

УДК 533.6.011.6  
EDN: XGJHUE

PACS: 52.65.Cc



## Модель расчета траектории движения мелкодисперсного порошка $Al_2O_3$ в плазменном потоке

Ю. В. Мурашов, Н. В. Образцов, Н. К. Куракина, Р. И. Жилиготов

*Представлено исследование траекторий сферической частицы  $Al_2O_3$  в потоке термической плазмы. На основе двухмерной нестационарной численной модели представлены результаты расчетов траектории движения частиц напыляемого порошка для основных моделей расчета коэффициента лобового сопротивления частиц. Разработанная нестационарная модель позволяет учесть взаимное влияние потока частиц, транспортирующего газа и плазменного потока, генерируемого плазматроном. Представлены диапазоны применимости моделей. Уточнена зависимость коэффициента лобового сопротивления одиночной частицы в неизотермическом потоке от относительного числа Рейнольдса. Сравнительный анализ численной модели расчета траектории движения частицы с натурными испытаниями показал хорошее соответствие расчетных и экспериментальных данных.*

*Ключевые слова:* термическая плазма, дуговой плазматрон, коэффициент лобового сопротивления, число Рейнольдса, численное моделирование.

DOI: 10.51368/2307-4469-2024-12-2-178-186

### Введение

Плазмогенерирующие устройства являются высокоэффективным инструментом, обладающие высокой плотностью энергии и применяемые во многих отраслях промышленности [1–3]. Устройства позволяют получать температуры плазменного потока вплоть до 20 тысяч градусов кельвина и большим диапазоном

скоростей от метров до сотен метров в секунду. Основными примерами применения дугового разряда являются плазменное напыление [4–7], дуговая сварка [8–10] и плазменная резка металлов [11, 12], где в качестве рабочего инструмента используется плазменный поток, генерируемый плазматроном.

Повышение эффективности процесса плазменного напыления представляет особый интерес с научной и технической стороны. Технология плазменного напыления является высокоэффективным способом создания восстанавливающих, жаростойких, антикоррозионных, износостойких и антифрикционных покрытий, также напыление/наплавка может быть использована в аддитивных технологиях [13–15]. Эффективность технологии плазменного напыления и качество наносимого покрытия зависят от свойств наносимых материалов и характеристик плазменного потока. Именно поэтому главной технологической задачей при разработке новых конструкций плазматронов для напыления является получение оптимальных параметров плазменного

**Мурашов Юрий Васильевич**, с.н.с., вед. инженер, к.т.н.

**Образцов Никита Владимирович**, доцент, к.т.н.  
E-mail: obraztsovnikita@yandex.ru

**Куракина Наталья Константиновна**, доцент, к.т.н.  
**Жилиготов Руслан Игоревич**, доцент, к.т.н.

Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого.  
Россия, 195251, Санкт-Петербург,  
ул. Политехническая, 29.

Статья поступила в редакцию 12.03.2024

После доработки 5.04.2024

Принята к публикации 19.04.2024

Шифр научной специальности: 1.3.9

© Мурашов Ю. В., Образцов Н. В., Куракина Н. К., Жилиготов Р. И., 2024

потока и режимов работы плазматрона, обеспечивающих эффективность технологического процесса, качество наносимого покрытия и высокий рабочий ресурс конструктивных элементов плазматрона. Научные исследования, направленные на повышение эффективности технологии плазменного напыления, проводятся во всем мире [16–19].

Рассмотрение процессов теплопереноса применительно к напыляемым частицам упрощается при представлении последних в виде сферических тел. В таком случае, описание теплообмена нагреваемого порошка в потоках термической плазмы и доплазменных струй возможно с применением критериальных формул, указанных в источнике приведенных в работе [20].

Целью данного исследования является развитие теории теплообменных процессов при движении частицы в потоке термической плазмы. В работе проводится численное исследование и сравнение с натурным экспериментом при использовании плазматрона ПН-В1. На основе полученных результатов определены расчетные выражения коэффициента лобового сопротивления и числа Нуссельта, выполнено численное моделирование трассировки и нагрева частиц в плазменном потоке. При построении численной модели задана двунаправленная взаимосвязь между трассировкой и нагревом частиц и задачей теплопереноса неизотермического потока. В качестве начальных и граничных условий использовались результаты моделирования работы плазматрона с учетом влияния параметров источника питания АПР-404, подробное описание представлено в работе [21].

### Математическая модель трассировки и нагрева частиц в плазменном потоке

В представленной работе рассматриваются расчеты траектории движения мелкодисперсного порошка  $Al_2O_3$  для различных моделей коэффициента лобового сопротивления сферической частицы, инжектированных в плазменный поток. В качестве инструмента используется программный продукт COMSOL Multiphysics. Рассматривается ламинарное течение сжимаемой вязкой теплопроводящей среды (воздуха) и мелкодисперсной частицы

$Al_2O_3$  диаметром 50 мкм. Динамика среды описывается системой уравнений неразрывности (1), Навье-Стокса (2), баланса энергии (3):

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho \vec{v}) = 0 \quad (1)$$

$$\rho \frac{\partial \vec{v}}{\partial t} + \rho \vec{v} \cdot \nabla \vec{v} = -\nabla p + \nabla \cdot \tau + \vec{F} \quad (2)$$

$$C_p \left( \frac{\partial T}{\partial t} + \vec{u} \cdot \nabla T \right) = -(\nabla \cdot \vec{q}) + \tau : S - \frac{T}{\rho} \frac{\partial \rho}{\partial T} \left( \frac{\partial p}{\partial t} + \vec{u} \cdot \nabla p \right) \quad (3)$$

где  $t$  – время;  $\vec{u}$  – вектор скорости;  $\rho$ ,  $p$ ,  $T$  – плотность, давление и температура среды соответственно;  $C_p$  – теплоемкость среды при постоянном давлении;  $\tau$  – тензор вязких напряжений;  $\vec{q}$  – вектор теплового потока ( $\lambda \nabla T$ );  $\lambda$  – теплопроводность среды;  $S$  – тензор скорости деформации:  $S = (\nabla \vec{u} + (\nabla \vec{u})^T)$ ;  $\vec{F}$  – вектор сил, действующий на поток со стороны нагреваемого порошка (частиц).

Движение частицы в потоке плазмы описывается с помощью второго закона Ньютона и учетом всех действующих на частицу сил:

$$\frac{dm_p \cdot \vec{v}_p}{dt} = \vec{F} \quad (4)$$

В соответствии с описанием, представленным в [20], на поток частиц действуют:

- сила аэродинамического сопротивления:

$$\vec{F}_a = \tau_p m_p (\vec{v}_f - \vec{v}_p) \quad (5)$$

- сила тяжести:

$$\vec{F}_g = m_p \vec{g} \frac{\rho_p - \rho_f}{\rho_p} \quad (6)$$

- сила термофореза:

$$\vec{F}_t = -C_s \frac{6\pi d_p \mu^2 \frac{\lambda}{\lambda_p} \nabla T}{\rho \left( 2 \frac{\lambda}{\lambda_p} + 1 \right) T} \quad (7)$$

Кроме выше представленных сил, на частицу в неизотермическом потоке действуют силы Архимеда, Магнуса, Бассе и присоединенной массы, однако, количественная оценка этих сил показывает, что ими можно пренебречь без потери точности решения задачи трассировки. Таким образом, уравнение (4) с учетом уравнений (5), (6) и (7) будет иметь следующий вид:

$$\frac{dm_p \cdot \overline{v_p}}{dt} = \tau_p m_p (\overline{v_f} - \overline{v_p}) + m_p \vec{g} \frac{\rho_p - \rho_f}{\rho_p} - C_s \frac{6\pi d_p \mu^2 \frac{\lambda}{\lambda_p} \nabla T}{\rho \left( 2 \frac{\lambda}{\lambda_p} + 1 \right) T}, \quad (8)$$

где  $m_p$  – масса частицы;  $m_p, \rho_p$  – масса и плотность частицы;  $\rho_f$  – плотность плазменного потока;  $\tau_p$  – время отклика скорости частицы;  $\overline{v_f}, \overline{v_p}$  – скорости плазменного потока и частицы соответственно, где  $C_s$  – термофорети-

ческий поправочный коэффициент;  $\lambda, \mu, \rho, T$  – теплопроводность, динамическая вязкость, плотность и температура плазменного потока;  $\lambda_p$  – теплопроводность частицы.

В данной модели не учитывается влияние вращения частиц и нестационарность пограничного слоя, поскольку эти явления несущественно влияют на траектории частиц в плазменном потоке [20].

Экспериментальные исследования в [22, 23] показали, что в приосевой области основная роль в формировании траектории частиц принадлежит силе аэродинамического сопротивления. Кроме этого, для частицы, превышающей 50 мкм, силой термофореза можно пренебречь [22, 23].

Основную неопределенность в уравнении (8) представляет расчет времени отклика частицы на плазменный поток. В настоящее время существует большое количество расчетных моделей времени отклика и коэффициента лобового сопротивления, основные из которых представлены в таблице.

Таблица

Модели расчета силы аэродинамического сопротивления

Параметр модели	$\tau_p$	$C_d$	$Re_r$
Модель Стокса (Stokes)	$\frac{\rho_p d_p^2}{18\mu}$	–	–
Модель Шлирена-Неймана (Schiller-Naumann)	$\frac{4\rho_p d_p^2}{3\mu C_d Re_r}$	$\frac{24}{Re_r} (1 + 0,15 Re_r^{0,687})$	$\frac{\rho(v_f - v_p) d_p}{\mu}$
Модель Озеена (Oseen)		$\frac{24}{Re_r} \left( 1 + \frac{3}{16} Re_r \right)$	
Модель Хэйдера-Левеншпиля (Haider-Levenspiel)		$\frac{24}{Re_r} \left[ 1 + A(S_p) Re_r^{B(S_p)} \right] + \dots + \frac{C(S_p)}{1 + D(S_p)/Re_r}$	
Модель Хадамарда-Рыбчинского (Hadamard-Rybczynski)		$\frac{8}{Re_r} \left( \frac{2 + 3 \frac{\mu_p}{\mu}}{1 + \frac{\mu_p}{\mu}} \right)$	
Стандартная корреляция аэродинамического сопротивления (Standard drag correlation)		$f = (Re_r)$	
Модель Дресвина (Dresvin)		$\frac{16,6}{Re_r^{0,75}} + 0,2$	

Из графического анализа (рис. 1–2) видно незначительное различие между предлагаемыми моделями при  $Re > 2$ . В диапазоне  $Re$  от 0 до 2 существенно отличается график зависимости коэффициента лобового сопротивления от числа Рейнольдса, предлагаемой модели Дресвина, что согласуется с результатами экспериментальных исследований по сферо-

идизации оксида алюминия дисперсностью от 300 до 800 мкм в потоке плазмы ВЧИ плазмотрона [1, 20].

Число Нуссельта ( $Nu$ ) — это безразмерный параметр, который используется для характеристики интенсивности теплообмена между поверхностью тела и окружающей средой и является функцией чисел Рейнольдса и Прандтля.

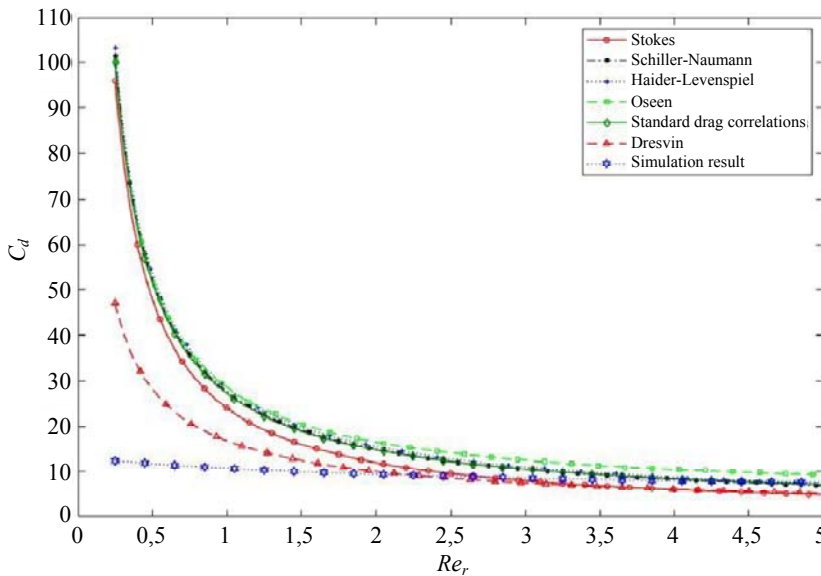


Рис. 1. Зависимость коэффициента лобового сопротивления от относительного числа Рейнольдса

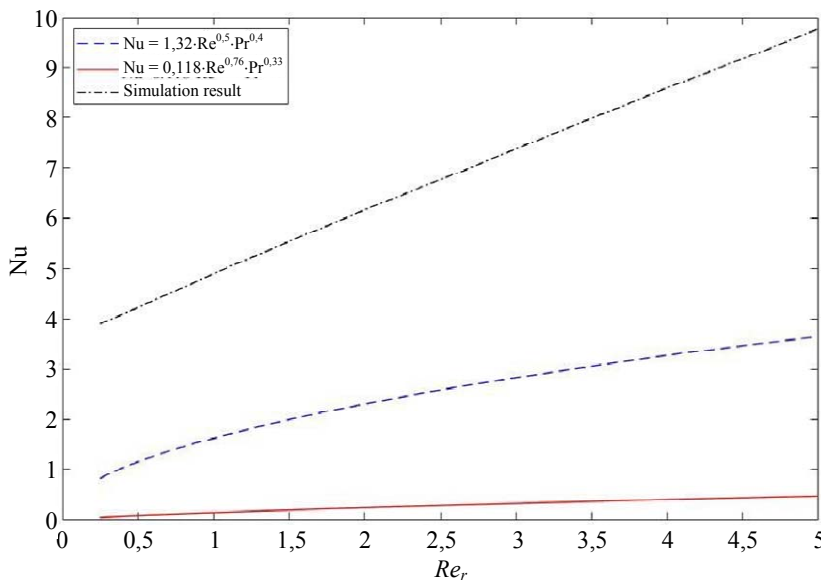


Рис. 2. Зависимость числа Нуссельта от относительного числа Рейнольдса

На основании выполненного авторским коллективом ранее численного моделирования [24, 25] получена зависимость коэффициента лобового сопротивления одиночной частицы в неизотермическом потоке  $C_d$  от относительного числа Рейнольдса  $Re_r$ :

$$C_d = \frac{48,24}{3,49 + Re_r^{0,69}}. \tag{9}$$

Предлагаемая в работе формула (9), как показано далее, позволяет выполнить численные исследования расчета траектории движе-

ния одиночной сферической частицы в неизотермическом потоке в близком соответствии с натурными испытаниями.

Закон сохранения энергии (3) устанавливает соотношение между коэффициентом теплообмена с параметрами и характером течения плазменного потока. В качестве основного механизма теплопередачи при допущении о неподвижности пограничного слоя можно рассматривать теплопроводность, а не конвекцию. Таким образом, энергию, получаемую от неизотермического потока, можно выразить через уравнение Ньютона-Рихмана, приравняв к энергии, передаваемой механизмом теплопроводности и описываемой уравнением Фурье:

$$h(T_f - T_p) = \text{Nu} \frac{\lambda_p}{d_p} (T_f - T_p), \quad (10)$$

Температура частицы определяется в соответствии с уравнением Ньютона-Рихмана:

$$m_p C_p \frac{dT_p}{dt} = h(T_f - T_p). \quad (11)$$

Таким образом, тепловой поток для сферической частицы может быть вычислен по следующей формуле:

$$q = \text{Nu} \cdot \frac{\overline{\lambda}_f}{d_p} \cdot (T_f - T_c), \quad (12)$$

где  $T_c$  – температура поверхности сферической частицы;  $\overline{\lambda}_f = \frac{1}{T_f - T_c} \cdot \int_{T_c}^{T_f} \lambda(T) dT$ .

Для моделирования рассматривается расчетная область, которая представляет собой зону истечения плазменного потока из сопла плазматрона (рис. 3).

В качестве начальных и граничных условий использовались результаты моделирования плазматрона, выполненного авторами в [21]. На границе АВ (рис. 3б) задано полученное распределение температуры и компоненты скорости на выходе из сопла плазматрона. Граница ЕF (рис. 3б) является областью подачи порошка  $\text{Al}_2\text{O}_3$ , диаметр частицы 50 мкм. Расход частиц составляет 0,5 кг/ч, транспортирующего газа 0,04 г/с. На границе ГНКА (рис. 3б) задано условие истекания теплового потока и давление 1 атм. Через функцию источника учтено влияние распределения температуры на границе АВ (рис. 3б), потери на излучение и потери на нагрев частицы. Также учтены силы, действующие на плазменный поток со стороны сферических частиц, что является критическим при высокой загрузке плазменного потока напыляемым порошком.

Численная модель является задачей с учетом связей взаимного влияния потока и частицы. Выполнен учет воздействия частиц и транспортирующего газа на плазменный поток (в ходе решения определяются удельные объемные силы и тепловая мощность, поглощаемая в процессе нагрева частиц).

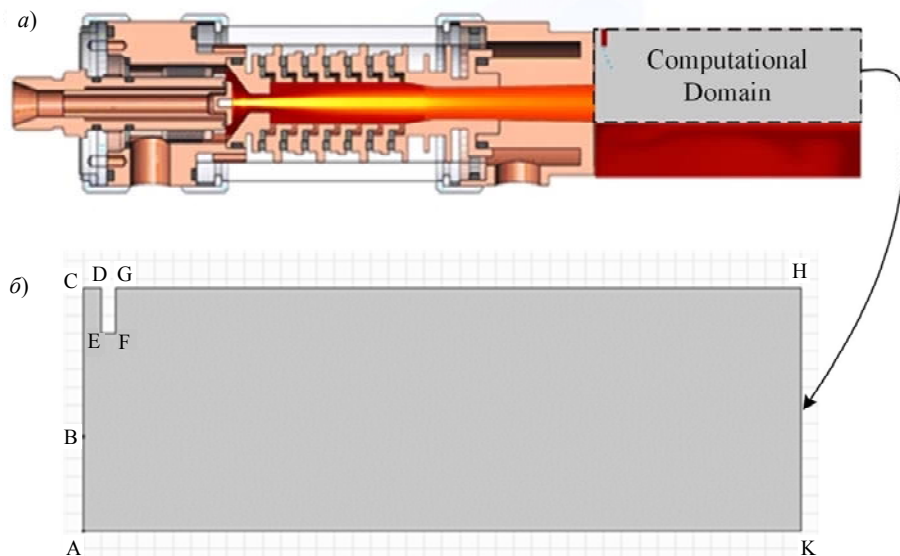


Рис. 3. Геометрия расчетной области: а) – сопряженная с плазматроном, б) – с указанием граничных условий

## Результаты моделирования

Основным результатом работы является расчет траектории движения частицы в неизотермическом потоке для разных моделей. Результаты моделирования при расходах порошка  $\text{Al}_2\text{O}_3$  0,5 кг/ч и транспортирующего газа 0,04 г/с для разных моделей идентификации времени отклика скорости (лобового сопротивления) частиц представлены на рисунке 4.

В соответствии с результатами численного моделирования для модели Хэйдера-Левеншпиля (Haider-Levenspiel) максимальная скорость частиц составляет 95 м/с, а дистанция от края входа EF (рис. 3б) до достижения нижнего края расчетной области – 4 мм, что не соответствует результатам натурных испытаний. В случае использования стандартной корреляции аэродинамического сопротивления [16] максимальная скорость составляет 170 м/с, при этом частицы оксида алюминия вылетают за пределы расчетной области через границу НК (рис. 3б), что также не соответствует результатам экспериментального исследования. Иллюстрация экспериментально-

го исследования для указанного выше технологического режима при использовании плазмотрона ПН-В1 представлена на рисунке 5, красными контурами обозначены результаты моделирования (Author's model) с использованием предложенной зависимости коэффициента лобового сопротивления одиночной частицы (9).

Визуальный анализ, выполненный путем наложения результатов численного моделирования на фотографию технологического процесса распыления, представлен на рисунке 5. Результаты моделирования с использованием модели Дресвина (Dresvin model) и авторской модели (Author's model) в разных точках расчетной области демонстрируют схожие результаты относительно усредненной траектории движения частицы на рисунке 6.

Проведенный анализ демонстрирует качественное соответствие предлагаемой авторским коллективом модели расчета натурным испытаниям и более точное совпадение в сравнении с другими моделями. Количественное расхождение относительной погрешности авторской модели с экспериментальными данными, в среднем, не превышает 2 процентов.

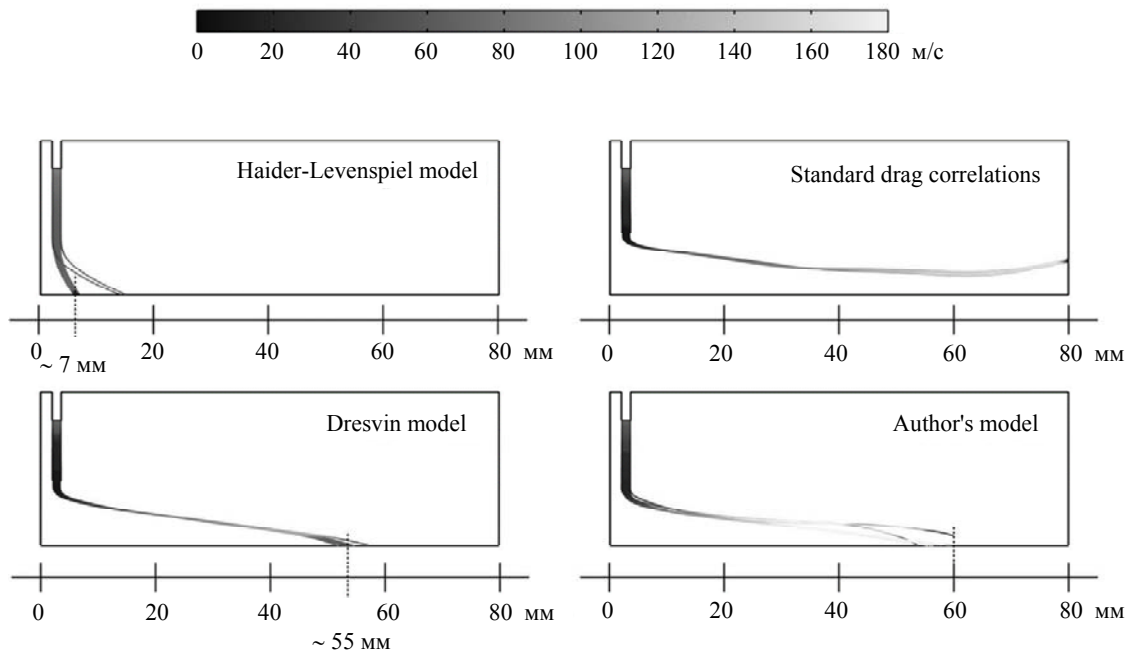


Рис. 4. Результаты численного моделирования трассировки частиц в неизотермическом потоке для разных моделей расчета



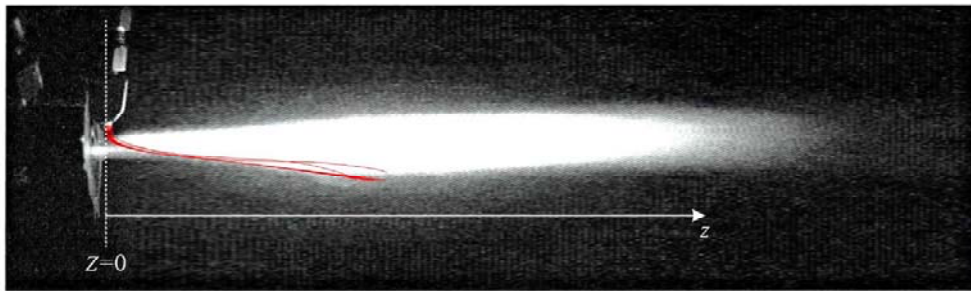


Рис. 5. Результаты численного моделирования трассировки частиц в неизотермическом потоке для разных моделей расчета.

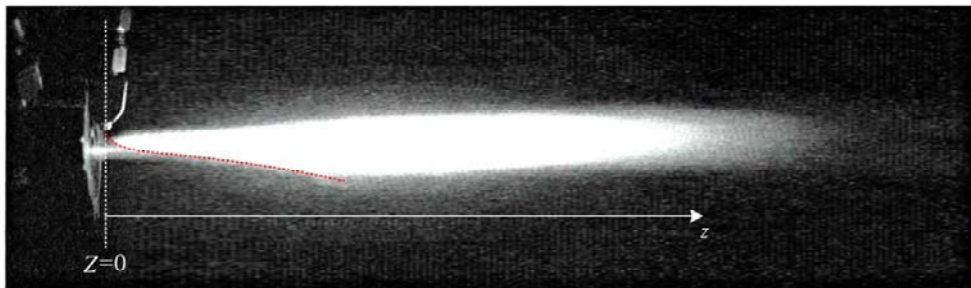


Рис. 6. Усредненная траектория движения одиночной частицы в неизотермическом потоке на основании авторской модели расчета.

## Заключение

Разработана нестационарная математическая модель движения мелкодисперсного порошка оксида алюминия  $Al_2O_3$  в неизотермическом потоке. Предложенная модель позволяет учесть влияние транспортирующего газа и мелкодисперсного порошка на плазменный поток. В ходе решения определяются удельные объемные силы, действующие на частицы со стороны потока и на поток со стороны частиц, и тепловая мощность, поглощаемая в процессе нагрева частиц. На основе разработанной модели выполнен сравнительный анализ существующих моделей расчета времени отклика скорости (лобового сопротивления) частиц. Предложена уточненная формула для расчета коэффициента лобового сопротивления одиночной частицы в неизотермическом потоке  $C_d$  от относительного числа Рейнольдса  $Re_r$ . Относительная погрешность результатов моделирования с данными натурных испытаний позволяет качественно валидировать предлагаемую авторским коллективом модель.

Работа выполнена при поддержке РФФ грант № 22-29-20223 и Санкт-Петербургского государственного автономного учреждения «Фонд поддержки научной, научно-технической, инновационной деятельности» соглашение №64/2022. Результаты расчета получены с использованием вычислительных ресурсов суперкомпьютерного центра Санкт-Петербургского политехнического университета Петра Великого.

## ЛИТЕРАТУРА

1. Дресвин С. В., Зверев С. Г. Плазмотроны: конструкции, параметры, технологии. – Санкт-Петербург: Изд-во Политехн. ун-та, 2007.
2. Obraztsov N. V., Subbotin D. I., Surov A. V., Popov V. E., Serba E. O. / Zhurnal Tekhnicheskoi Fiziki. 2020. Vol. 90. № 12. P. 2153–2158; Tech. Phys., 2020. Vol. 65. № 12. P. 2061–2065.
3. Zhukov M., Zasyrkin I. Thermal plasma torches: design, characteristics, application. – Cambridge Int Science Publishing, 2007.
4. Boulos M. I., Fauchais P. L., Heberlein J. V. Thermal Spray Fundamentals: From Powder to Part. – Springer Cham, 2021.

5. Frolov V., Ivanov D., Toropchin A. / J. Phys.: Conf. Ser. 2014. Vol. 550. P. 012021.
6. Zhukovskii R., Chazelas C., Rat V. et al. / J. Therm Spray Tech. 2022. Vol. 31. P. 28–45.
7. Liu S. H. et al. / Surface and Coatings Technology. 2018. Vol. 337. P. 241–249.
8. Murphy A. B. / Plasma Chemistry and Plasma Processing. 2015. Vol. 35. P. 471–489.
9. Baeva M., Uhlrandt D. / Weld World. 2019. Vol. 63. P. 377–387.
10. Wang B., Zhu X.-M., Zhang H.-C., Zhang H.-T., Feng J.-C. / Metals. 2018. Vol. 8. № 7. P. 512.
11. Murphy A. B., Boulos M. I., Fauchais P. L., Pfender E. / Plasma Chem Plasma Process. 2023. Vol. 43. P. 1277–1279.
12. Salonitis K., Vatousianos S. / Procedia CIRP. 2012. Vol. 3. P. 287–292.
13. Hollander A., Cosemans P. / Plasma Processes and Polymers. 2020. Vol. 17. № 1. P. 1900155.
14. Monette Z., Kasar A. K., Daroonparvar M., Menezes P. L. / The International Journal of Advanced Manufacturing Technology. 2020. Vol. 106. P. 2079–2099.
15. Shuo Yin, Jan Cizek, Xinkun Suo, Wenya Li, Hanlin Liao / Advances in Materials Science and Engineering. 2019. Vol. 2019. Article ID 8654764. P. 2.
16. Zhu T., Baeva M., Testrich H., Kewitz T., Foest R. / Plasma Chemistry and Plasma Processing. 2023. Vol. 43. P. 1–24.
17. Petrenya Y. K., Frolov V. Y., Kriskovets D. S., Yushin B. A., Ivanov D. V. / Energies. 2023. Vol. 16. № 15. P. 5632.
18. Liu S.-H., Trelles J. P., Murphy A. B., Li L., Zhang S.-L., Yang G.-J., Li C.-X., Li C.-J. / Journal of Physics D: Applied Physics. 2019. Vol. 52. P. 335203.
19. Bobzin K., Öte M., Schein J., Zimmermann S. / Journal of Thermal Spray Technology. 2017. Vol. 26. P. 811–830.
20. Дресвин С. В., Зверев С. Г. Теплообмен в плазме. – Санкт-Петербург: Изд-во Политехн. ун-та, 2008.
21. Образцов Н. В., Мурашов Ю. В., Жилиготовов Р. И., Куракина Н. К. / Труды III Международной конференции "Газоразрядная плазма и синтез наноструктур". – Казань, 2022. С. 348–351.
22. Kabanov V. V., Klubnikin V. S. / Journal of Engineering Physics. 1985. Vol. 48. № 3. P. 285–289.
23. Dresvin S., Mikhalkov S. / High temperature. 1992. Vol. 30. № 1. P. 25–35.
24. Мурашов Ю. В., Образцов Н. В., Куракина Н. К., Жилиготовов Р. И., Уманский А. О. / XIII Всероссийский съезд по теоретической и прикладной механике. – Санкт-Петербург, 2023. С. 425–427.
25. Мурашов Ю. В., Образцов Н. В., Куракина Н. К., Жилиготовов Р. И. / Прикладная физика. 2024. № 1. С. 32–37.

PACS: 52.65.Cc

## Numerical model of the trajectory of fine $Al_2O_3$ powder in a plasma flow

*Yu. V. Murashov, N. V. Obratsov, N. K. Kurakina and R. I. Zhiligitov*

Peter the Great St.Petersburg Polytechnic University (SPbPU)  
29 Polytechnicheskaya st., St.Petersburg, 195251, Russia  
E-mail: obratsovnikita@yandex.ru

*Received 12.03.2024; revised 5.04.2024; accepted 19.04.2024*

***The paper presents a study of the tracing of a spherical  $Al_2O_3$  particle in a thermal plasma flow. Based on a two-dimensional non-stationary numerical model, the results of calculations of the trajectory of motion of the sprayed powder are presented for the main numerical of the drag coefficient of particles. The developed non-stationary model allows to take into account the mutual influence of the particle flow, the transport gas and the plasma flow generated by the DC plasma torch. The ranges of applicability of the models are presented. The dependence of the drag coefficient of a single particle in a non-isothermal flow on the relative Reynolds number has been clarified. A comparative analysis of the numerical model for calculating the trajectory of a particle with full-scale tests showed the correspondence of the calculated and experimental data.***

**Keywords:** thermal plasma, DC plasma torch, drag coefficient, Reynolds number, numerical simulation.



## REFERENCES

1. Dresvin S. V. and Zverev S. G., *Plazmotrony: konstruktii, parametry, technologii*, Sankt-Peterburg, Izd-vo Politechn. un-ta, 2007 [in Russian].
2. Obratsov N. V., Subbotin D. I., Surov A. V., Popov V. E. and Serba E. O., *Zhurnal Tekhnicheskoi Fiziki*, **90** (12), 2153–2158 (2020); *Tech. Phys.*, **65** (12), 2061–2065 (2020).
3. Zhukov M. and Zasyplin I., *Thermal plasma torches: design, characteristics, application*, Cambridge Int Science Publishing, 2007.
4. Boulos M. I., Fauchais P. L. and Heberlein J. V., *Thermal Spray Fundamentals: From Powder to Part*, Springer Cham, 2021.
5. Frolov V., Ivanov D. and Toropchin A., *J. Phys.: Conf. Ser.* **550**, 012021 (2014).
6. Zhukovskii R., Chazelas C., Rat V. et al., *J. Therm Spray Tech.* **31**, 28–45 (2022).
7. Liu S.-H., Li C.-X., Li L., Huang J.-H., Xu P., Hu Y.-Z., Yang G.-J. and Li C.-J., *Surface and Coatings Technology* **337**, 241–249 (2018).
8. Murphy A. B., *Plasma Chemistry and Plasma Processing* **35**, 471–489 (2015).
9. Baeva M. and Uhlandt D., *Weld World* **63**, 377–387 (2019).
10. Wang B., Zhu X.-M., Zhang H.-C., Zhang H.-T. and Feng J.-C., *Metals* **8** (7), 512 (2018).
11. Murphy A. B., Boulos M. I., Fauchais P. L. and Pfender E., *Plasma Chem Plasma Process* **43**, 1277–1279 (2023).
12. Salonitis K. and Vatousianos S., *Procedia CIRP* **3**, 287–292 (2012).
13. Holländer A. and Cosemans P., *Plasma Process Polym.* **17**, 1900155 (2020).
14. Monette Z., Kasar A. K., Daroonparvar M. and Menezes P. L., *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology* **106**, 2079–2099 (2020).
15. Shuo Yin, Jan Cizek, Xinkun Suo, Wenya Li and Hanlin Liao, *Advances in Materials Science and Engineering* **2019**, Article ID 8654764, 2 (2019).
16. Zhu T., Baeva M., Testrich H., Kewitz T. and Foest R., *Plasma Chemistry and Plasma Processing* **43**, 1–24 (2023).
17. Petrenya Y. K., Frolov V. Y., Kriskovets D. S., Yushin B. A. and Ivanov D. V., *Energies* **16** (15), 5632 (2023).
18. Liu S.-H., Trelles J. P., Murphy A. B., Li L., Zhang S.-L., Yang G.-J., Li C.-X. and Li C.-J., *Journal of Physics D: Applied Physics* **52**, 335203 (2019).
19. Bobzin K., Öte M., Schein J. and Zimmermann S., *J. Therm Spray Tech.* **26**, 811–830 (2017).
20. Dresvin S. and Zverev S., *Heat transfer in plasma*, St Petersburg, SPbPU Publishing, 2008 [in Russian].
21. Obratsov N. V., Murashov Yu. V., Zhiligitov R. I. and Kurakina N. K., *Proceedings of the III int. conf. Gas discharge plasma and synthesis of nanostructures*, Kazan, 348–351 (2022) [in Russian].
22. Kabanov V. V. and Klubnikin V. S., *Journal of Engineering Physics* **48** (3), 285–289 (1985).
23. Dresvin S. and Mikhalkov S., *High temperature* **30**(1), 25–35 (1992).
24. Murashov Yu. V., Obratsov N. V., Kurakina N. K., Zhiligitov R. I. and Umanskiy A. O. XIII All-Russian Congress on Theoretical and Applied Mechanics, Saint-Petersburg, 425–427 (2023) [in Russian].
25. Murashov Yu. V., Obratsov N. V., Kurakina N. K. and Zhiligitov R. I., *Applied Physics*, № 1, 32–37 (2024) [in Russian].