),$$

$$G_n^{(a)} = -\frac{1}{\lambda_n^{(a)2}} A_n^{(a)} \left(\frac{d}{dt} F_n^{(a)}(t) \Big|_{t=1} \right) \exp(-\lambda_n^{(a)2}/2).$$

В канал поступает поток частиц, равный

$$W = 4V_0 h b / 3. \quad (13)$$

С учетом формулы для W (13), выражения для коэффициентов осаждения γ_1 и γ_2 частиц на длине z левой и правой пластин фотопреципитатора принимают следующий вид:

$$\gamma_1 = Q_1/W = \frac{3}{4} \Phi_1^{(S)}(\xi), \quad \gamma_2 = Q_2/W = \frac{3}{4} \Phi_2^{(S)}(\xi). \quad (14)$$

Коэффициент проскока частиц γ_3 через сечение фотопреципитатора с координатой z вычисляется по формуле

$$\gamma_3 = [1 - (\gamma_1 + \gamma_2)]. \quad (15)$$

Учтя выражения для γ_1 и γ_2 (14), коэффициент проскока γ_3 можно представить в следующем виде:

$$\gamma_3 = \frac{3}{4} \left\{ (e^{\beta} + e^{-\beta}) \sum_{n=0}^{\infty} G_n^{(S)} \exp(-\lambda_n^{(S)2} \xi) + (e^{\beta} - e^{-\beta}) \sum_{n=0}^{\infty} G_n^{(a)} \exp(-\lambda_n^{(a)2} \xi) \right\}. \quad (16)$$

Проведенный численный анализ полученных формул показал, что характер взаимного влияния фотофоретического и броуновского механизмов на процесс осаждения



частиц в фотопреципитаторе определяется величиной параметра $\beta = U_q h / 2D_B$. Это хорошо показывает ход кривых, приведенных на рис. 1. Кривые 1 и 2 этих рисунков показывают зависимость коэффициентов γ_1 и γ_2 от параметра β , изменяющегося в пределах от 0 (когда $U_q=0$) до 3.5. Из рисунка видно, что уже при $\beta \geq 0.2$ поперечное движение частиц, обусловленное действием фотофоретической силы, начинает оказывать заметное влияние на процесс осаждения частиц в канале на поверхности второй пластины. В этом случае на второй пластине может осесть до 58% от общего числа частиц, поступающих в канал. При $\beta \geq 0.9$ на второй пластине могут осесть уже свыше 79%. Следует отметить, что при слабом влиянии броуновской диффузии на процесс осаждения (случай достаточно крупных частиц) все частицы поступившие в канал осели бы на поверхности второй пластины ($\gamma_2 = 1$).

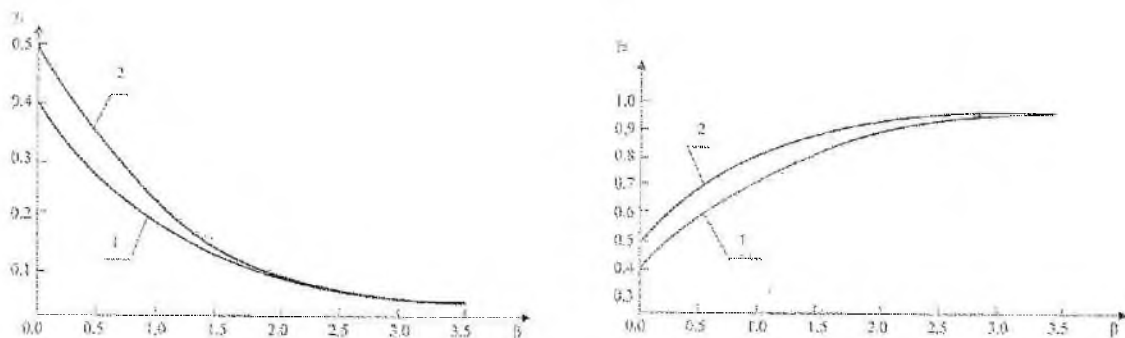


Рис. 1. Кривые зависимости γ_1 и γ_2 от β при $\xi = 0.5$ – кривая 1 и при $\xi = 2.5$ – кривая 2.

В приложениях, как правило, представляет интерес оценка величины длины рабочей части фотопреципитатора, на которой происходит близкое к полному осаждение частиц. При проведении такой оценки γ_3 по формуле (16), входящую в неё переменную ξ удобно представить в следующем виде:

$$\xi = p(2/3\beta) , \tag{17}$$

где $p = z/l_C$, l_C – длина (2), на которой происходит полное чисто фотофоретическое осаждение частиц в отсутствии броуновской диффузии. Здесь следует отметить, что броуновская диффузия, вызывая перенос частиц в места с их меньшей концентрацией сглаживает профиль распределения концентрации частиц в поперечных сечениях фотопреципитатора, даже в случаях, когда основное влияние на поперечный перенос частиц оказывает фотофоретический механизм. При чисто фотофоретическом осаждении частиц (пренебрежимо слабое влияние броуновской диффузии) распределение концентрации частиц вдоль траекторий их движения остается постоянной. Броуновское сглаживание концентрации частиц в поперечных сечениях замедляет процесс осаждения частиц на поверхностях пластин фотопреципитатора и приводит к увеличению длины той части фотопреципитатора, в которой происходит полное осаждение частиц. Это подтверждают данные таблицы, в которой приведена зависимость коэффициента проскока γ_3 от параметра β и переменной p . При нахождении значений γ_3 была использована формула (16).



Таблица 1

Зависимость коэффициента проскока γ_3 от параметра β и переменной p

| | | | |
|----------------------|--------------|--------------|---------------|
| $p \backslash \beta$ | 0.3 | 0.7 | 2 |
| 0.6 | 1.8505922-02 | 1.3992825-01 | 3.1953962-01 |
| 0.8 | 5.0310892-03 | 7.3416420-02 | 2.0165658-01 |
| 1.0 | 1.3677701-03 | 3.8514680-02 | 1.2515534-01 |
| 1.2 | 3.7184710-04 | 2.0204700-02 | 7.7078527 -02 |
| 1.5 | 5.2709780-05 | 7.6769730-03 | 3.7028242-02 |
| 2.0 | 2.0312781-06 | 1.5302153-03 | 1.0856362-02 |
| $p \backslash \beta$ | 4 | 8 | 12 |
| 0.6 | 3.7268825-01 | 3.9168900-01 | 5.1585867-01 |
| 0.8 | 2.244D681-01 | 2.1795132-01 | 2.3404571-01 |
| 1.0 | 1.2601671-01 | 1.0128966-01 | 8.9567872-02 |
| 1.2 | 6.7712525-02 | 4.0919095-02 | 2.7693890-03 |
| 1.5 | 2.5438740-02 | 8.8442122-03 | 3.5177717-03 |
| 2.0 | 4.6920552-03 | 5.3924660-04 | 7.1526830-05 |

Заключение. Полученные формулы позволяют оценивать осаждение из пуазейлевского газового потока аэрозольных частиц, происходящее в результате совместного действия фотофоретического и броуновского механизмов в плоскопараллельном фотопреципитаторе. Осаждение частиц рассмотрено при нулевой концентрации частиц у его пластин. Проведенный численный анализ теоретических результатов показал, что, обусловленный совместным действием фотофоретической силы и броуновской диффузией, процесс осаждения частиц в фотопреципитаторе носит неаддитивный характер. Броуновская диффузия может оказать значительное влияние на характер распределения частиц в поперечных сечениях фотопреципитатора и тем самым на интенсивность их захвата его пластинами.

Литература

1. Фукс Н.А. Механика аэрозолей / М.: Изд-во АН СССР, 1955. – 352 с.
2. Спурный К., Йех Ч., Шторх О. Аэрозоли / М.: Атомиздат, 1964. – 360 с.
3. Грин Х., Лейн В. Аэрозоли — пыли, дымы и туманы / Л.: Химия, 1969. – 428 с.
4. Аскарьян Г.А. Движение частиц в луче лазера // УФН. – 1973. – 110; №1. – С.115–116.
5. Зуев В.Е., Копытин Ю.Д., Кузиковский А.В. Нелинейные оптические эффекты в аэрозолях / М.: Наука, 1980. – 186 с.
6. Кутуков В.Б. Теория движения макрочастиц в вязких средах в поле электромагнитного излучения / Дисс.канд. физ.-мат. наук / М.:МИФИ, 1976. – 116 с.
7. Tong N.T. Experiment on photophoresis and thermophoresis // J. Coll. Int. Sci. – 1975. – 51; №1. – P.143–151.
8. Шукин Е.Р., Еремчук Т.М. О фотофорезе умеренно крупной сферической частицы с коэффициентом теплопроводности, зависящим от радиальной координаты // ЖТФ. – 1996. – 22. – Вып.18. – С.33–36.



9. Марков М.Г., Шукин Е.Р. К вопросу о движении малых аэрозольных частиц, содержащих неоднородно распределенные по объёму внутренние источники тепла, в многоатомных газах // ИФЖ. – 1981. – 41; №6. – С.1045–1048.
10. Береснев С.А., Ковалев Ф.Д., Кочнева Л.Б. и др. О возможности фотофоретической левитации частиц в стратосфере // Оптика атмосферы и океана. – 2003. – 16; 1. – С.52–57.
11. Зуев В.К., Землянов А.А., Копытин Ю.Д., Кузиковский В.А. Мощное лазерное излучение в атмосферном аэрозоле / Новосибирск: Наука, 1984. – 224 с.
12. Урузаев В. Техническая левитация. Обзор методов.// Технологии в электронной промышленности. – 2007. – №6.
13. Шукин Е.Р., Малай Н.В. Фотофоретическое и термодиффузиофоретическое движение нагретых нелетучих аэрозольных частиц // Инженерно-физический журнал. – 1988. – 54; № 4. – С.628-635.

**SEDIMENTATION OF AEROSOL PARTICLES
IN PLANE-PARALLEL PRECIPITATORE AT JOINT ACTION
OF PHOTOPHORESIS AND BROWNNIAN TRANSFERS**

E.R. Shchukin, N.V. Malay, Z.L. Shulimanova

Belgorod State University,
Pobedy St. 85, Belgorod, 308015, Russia, e-mail: malay@bsu.edu.ru

Abstract. The mathematical modeling of the sedimentation process of monodisperse aerosol particles caused at joint action of photophoresis and brown mechanisms from the laminar stream which is passing through plane-parallel precipitator is spent. Formulas for sedimentation factor and particle concentration distribution in cross-section sections of photoprecipitator in case of zero concentration of particles at its plates are obtained. The analysis of theoretical results has shown that the brown diffusion depending on particles sizes can make considerable impact on process of particles capture in photoprecipitator.

Key words: photophores, brown diffusion, photoprecipitator.