

Научная статья

УДК 532.5.011

doi: 10.17223/19988621/76/5

Методы определения коэффициента сопротивления при вдуве газа с поверхности сферической частицы

Владимир Афанасьевич Архипов¹, Сергей Александрович Басалаев²,
Ксения Григорьевна Перфильева³, Сергей Николаевич Поленчук⁴,
Анна Сергеевна Усанина⁵

1, 2, 3, 4, 5 Томский государственный университет, Томск, Россия

¹ leva@niipmm.tsu.ru

² tarm@niipmm.tsu.ru

³ k.g.perfiljeva@yandex.ru

⁵ usaninaanna@mail.ru

Аннотация. Предложены новые методы определения коэффициента сопротивления твердой сферической частицы в условиях потока массы от ее поверхности. С использованием предложенных методов проведены экспериментальные исследования влияния вдува воздуха с поверхности твердой сферы на коэффициент сопротивления в переходном и автомодельном режимах обтекания частицы в области чисел Рейнольдса $Re = 133 \div 9\,900$. Получены экспериментальные данные для коэффициента сопротивления частицы в зависимости от числа Рейнольдса при варьировании величины интенсивности вдува газа (скорости вдуваемого газового потока с поверхности частицы). Для автомодельного режима течения найдена эмпирическая зависимость коэффициента сопротивления от соотношения скорости вдуваемого с поверхности частицы потока газа к скорости обдувающего частицу потока.

Ключевые слова: твердая сфера, вдув газа, коэффициент сопротивления, число Рейнольдса, переходный режим течения, автомодельный режим течения, экспериментальное исследование

Благодарности: Работа выполнена при финансовой поддержке Минобрнауки РФ в рамках государственного задания № FSWM-2020-0036.

Для цитирования: Архипов В.А., Басалаев С.А., Перфильева К.Г., Поленчук С.Н., Усанина А.С. Методы определения коэффициента сопротивления при вдуве газа с поверхности сферической частицы // Вестник Томского государственного университета. Математика и механика. 2022. № 76. С. 56–69. doi: 10.17223/19988621/76/5

Methods for determining the drag coefficient at gas injection from the surface of spherical particle

Vladimir A. Arkhipov¹, Sergey A. Basalaev², Ksenia G. Perfilieva³,
Sergey N. Polenchuk⁴, Anna S. Usanina⁵

^{1, 2, 3, 4, 5} Tomsk State University, Tomsk, Russian Federation

¹ leva@niipmm.tsu.ru

² tarm@niipmm.tsu.ru

³ k.g.perfiljeva@yandex.ru

⁵ usaninaanna@mail.ru

Abstract. New methods for studying the effect of gas injection from the surface of a solid spherical particle on its drag coefficient in the transient and self-similar regimes of flow around the particle have been presented. An advantage of the proposed methods is the ability to isolate in a pure form the effect of the mass flux from the particle surface (without the effect of other factors, for example, particle acceleration) on the drag coefficient. New results of an experimental study of the effect of air flow blowing on the drag coefficient of a solid perforated sphere in the Reynolds number range $Re = 133 \div 9900$ have been presented. It has been shown that the drag coefficient decreases when air is blown from the particle surface. As the Reynolds number Re increases, the drag coefficient C_D upon gas injection in the transient flow regime decreases to a certain critical value corresponding to the onset of the self-similar regime. At the onset of the self-similar regime (reaching the critical value of C_D), the drag coefficient increases with an increase in the Reynolds number and asymptotically tends to a constant value $C_D = 0.44$. However, the opposite effect has been found for a small diameter of the particle ($D = 1$ cm) at a blowing velocity $u_e \geq 1.3$ m/s: an increase in the drag coefficient of the particle C_D at air efflux from the particle surface in comparison with the drag coefficient value in the absence of gas flow injection ($u_e = 0$ m/s). This is apparently associated with a change in the characteristics of the boundary layer of the particle due to the rearrangement of the flow profile near the spherical particle surface caused by a decrease in its size. An empirical dependence of the drag coefficient of a solid sphere on the ratio of the velocity of injection from the surface of the particle to the velocity of blowing $C_D = 0.15 + (0.44 - 0.15) / (1 + (9\bar{u} / 5)^{3.8})$ (with the coefficient of determination $R^2 = 0.89$) has been obtained for a self-similar particle regime flow.

Keywords: solid sphere, gas injection, drag coefficient, Reynolds number, transient flow regime, self-similar flow regime, experimental study

Acknowledgments: This work was supported by the Ministry of Education and Science of the Russian Federation within the framework of state assignment No. 0721-2020-0036.

For citation: Arkhipov, V.A., Basalaev, S.A., Perfilieva, K.G., Polenchuk, S.N., Usanina, A.S. (2022) Methods for determining the drag coefficient at gas injection from the surface of spherical particle. *Vestnik Tomskogo gosudarstvennogo universiteta. Matematika i mekhanika – Tomsk State University Journal of Mathematics and Mechanics*. 76. pp. 56–69. doi: 10.17223/19988621/76/5

Введение

Интерес к динамике движения частиц дисперсной фазы в потоке газа обусловлен их существенной ролью в целом ряде важных задач прикладного назначения, связанных с двухфазными течениями в энергоустановках, образованием атмосферных осадков, распространением капель топлива при отделении ступеней ракет-носителей, теплообменом при кипении, кавитацией, флотацией и другими технологическими процессами. В указанных задачах важнейшим фактором является режим обтекания частицы дисперсной фазы, определяемый числом Рейнольдса Re .

В зависимости от величины числа Рейнольдса выделяют три основных режима движения одиночной частицы дисперсной фазы [1]: стоксовский, переходный и автомоделный режимы. Каждый из указанных режимов характеризуется соответствующим выражением для коэффициента сопротивления C_D . Для твердой сферы коэффициент сопротивления в области малых чисел Рейнольдса $Re < 1$ рассчитывается по формуле Стокса

$$C_D = \frac{24}{Re}, \quad (1)$$

при числах $Re = 1 \div 700$ (промежуточный режим) C_D определяется по формуле Клячко [2]

$$C_D = \frac{24}{Re} + \frac{4}{\sqrt[3]{Re}}, \quad (2)$$

при числах $Re > 700$ (автомоделный режим) C_D составляет

$$C_D = 0.44. \quad (3)$$

Однако данные выражения для коэффициента сопротивления твердой сферической частицы получены без учета истечения массы с поверхности частицы. В ряде практических задач с поверхности частицы происходит дув газообразных продуктов испарения и / или горения частицы [3–5]. В условиях ддува газа с поверхности частицы в несущую среду использование выражений (1)–(3) для коэффициента сопротивления приводит к погрешностям при расчете скорости движения частиц [6].

Большинство работ по исследованию влияния ддува газа с поверхности частицы являются численными. В частности, можно выделить работы [6, 7], в которых предложены теоретические зависимости для расчета коэффициента сопротивления C_D в условиях оттока массы с поверхности частицы при низких значениях числа Рейнольдса:

$$C_D = k(Re, Re_s)C_{D0},$$

где $k(Re, Re_s) < 1$ – функция чисел Рейнольдса основного потока Re и потока газа с поверхности частицы Re_s ; C_{D0} – коэффициент сопротивления без учета ддува газа с поверхности частицы.

Результаты экспериментов разных авторов показывают, что испарение или горение вещества частицы существенно снижает коэффициент сопротивления [7–11]. При анализе опубликованных результатов следует иметь в виду, что они получены, как правило, при наличии ускорения частицы. При этом выделить в чистом виде влияние потока массы от поверхности частицы достаточно трудно.

Целью настоящей работы является нахождение коэффициента сопротивления твердой сферической частицы при вдуве газа с ее поверхности на основе новых экспериментальных методик, позволяющих оценить с высокой точностью степень влияния интенсивности вдува с поверхности частицы при отсутствии ее ускорения на режим течения. Первая методика определения коэффициента сопротивления при истечении потока массы с поверхности частицы включает измерение силы сопротивления частицы (через угол поворота консоли с частицей) при воздействии на нее газового потока, а вторая – взвешивание частицы под действием вдуваемого с ее поверхности и обдувающего потоков воздуха.

Описание методик экспериментального определения коэффициента сопротивления твердой сферы в условиях вдува газа с ее поверхности

Для экспериментального исследования влияния вдува газа с поверхности твердой сферической частицы разработаны две экспериментальные установки и методики. Первая методика измерения аэродинамического коэффициента сопротивления сферической частицы при вдуве газа с ее поверхности заключается в измерении силы сопротивления частицы при воздействии на нее газового потока [12]. Твердый шарик размещается в равномерном обдувающем потоке газа путем подвешивания на тонкой металлической трубке, которая может вращаться вокруг горизонтальной оси, расположенной перпендикулярно направлению потока обдувающего газа. Во внутреннюю полость шарика подается под давлением газ. Затем измеряется угол отклонения металлической трубки от первоначального вертикального направления. Также определяются объемный расход Q подаваемого в полость шарика газа и скорость u обдувающего его газового потока.

Исследование коэффициента сопротивления твердой сферы при вдуве воздуха с ее поверхности по описанной выше методике проводилось на экспериментальной установке, схема которой приведена на рис. 1. Полая частица 1, в качестве которой использовался теннисный шарик, крепилась на тонкой полой трубке 2. Металлическая трубка 2 закреплялась на шарикоподшипнике 3. Верхняя часть металлической трубки 2 выполнена в виде стрелки 4, позволяющей измерять на шкале 5 угол поворота α трубки 2 при отклонении шарика 1 под воздействием обдувающего потока воздуха. Скорость обдува шарика измерялась с помощью трубки Пито 6 [13].

В ходе эксперимента во внутреннюю полость шарика 1 подавался через гибкий шланг 7 воздух из баллона 8 через редуктор 9 с контрольным манометром 10. Объемный расход вдуваемого в полость шарика воздуха измерялся расходомером 11. В экспериментах использовался турбинный расходомер СГ-6 [14]. После подачи потока воздуха из баллона 8 происходило равномерное истечение воздуха с поверхности шарика 1.

В процессе обтекания частицы равномерным потоком газа на нее действует три вида сил (рис. 2): сила тяжести F_g , сила аэродинамического сопротивления F_D и сила натяжения консоли F_n . При равновесии частицы соотношение данных сил имеет вид:

$$F_g = F_n \cdot \cos \alpha, \quad (4)$$

$$F_D = F_n \cdot \sin \alpha, \quad (5)$$

где α – угол отклонения металлической трубки от вертикального положения; $F_g = mg$; m – масса шарика; $g = 9.80665$ м/с² – ускорение свободного падения.

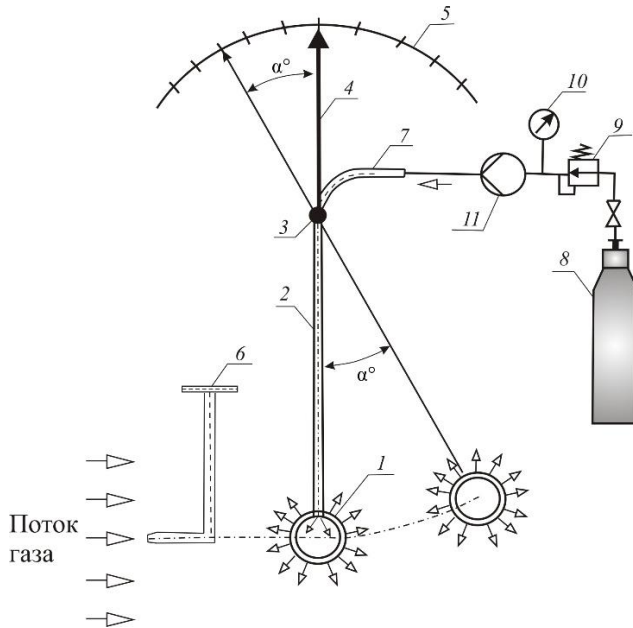


Рис. 1. Схема установки для определения коэффициента сопротивления твердой сферы при оттоке газа с ее поверхности, основанная на измерении силы сопротивления: 1 – шарик; 2 – полая металлическая трубка; 3 – шарикоподшипник; 4 – часть трубки, изготовленная в виде стрелки; 5 – шкала угломера; 6 – трубка Пито; 7 – силиконовый шланг; 8 – баллон с воздухом; 9 – редуктор; 10 – манометр; 11 – расходомер

Fig. 1. Diagram of the experimental setup for determining the drag coefficient at gas injection from its surface based on measuring the drag force: (1) sphere; (2) hollow metal tube; (3) multi-ball bearing; (4) arrow-shaped part of the tube; (5) goniometer scale; (6) Pitot tube; (7) silicone hose; (8) air cylinder; (9) reducer; (10) control pressure gauge; and (11) flow meter

Сила аэродинамического сопротивления для сферической частицы рассчитывается по формуле [1]

$$F_D = \frac{1}{8} C_D \pi D^2 \rho u^2, \quad (6)$$

где D – диаметр частицы; $\rho = 1.205 \text{ кг/м}^3$ – плотность воздуха, обдувающего частицу (при температуре 294 К и давлении атмосферы 101.3 кПа) [15]; u – скорость обдувающего потока воздуха. Из выражения (6) следует соотношение для коэффициента сопротивления

$$C_D = \frac{8F_D}{\pi D^2 \rho u^2} \quad (7)$$

Из (4) и (5) выведем соотношение

$$F_D = mg \cdot \operatorname{tg} \alpha$$

и, подставив его в (7), получим рабочую формулу для расчета коэффициента аэродинамического сопротивления:

$$C_D = \frac{8mg}{\pi D^2 \rho u^2} \cdot \operatorname{tg} \alpha.$$

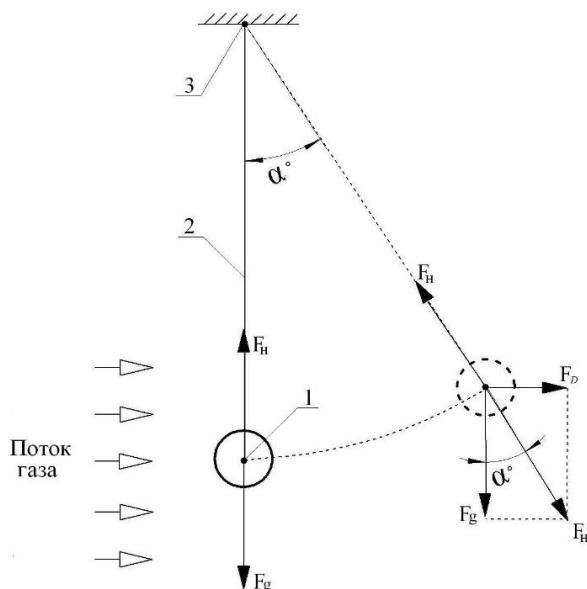


Рис. 2. Силы, действующие на частицу при воздействии на нее равномерного потока газа: 1 – частица; 2 – консоль; 3 – шарикоподшипник

Fig. 2. Forces acting on a particle under exposure to uniform gas flow: (1) particle; (2) console; and (3) ball bearing

В экспериментах в качестве частицы 1 использовался шарик диаметром $D = 4$ см и массой $m = 2.71$ г с равноудаленными перфорированными отверстиями диаметром $d = 1$ мм по всей его поверхности. Количество отверстий на шарике составляло 177 штук.

В экспериментах величина u варьировала в диапазоне $u = (1.18 \div 3.73)$ м/с.

Скорость обдувающего частицу потока воздуха определялась с помощью трубки Пито (с относительной погрешностью не менее 3%) по формуле

$$u = \sqrt{\frac{2\Delta p}{\rho}},$$

где Δp – перепад давления.

Для малых значений скорости обдувающего частицу потока измерения u проводились с помощью анемометра с относительной погрешностью $\sim 8\%$.

Для определения режима обтекания шарика потоком воздуха в экспериментах рассчитывалось число Рейнольдса по формуле

$$Re = \frac{\rho u D}{\mu},$$

где $\mu = 1.808 \cdot 10^{-5}$ Па·с – коэффициент динамической вязкости воздуха.

Скорость истечения воздуха с поверхности шарика рассчитывалась по измеренному значению объемного расхода газа Q и суммарной площади сечения перфораций в шарике S :

$$u_e = \frac{Q}{S}$$

и составляла в экспериментах $u_0 = 1.66$ м/с и 2.65 м/с. В экспериментах относительная погрешность определения скорости вдуваемого с поверхности шарика воздуха составляла 1.5%.

Для оценки интенсивности вдува проводились расчеты числа Рейнольдса вдуваемого потока воздуха с поверхности шарика по формуле

$$Re_0 = \frac{\rho u_0 D}{\mu}.$$

Вышеописанная методика применима для исследований только в автомоделном режиме обтекания частицы при числах Рейнольдса $Re > 3\,000$ ввиду сложности экспериментального измерения угла поворота консоли при меньших значениях числа Re из-за его малости.

Вторая методика исследования коэффициента сопротивления твердой сферической частицы в условиях вдува газа с ее поверхности основывается на измерении силы, действующей на частицу при обдуве ее потоком воздуха. Экспериментальная установка состоит из шарика 5, соединенного с металлической трубкой 4 и опорой 3, и жестко связанного с ним датчика силы 1, в качестве которого использовались высокоточные аналитические весы. Система подачи обдувающего и вдуваемого с поверхности частицы потоков воздуха состоит из расходомеров 9, запорных вентилей 10, контрольных манометров 11 и баллонов со сжатым воздухом 12 (рис. 3).

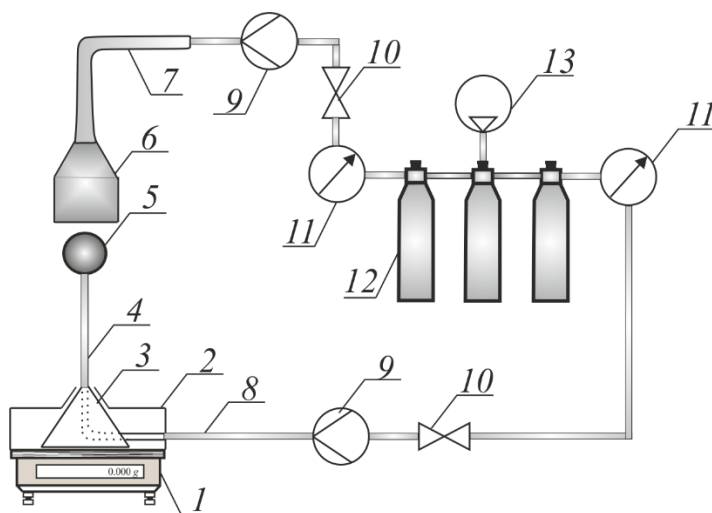


Рис. 3. Экспериментальная установка для исследования влияния вдува газа с поверхности твердой сферы на коэффициент сопротивления, основанная на измерении силы, действующей на частицу при обдуве ее потоком газа: 1 – датчик силы; 2 – защитный кожух; 3 – опора; 4 – полая металлическая трубка; 5 – перфорированный шарик; 6 – раструб; 7, 8 – гибкий шланг; 9 – расходомеры; 10 – вентили; 11 – манометры; 12 – ресивер; 13 – компрессор

Fig. 3. Experimental setup for studying the effect of gas injection from the surface of a solid sphere on the drag coefficient based on measuring the drag force of the particle on exposure to gas flow on it: (1) force sensor; (2) protective casing; (3) hold; (4) hollow metal tube; (5) perforated particle; (6) bell mouth; (7, 8) – flexible hose; (9) flow meter; (10) valve; (11) manometer; (12) receiver; and (13) compressor

Твердая сферическая частица 5 крепится к вертикально установленной на опоре 3 полый металлической трубке 4. Опора 3 с трубкой 4 и частицей 5 соединяются с датчиком силы 1. Во время экспериментов после открытия вентелей 10 баллонов с сжатым воздухом 12 создаются контролируемые с помощью расходомеров 9 потоки обдувающего и вдуваемого с поверхности частицы воздуха. Истечение обдувающего потока воздуха осуществляется по гибкому шлангу 7 и через раструб 6, расположенный над шариком. Подача потока воздуха во внутреннюю полость шарика осуществляется по гибкому шлангу 8, который помещается внутри полый трубки 4. Для исключения влияния обдувающего потока на мерную площадку весов сверху опоры 3 размещается защитный кожух 2.

Суммарная сила F_{Σ} , измеренная датчиком силы 1 при воздействии потока на шарик 5, складывается из силы тяжести и аэродинамической силы:

$$F_{\Sigma} = mg + C_D \frac{\rho u^2}{2} \frac{\pi D^2}{4}, \quad (8)$$

где m – суммарная масса шарика 5, трубки 4 и опоры 3.

Экспериментальный коэффициент сопротивления твердой сферы C_D выражался из уравнения (8) и определялся по формуле (с относительной погрешностью не более 10%)

$$C_D = 8(F_{\Sigma} - mg) / \pi D^2 \rho u^2.$$

Эксперименты проведены для двух перфорированных шариков диаметром $D = 1$ и 2 см и массой 0.22 и 1.14 г соответственно. Шарик крепился к полый металлической трубке длиной 65 см. Количество перфораций диаметром 1 мм в шарике диаметром 2 см составляло 44 штуки, в шарике диаметром 1 см – 11 штук. Скорость вдуваемого с поверхности шарика потока воздуха варьировала в диапазоне $u_6 = 0.5 \div 1.3$ м/с, а значения скорости обдувающего потока воздуха составляли $u = 0.2 \div 1$ м/с.

Преимуществом второй методики является возможность проведения экспериментальных исследований при различных режимах обтекания частицы: в стоксовском, переходном и автомодельном режимах.

Результаты экспериментальных исследований и их анализ

Результаты экспериментов, проведенных по первой из описанных методик, получены для автомодельного режима обтекания частицы в диапазоне чисел Рейнольдса $Re = (3.1 \div 9.9) \cdot 10^3$. При проведении экспериментов по второй методике исследовалось два режима течения: переходный и автомодельный; при этом значения чисел Рейнольдса составляли $Re = (133 \div 1\,333)$.

Варьируя расход вдуваемого через поверхность шарика воздуха, в работе получены экспериментальные зависимости коэффициента сопротивления сферической частицы C_D от числа Рейнольдса Re при различной заданной интенсивности вдува (скорости вдуваемого потока u_6). На рис. 4 приведены экспериментальные зависимости $C_D(Re)$, полученные с помощью первой методики, а на рис. 5, 6 – с помощью второй методики. Кривыми на рис. 4–6 показаны аппроксимационные зависимости.

Из анализа рис. 4, 5 следует, что при наличии вдува воздуха с поверхности шарика коэффициент сопротивления меньше, чем при его отсутствии. По мере

увеличения числа Рейнольдса Re коэффициент сопротивления C_D при вдуве воздуха в переходном режиме обтекания частицы уменьшается до некоторого переходного значения, соответствующего началу автомодельного режима (рис. 4).

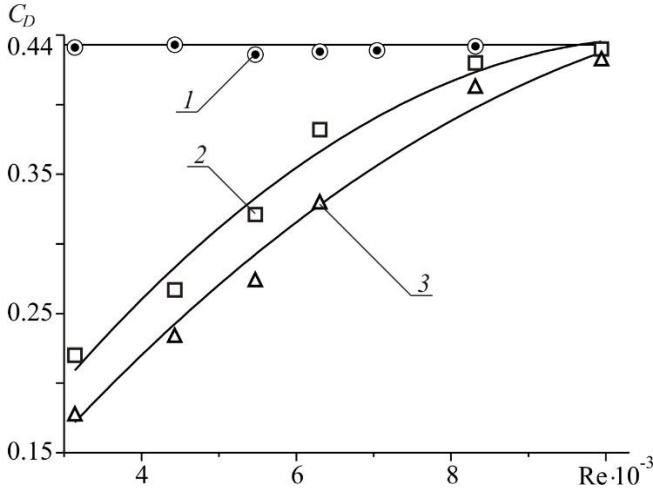


Рис. 4. Зависимости коэффициента сопротивления C_D от числа Рейнольдса Re (для шарика диаметром $D = 4$ см): 1 – при отсутствии вдува воздуха ($u_e = 0$ м/с); 2 – $u_e = 2.61$ м/с; 3 – $u_e = 3.91$ м/с

Fig. 4. Dependences of the drag coefficient C_D on the Reynolds number Re (for the ball with a diameter $D = 4$ cm): (1) in the absence of air blowing ($u_e = 0$ m/s); (2) $u_e = 2.61$ m/s; and (3) $u_e = 3.91$ m/s

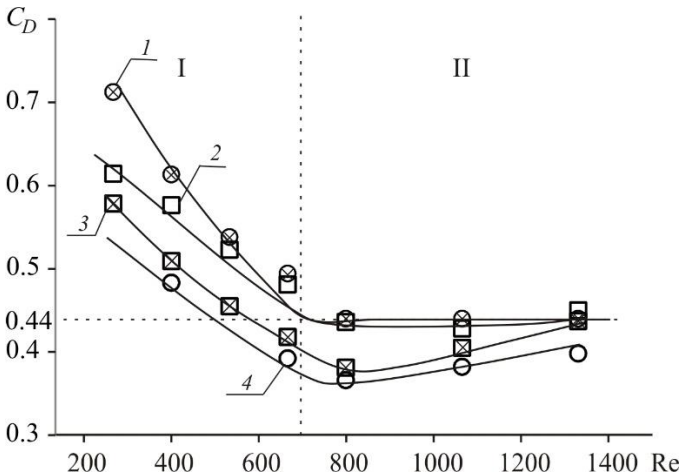


Рис. 5. Зависимости коэффициента сопротивления C_D от числа Рейнольдса Re (для шарика диаметром $D = 2$ см): 1 – при отсутствии вдува воздуха ($u_e = 0$ м/с); 2 – $u_e = 0.5$ м/с; 3 – $u_e = 0.9$ м/с; 4 – $u_e = 1.3$ м/с (I – переходный режим, II – автомодельный режим)

Fig. 5. Dependences of the drag coefficient C_D on the Reynolds number Re (for the ball with a diameter $D = 2$ cm): (1) in the absence of air blowing ($u_e = 0$ m/s); (2) $u_e = 0.5$ m/s; (3) $u_e = 0.9$ m/s; (4) $u_e = 1.3$ m/s (I is the transient regime; II is the self-similar regime)

При наступлении автомодельного режима (достижении переходного значения C_D) коэффициент сопротивления по мере увеличения числа Рейнольдса возрастает, асимптотически стремясь к постоянному значению $C_D = 0.44$ (см. рис. 4, 5).

Однако при определенных условиях вдув газа с поверхности частицы приводит к увеличению коэффициента сопротивления. Из анализа экспериментальных данных, полученных с помощью второй методики для шарика с наименьшим диаметром ($D = 1$ см), следует, что при скорости вдува $u_g \geq 1.3$ м/с наблюдается возрастание коэффициента сопротивления C_D по сравнению со значением C_D при отсутствии вдува (см. рис. 6). Обнаруженный эффект, по-видимому, можно объяснить изменением характеристик пограничного слоя шарика за счет перестройки профиля течения вблизи поверхности сферической частицы, вызванного уменьшением ее размера.

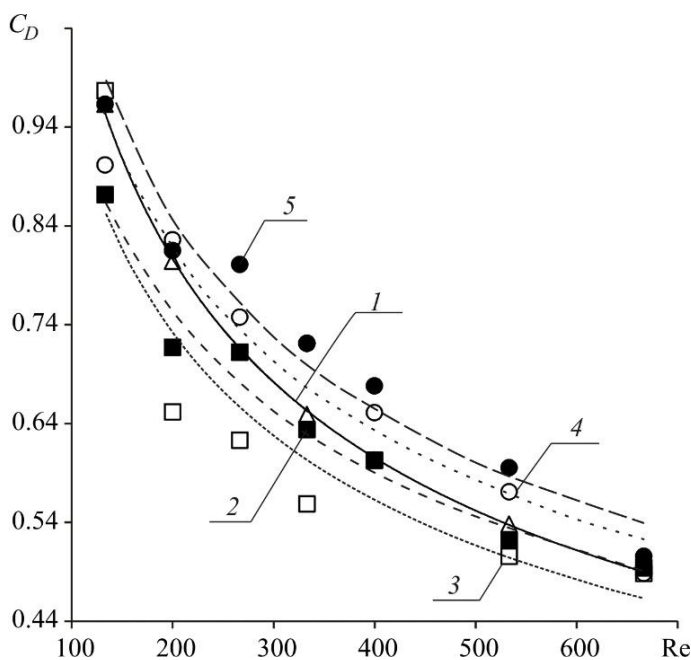


Рис. 6. Зависимости коэффициента сопротивления C_D от числа Рейнольдса Re (для шарика диаметром $D = 1$ см): 1 – при отсутствии вдува воздуха ($u_g = 0$ м/с); 2 – $u_g = 0.5$ м/с; 3 – $u_g = 0.9$ м/с; 4 – $u_g = 1.3$ м/с; 5 – $u_g = 1.6$ м/с

Fig. 6. Dependences of the drag coefficient C_D on the Reynolds number Re (for the ball with a diameter $D = 1$ cm): (1) in the absence of air blowing ($u_g = 0$ m/s); (2) $u_g = 0.5$ m/s; (3) $u_g = 0.9$ m/s; (4) $u_g = 1.3$ m/s; (5) $u_g = 1.6$ m/s

Зависимость коэффициента сопротивления от безразмерного отношения скорости вдуваемого с поверхности частицы потока к скорости обдувающего частицу потока $\bar{u} = u_g / u$ в автомодельном режиме приведена на рис. 7. Анализ полученных в эксперименте результатов показывает, что в автомодельном режиме при значениях скорости вдуваемого с поверхности частицы $u_g > u$ ($\bar{u} > 1$) наблюдается большее уменьшение коэффициента сопротивления частицы C_D , чем при

значениях $u_e < u$ ($\bar{u} < 1$). Также из рис. 7 видно, что результаты по коэффициенту сопротивления, полученные для автомодельного режима обтекания частицы с помощью двух описанных методик, хорошо согласуются.

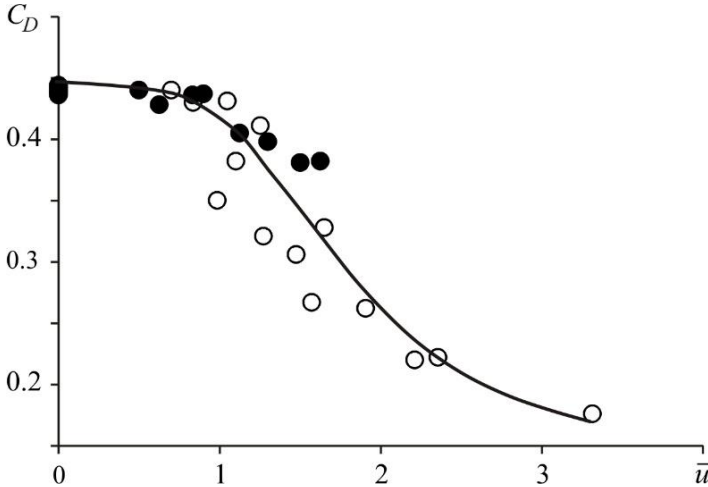


Рис. 7. Зависимость коэффициента сопротивления C_D от безразмерного отношения скоростей $\bar{u} = u_e/u$: $\circ$ – экспериментальные данные, полученные с помощью первой методики; $\bullet$ – экспериментальные данные, полученные с помощью второй методики

Fig. 7. Dependences of the drag coefficient C_D on the dimensionless ratio of velocities $\bar{u} = u_e/u$: ($\circ$) experimental data obtained using the first technique; ($\bullet$) experimental data obtained using the second technique

Методом наименьших квадратов на основе экспериментальных данных для коэффициента сопротивления твердой сферы C_D в автомодельном режиме обтекания получено эмпирическое выражение для C_D в зависимости от безразмерного соотношения скорости вдуваемого с поверхности частицы и скорости обдувающего частицу потока $\bar{u} = u_e/u$ (с коэффициентом детерминации $R^2 = 0.99$)

$$C_D = 0.44 - 0.27 \exp(-3.08\bar{u}^{-3}).$$

Анализ результатов проведенных экспериментов с перфорированной твердой сферой в условиях обдувающего и вдуваемого с ее поверхности потоков воздуха позволяет сделать вывод о преобладающем влиянии на коэффициент сопротивления изменения величины скорости вблизи поверхности частицы за счет перестройки профиля течения.

Заключение

На основе полученных результатов экспериментов по исследованию процесса вдува газа с поверхности частицы на коэффициент сопротивления можно сделать следующие выводы:

– Разработаны две экспериментальные методики для исследования влияния в чистом виде только вдува газа с поверхности твердой сферы (при отсутствии ускорения частицы) на коэффициент сопротивления. Первая методика основана

на измерении силы сопротивления частицы, а вторая – на измерении силы, действующей на частицу при обдуве ее газовым потоком.

– Получены новые результаты экспериментов по влиянию вдува воздуха с поверхности твердой сферической перфорированной частицы на коэффициент сопротивления в области чисел Рейнольдса $Re = 133 \div 9\,900$.

– Обнаружено, что при истечении воздуха с поверхности твердой сферы коэффициент аэродинамического сопротивления частицы C_D уменьшается по сравнению с величиной C_D при отсутствии потока воздуха с поверхности частицы. Экспериментально доказано, что отклонение коэффициента сопротивления от стандартной кривой сопротивления возрастает по мере увеличения скорости вдува воздуха и уменьшения скорости обдува частицы потоком.

– Экспериментально показано, что для наименьшего из исследованных размеров частиц ($D = 1$ см) обнаружено увеличение коэффициента сопротивления C_D (по сравнению со значением C_D при отсутствии вдува) при скорости вдува $u_e \geq 1.3$ м/с. Выявленный эффект позволяет сделать вывод о превалирующем влиянии на коэффициент аэродинамического сопротивления изменения характеристик пограничного слоя шарика за счет перестройки профиля течения вблизи поверхности сферической частицы, вызванного уменьшением ее размера.

– В диапазоне чисел Рейнольдса $Re = 800 \div 9\,900$ получено эмпирическое выражение для коэффициента сопротивления твердой сферической частицы в зависимости от соотношения скорости вдуваемого с поверхности частицы и скорости обдувающего частицу потока $\bar{u} = u_e/u$ (с коэффициентом детерминации $R^2 = 0.99$)

$C_D = 0.44 - 0.27 \exp(-3.08\bar{u}^{-3})$. Для условий проведенных экспериментов в авто-модельном режиме обтекания частицы с увеличением соотношения $\bar{u}$ от 0 до 3.3 коэффициент сопротивления уменьшается от 0.44 до 0.176.

Список источников

1. Нигматулин Р.И. Динамика многофазных сред. М. : Наука, 1987. Ч. 1.
2. Архипов В.А., Васенин И.М., Усанина А.С., Шрагер Г.Р. Динамическое взаимодействие частиц дисперсной фазы в гетерогенных потоках. Томск : Изд. Дом Том. гос. ун-та, 2019.
3. Померанцев В.В., Арефьев К.М., Ахмедов Д.Б., Конович М.Н., Корчунов Ю.Н., Рундыгин Ю.А., Шагалова С.Л., Шестаков С.М. Основы практической теории горения. Л. : Энерготомиздат, 1986.
4. Раушенбах Б.В., Белый С.А., Беспалов И.В., Бородачев В.Я., Волынский М.С., Прудников А.Г. Физические основы рабочего процесса в камерах сгорания воздушно-реактивных двигателей. М. : Машиностроение, 1964.
5. Асовский В.П. Особенности тушения лесных пожаров вертолетами с использованием подвесных водосливных устройств // Научный вестник МГТУ ГА. Аэромеханика и прочность. 2009. № 138. С. 142–149.
6. Стернин Л.Е., Шрайбер А.А. Многофазные течения газа с частицами. М. : Машиностроение, 1994.
7. Шрайбер А.А. Многофазные полидисперсные течения с переменным фракционным составом дискретных включений // Итоги науки и техники. Комплексные и специальные разделы механики. М. : ВИНТИ, 1988. Т. 3. С. 3–80.
8. Никольский Ю.В., Хлопков Ю.И. Теоретическое и экспериментальное исследование обтекания сферы сверхзвуковым потоком малой плотности с учетом конденсации и испарения с поверхности // Ученые записки ЦАГИ. 1989. Т. 20, №. 5. С. 118–122.

9. Коваль М.А., Стулов В.П., Швец А.И. Экспериментальное исследование сверхзвукового обтекания затупленных тел с сильным распределенным вдувом // Известия АН СССР. Механика жидкости и газа. 1978. № 3. С. 84–95.
10. Глотов О.Г. Горение сферических титановых агломератов в воздухе. I. Экспериментальный подход // Физика горения и взрыва. 2013. Т. 49, № 3. С. 50–57.
11. Глотов О.Г. Горение сферических титановых агломератов в воздухе. II. Результаты экспериментов // Физика горения и взрыва. 2013. Т. 49, № 3. С. 58–71.
12. Архипов В.А., Басалаев С.А., Поленчук С.Н., Перфильева К.Г., Юсупов Р.А., Маслов Е.А. Способ определения коэффициента сопротивления сферической частицы при вдуве газа с ее поверхности. Патент 2700728 РФ. G01N 15/10, Оpubл. 19.09.2019. Бюл. № 26. С. 13.
13. Петунин А.Н. Методы и техника измерений параметров газового потока. М. : Машиностроение, 1996.
14. Архипов В.А., Бинфет Р.Г., Рожин Ю.К., Соболевский В.И. Счетчик газа «СГ-6». Патент РФ № 43023 на промышленный образец. МКП0 10-04, Оpubл. 16.12.1996. Бюл. № 12.
15. Гороновский И.Т. Краткий справочник по химии. Киев : Наукова думка, 1987.

References

1. Nigmatulin R.I. (1990) *Dynamics of Multiphase Medium*. V. 1. New York: Hemisphere Publ. Corp.
2. Arkhipov V.A., Vasenin I.M., Usanina A.S., Shrager G.R. (2019) *Dinamicheskoye vzaimodeystviye chastits dispersnoy fazy v geterogennykh potokakh* [Dynamic interaction of dispersed phase particles in heterogeneous flows]. Tomsk: Tomsk State University Publishing House.
3. Pomerantsev V.V., Aref'ev K.M., Akhmedov D.B., Konovich M.N., Korchunov Yu.N., Rundygina Yu.A., Shagalova S.L., Shestakov S.M. (1986) *Osnovy prakticheskoy teorii goreniya* [Foundations of the practical theory of combustion]. Leningrad: Energotomizdat.
4. Raushenbakh B.V., Belyy S.A., Bespalov I.V., Borodachev V.Ya., Volynskiy M.S., Prudnikov A.G. (1964) *Fizicheskiye osnovy rabochego protsessa v kamere sgoraniya vozduшно-reaktivnykh dvigateley* [Physical foundations of the working process in the combustion chamber of ram jets]. Moscow: Mashinostroyeniye.
5. Asovskiy V.P. (2009) Osobennosti tusheniya lesnikh pozharov vertolyotami s ispol'zovaniem podvesnykh vodoslivnykh ustroystv [Features of the forest fires extinguishing with helicopters using suspended spillways]. *Nauchnyy vestnik MGTU GA: Aeromekhanika i prochnost'*. 138. pp. 142–149.
6. Sternin L.E., Shraiber A.A. (1994) *Mnogofaznyye techeniya gaza s chastitsami* [Multiphase gas flows with particles]. Moscow: Mashinostroyeniye.
7. Shraiber A.A. (1988) *Mnogofaznyye polidispersnyye techeniya s peremennym fraktsionnym sostavom diskretnykh vklyucheniy* [Multiphase polydisperse flows with variable fractional composition of discrete inclusions]. Moscow: VINITI. 3. pp. 3–80.
8. Nikolskiy Yu.V., Khlopkov Yu.I. (1989) Teoreticheskoye i eksperimental'noye issledovaniye sfery sverkhzvukovym potokom maloy plotnosti s uchetom kondensatsii i ispareniya s poverkhnosti [Theoretical and experimental study of a low-density supersonic flow around a sphere taking into account condensation and evaporation from the surface] // *Uchenyye zapiski TSAGI*. 20(5), pp. 118–122.
9. Koval M.A., Stulov V.P., Shvets A.I. (1978) Experimental investigation of supersonic flow past blunt bodies with strong distributed injection. *Fluid Dynamics*. 13(3). pp. 406–415.
10. Glotov O.G. (2013) Combustion of spherical agglomerates of titanium in air. I. Experimental approach. *Combustion, Explosion, and Shock Waves*. 49(3). pp. 299–306. doi: 10.1134/S0010508213030064.
11. Glotov O.G. (2013) Combustion of spherical agglomerates of titanium in air. II. Results of experiments. *Combustion, Explosion, and Shock Waves*. 49(3). pp. 307–319. doi: 10.1134/S0010508213030076.

12. Arkhipov V.A., Basalayev S.A., Polenchuk S.N., Perfil'eva K.G., Yusupov R.A., Maslov E.A. (2018) Sposob opredeleniya koeffitsiyenta soprotivleniya sfericheskoy chastitsy pri vduve gaza s yeye poverkhnosti [Way of determination of the drag coefficient of a spherical particle at condition of gas injection from its surface]. RF Patent 2018142181.
13. Petunin A.N. (1996) *Metody i tekhnika izmereniy parametrov gazovogo potoka* [Methods and techniques for measuring gas flow parameters]. Moscow: Mashinostroyeniye.
14. Arkhipov V.A., Binfet R.G., Rozhin Yu.K., Sobolevskiy V.I. (1996) Schetchik gaza «SG-6» [SG-6 gas meter] Patent RF 43023 (МКПО 10-04).
15. Goronovskiy I.T. (1996) *Kratkiy spravochnik po khimii* [A short guide to chemistry]. Kiev: Naukova dumka.

Сведения об авторах:

Архипов Владимир Афанасьевич – доктор физико-математических наук, профессор, заведующий отделом газовой динамики и физики взрыва Научно-исследовательского института прикладной математики и механики Томского государственного университета (Томск, Россия). E-mail: leva@niipmm.tsu.ru

Басалаев Сергей Александрович – кандидат физико-математических наук, инженер-исследователь Научно-исследовательского института прикладной математики и механики Томского государственного университета (Томск, Россия). E-mail: tarm@niipmm.tsu.ru

Перфильева Ксения Григорьевна – инженер-исследователь Научно-исследовательского института прикладной математики и механики Томского государственного университета (Томск, Россия). E-mail: k.g.perfiljeva@yandex.ru

Поленчук Сергей Николаевич – техник Научно-исследовательского института прикладной математики и механики Томского государственного университета (Томск, Россия).

Усанина Анна Сергеевна – кандидат физико-математических наук, инженер-исследователь Научно-исследовательского института прикладной математики и механики Томского государственного университета (Томск, Россия). E-mail: usaninaanna@mail.ru

Вклад авторов: все авторы сделали эквивалентный вклад в подготовку публикации.
Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Information about the authors:

Arkhipov Vladimir A. (Doctor of Physical and Mathematical sciences, Professor, Research Institute of Applied Mathematics and Mechanics of Tomsk State University, Tomsk, Russian Federation). E-mail: leva@niipmm.tsu.ru

Basalaeв Sergey A. (Candidate of Physical and Mathematical Sciences, Research Institute of Applied Mathematics and Mechanics of Tomsk State University, Tomsk, Russian Federation). E-mail: tarm@niipmm.tsu.ru

Perfilieva Ksenia G. (Research Institute of Applied Mathematics and Mechanics of Tomsk State University, Tomsk, Russian Federation). E-mail: k.g.perfiljeva@yandex.ru

Polenchuk Sergey N. (Research Institute of Applied Mathematics and Mechanics of Tomsk State University, Tomsk, Russian Federation).

Usanina Anna S. (Candidate of Physical and Mathematical Sciences, Research Institute of Applied Mathematics and Mechanics of Tomsk State University, Tomsk, Russian Federation). E-mail: usaninaanna@mail.ru

Contribution of the authors: the authors contributed equally to this article.
The authors declare no conflicts of interests.

Статья поступила в редакцию 08.10.2021; принята к публикации 22.03.2022

The article was submitted 08.10.2021; accepted for publication 22.03.2022