

УДК 532.5

Методы измерения коэффициента сопротивления сферической частицы в нестандартных условиях

В.А. Архипов, А.А. Антонникова, С.А. Басалаев, К.Г. Перфильева*

*Национальный исследовательский Томский государственный университет
634050, г. Томск, пр. Ленина, 36*

Поступила в редакцию 31.01.2019 г.

Представлены метод и результаты экспериментального исследования коэффициента сопротивления сферической частицы в нестандартных условиях. Проанализировано влияние вдува газа в окружающую среду с поверхности твердой сферической частицы на коэффициент ее сопротивления при варьировании соотношения скорости вдува и скорости обтекающей частицу потока; получена зависимость коэффициента сопротивления частицы от скорости вдува газа с ее поверхности. Изучена зависимость коэффициента сопротивления твердой сферической частицы при ее осаждении в вязкой жидкости от разности температур жидкости и частицы.

Ключевые слова: коэффициент сопротивления, сферическая частица, вдув газа с поверхности частицы, неизотермические условия, гравитационное осаждение, вязкая жидкость; drag coefficient, solid spherical particle, gas injection from the particle surface, non-isothermal conditions, gravity sedimentation, viscous fluid.

Введение

При математическом моделировании динамики движения аэрозолей в потоке несущей среды одним из ключевых вопросов является выбор зависимости для коэффициента сопротивления C_x аэрозольной частицы. Для твердых сферических частиц используется стандартная зависимость коэффициента сопротивления от числа Рейнольдса [1]. Стандартная кривая сопротивления и большинство теоретических и эмпирических зависимостей для C_x , приведенных в литературе [2, 3], получены без учета более сложных процессов и условий движения частицы (вдув газа в окружающую среду с ее поверхности, неизотермические условия и т.д.).

В высокотемпературных потоках с поверхности частицы происходит интенсивный вдув газообразных продуктов испарения и/или горения частицы. Опытные данные разных авторов показывают, что испарение или горение вещества частицы существенно снижает коэффициент ее сопротивления [3–5].

В ряде технических систем и технологических процессов движение частиц в несущей среде происходит в неизотермических условиях [6–8]. При этом температура частиц может быть существенно выше или ниже температуры среды. В таких условиях использование стандартной кривой сопротивления приводит к существенным погрешностям при расчете скорости движения частиц, что связано с изменением

физических параметров среды в пограничном слое вблизи частицы, входящих в число Рейнольдса (в первую очередь вязкости).

В настоящей работе предложены новые методы определения коэффициента сопротивления твердой сферической частицы при вдуве газа с ее поверхности, а также при ее гравитационном осаждении в вязкой жидкости в неизотермических условиях.

Метод определения коэффициента сопротивления частицы при вдуве газа с ее поверхности

Влияние вдува газа с поверхности твердой сферической частицы на коэффициент ее сопротивления изучалось с помощью экспериментальной установки, изображенной на рис. 1.

Сферическая частица 1 закреплена на полой стержне 2, через который сжатый газ подается в полость частицы. Стержень 2 установлен на шарикоподшипнике 3 с возможностью его вращения вокруг горизонтальной оси, расположенный перпендикулярно направлению потока обдувающего частицу газа. Верхняя часть стержня 2 выполнена в виде стрелки 4, позволяющей измерять на шкале 5 угол поворота стержня при отклонении частицы под воздействием потока газа. Для определения скорости обдувающего потока газа используется трубка Пито 6 [9]. С ее помощью измеряется перепад давления Δp , и скорость воздушного потока рассчитывается по формуле

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

* Владимир Афанасьевич Архипов (leva@niipmm.tsu.ru); Александра Александровна Антонникова (antonnikova.a@mail.ru); Сергей Александрович Басалаев (tarm@niipmm.tsu.ru); Ксения Григорьевна Перфильева (k.g.perfiljeva@yandex.ru).

где $\rho = 1,205 \text{ кг/м}^3$ – плотность воздуха при температуре $20 \text{ }^\circ\text{C}$.

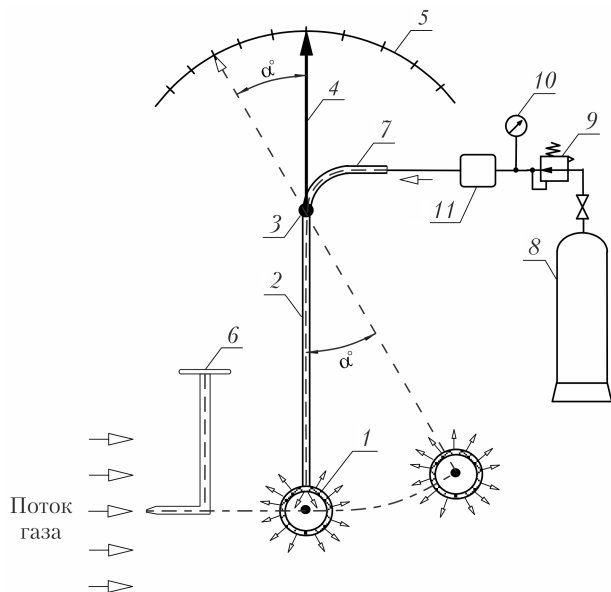


Рис. 1. Схема экспериментальной установки для определения коэффициента сопротивления сферической частицы при вдуве газа с ее поверхности (вид сбоку), обозначения см. в тексте

Во время экспериментов сжатый воздух из баллона 8 через редуктор 9 с контрольным манометром 10 подает во внутреннюю полость частицы по гибкому шлангу 7. Объемный расход вдуваемого в полость частицы воздуха измеряют турбинным расходомером 11 марки СГ-6 [10].

Коэффициент сопротивления рассчитывается по формуле:

$$C_x = \frac{8m_p g \operatorname{tg} \alpha}{\pi \rho u^2} \quad (1)$$

где m_p – масса частицы; g – ускорение свободного падения; D_p – диаметр частицы; α – измеренное значение угла отклонения полого стержня от вертикали, град.

Экспериментальное исследование влияния вдува газа с поверхности частицы на коэффициент сопротивления проводилось с использованием пластиковой полой равномерно перфорированной твердой сферической частицы диаметром 40 мм и массой 2,71 г в два этапа.

На первом этапе вдув газа с поверхности частицы отсутствовал. Результаты определения коэффициента сопротивления частицы по формуле (1) с измеренными значениями α представлены в табл. 1.

По формуле

$$\operatorname{Re}_0 = \frac{\rho u D_p}{\mu}$$

определялись числа Рейнольдса обдувающего потока ($\mu = 1,81 \cdot 10^{-5} \text{ Па} \cdot \text{с}$ – коэффициент динамической вязкости воздуха при температуре $20 \text{ }^\circ\text{C}$).

Полученные значения коэффициента сопротивления в диапазоне чисел Рейнольдса $\operatorname{Re}_0 = (3,14 \div 9,94) \cdot 10^3$ согласуются со стандартной зависимостью [1] для турбулентного режима обтекания ($C_{x0} = 0,44$ при $\operatorname{Re}_0 > 10^3$).

На втором этапе определяли коэффициент сопротивления частицы при вдуве воздуха с ее поверхности. Результаты приведены в табл. 2. Кроме этого в табл. 2 даны значения скорости вдуваемого газа

$$u_s = \frac{Q}{S},$$

рассчитанные по измеренному значению объемного расхода воздуха Q и суммарной площади сечения перфораций в частице S , и числа Рейнольдса потока газа с поверхности частицы

$$\operatorname{Re}_s = \frac{\rho u_s D_p}{\mu}$$

Зависимости коэффициента сопротивления частицы от числа Рейнольдса Re_0 при варьировании соотношения скорости вдува газа и скорости обтекающего частицу потока представлены на рис. 2.

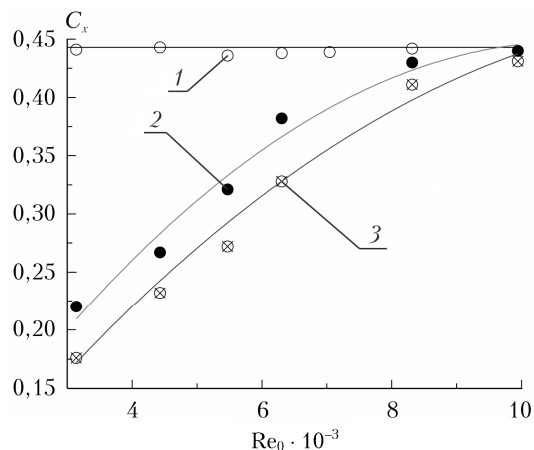


Рис. 2. Зависимости коэффициента сопротивления C_x от числа Рейнольдса Re_0 : 1 – при отсутствии вдува газа; 2 – при вдуве газа с расходом $Q = 0,350 \cdot 10^{-3} \text{ м}^3/\text{с}$; 3 – при вдуве газа с расходом $Q = 0,525 \cdot 10^{-3} \text{ м}^3/\text{с}$

Таблица 1

Коэффициент сопротивления частицы при отсутствии вдува газа с ее поверхности							
Параметр	Значения						
u , м/с	1,18	1,66	2,05	2,37	2,65	3,12	3,73
α , град	1	2	3	4	5	7	10
C_{x0}	0,441	0,443	0,436	0,438	0,439	0,442	0,444
$\operatorname{Re}_0 \cdot 10^{-3}$	3,139	4,430	5,470	6,304	7,043	8,316	9,943

Таблица 2

**Коэффициент сопротивления частицы
при вдуве газа с ее поверхности**

Параметр	Значения			
$Q, \text{ м}^3/\text{с}$	$0,350 \cdot 10^{-3}$		$0,525 \cdot 10^{-3}$	
$u, \text{ м/с}$	1,66	2,65	1,66	2,65
$\alpha, \text{ град}$	1,2	4,0	1,0	3,5
C_x	0,267	0,350	0,222	0,306
$u_s, \text{ м/с}$	2,61		3,91	
Re_s	$6,94 \cdot 10^3$		$10,41 \cdot 10^3$	

Кривые на рис. 2 показывают, что при вдуве газа с поверхности частицы в исследованном диапазоне чисел Рейнольдса коэффициент сопротивления частицы уменьшается примерно на 20%. Этот эффект более выражен при уменьшении скорости обдувающего потока.

Метод определения коэффициента сопротивления частицы в неизотермических условиях

Экспериментальная установка (рис. 3) для определения влияния неизотермических условий на процесс гравитационного осаждения сферических частиц в вязкой жидкости состоит из призматической кюветы 1 с вязкой жидкостью 2, устройства нагрева частицы, устройства ввода эталонной и нагретой частицы в жидкость и системы визуализации процесса осаждения частиц.

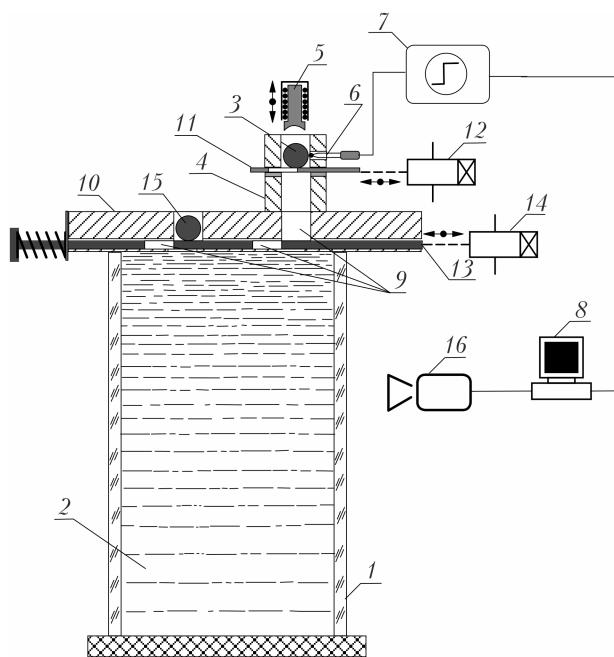


Рис. 3. Схема экспериментальной установки для определения влияния неизотермических условий на процесс гравитационного осаждения твердых сферических частиц в вязкой жидкости, обозначения см. в тексте

В ходе эксперимента предварительно нагревали одну из частиц 3 в контейнере 4 спиралью накалива-

ния 5 до заданной температуры, которую измеряли термопарой 6, соединенной через усилитель 7 с компьютером 8. После нагрева частицы 3 ее вводили в отверстие 9 неподвижной пластины 10 за счет свободного падения при удалении стопора 11 электромагнитным приводом 12. Затем подвижную пластину 13 с помощью электромагнитного привода 14 смещали в горизонтальном направлении до совмещения отверстий 9 в подвижной 13 и неподвижной 10 пластинах. При этом эталонная 15 и нагретая 3 частицы осаждались в вязкой жидкости 2 с нулевой начальной скоростью. Полученные с видеокамеры 16 данные обрабатывались на компьютере 8 с целью определения скорости осаждения каждой из частиц времяпролетным методом.

В экспериментальном исследовании влияния неизотермических условий на процесс гравитационного осаждения твердых сферических частиц в вязкой жидкости в качестве частиц использовались шарики из стали марки 95 × 18, в качестве вязкой жидкости — силиконовое масло ПМС-10000 при температуре 17 °С. Шарики нагревались до температуры T_p в диапазоне (40÷300) °С. Основные характеристики шариков и силиконового масла ПМС-10000 представлены в табл. 3 и 4 [13].

Таблица 3

Основные характеристики стальных шариков

Характеристика	Значение
Диаметр $D_p, \text{ мм}$	3÷18
Плотность $\rho_p, \text{ кг/м}^3$	7748
Коэффициент теплопроводности $\lambda_p, \text{ Вт/(м} \cdot \text{°С)}$	24
Удельная теплоемкость $c, \text{ Дж/(кг} \cdot \text{град)}$	483

Таблица 4

**Характеристики ПМС-10000
(при температуре 17 °С)**

Характеристика	Значение
Коэффициент динамической вязкости $\mu, \text{ Па} \cdot \text{с}$	10,84
Температура плавления $T_{fr}, \text{ °С}$	-48
Плотность $\rho_l, \text{ кг/м}^3$	979
Температура вспышки $T_{fl}, \text{ °С}$	315

Плотность силиконового масла измерялась ареометром с относительной погрешностью $\delta = 0,1\%$. Коэффициент динамической вязкости жидкости определялся по измеренной скорости стационарного осаждения u стального шарика диаметром D_p в стоксовском режиме [14, 15]:

$$\mu_l = \frac{gD_p^2(\rho_p - \rho_l)}{18u}.$$

Уравнение гравитационного осаждения твердой частицы в жидкости имеет вид [4]:

$$m_p \frac{du}{dt} = (\rho_p - \rho_l)V_p g - C_x S_m \frac{\rho_l u^2}{2}, \quad (2)$$

где V_p – объем частицы; S_m – площадь миделева сечения частицы.

При стационарном режиме осаждения ($du/dt = 0$) из уравнения (2) следует формула для определения коэффициента сопротивления сферической частицы

$$C_x = \frac{4}{3} \frac{gD_p}{u^2} \left(\frac{\rho_p}{\rho_l} - 1 \right). \quad (3)$$

При нагреве (охлаждении) частицы скорость ее гравитационного осаждения изменяется за счет нагрева (охлаждения) прилегающего к частице пограничного слоя жидкости: при его нагреве вязкость жидкости уменьшается, что приводит к снижению коэффициента сопротивления и увеличению скорости осаждения частицы, а при охлаждении наблюдается снижение скорости осаждения частицы.

Изменение плотности жидкости с ростом температуры намного меньше изменения коэффициента динамической вязкости. Пологая $\rho_l = \text{const}$, формулу (3) можно записать для эталонной и нагретой (охлажденной) частиц в виде:

$$C_{x0} = \frac{A}{u_0^2}, \quad (4)$$

$$C_x(\Delta T) = \frac{A}{[u(\Delta T)]^2}, \quad (5)$$

где $A = \frac{4}{3} g D_p \left(\frac{\rho_p}{\rho_l} - 1 \right) = \text{const}$; u_0 – скорость осаждения эталонной частицы с температурой, равной температуре жидкости ($T_p = T_l = 17^\circ\text{C}$); $u(\Delta T)$ – скорость осаждения нагретой (охлажденной) частицы; $\Delta T = (T_p - T_l)$ – разность температур частицы и жидкости.

Из (4), (5) следует соотношение для определения коэффициента сопротивления нагретой (охлажденной) частицы:

$$C_x(\Delta T) = C_{x0} \left[\frac{u_0}{u(\Delta T)} \right]^2. \quad (6)$$

Графики зависимости пройденного нагретыми ($T_p = 300^\circ\text{C}$) и эталонными ($T_p = 17^\circ\text{C}$) частицами ($D_p = 8,87$ и $17,47$ мм) расстояния x от времени t показаны на рис. 4.

По известным теплофизическим характеристикам частиц и жидкости, приведенным в табл. 3 и 4, и по измеренной скорости осаждения частиц заданного диаметра рассчитывалось изменение температуры нагретой (охлажденной) частицы в процесс ее гравитационного осаждения. Расчеты проводились с использованием нестационарного уравнения теплового баланса для конвективного теплообмена частицы с жидкостью [16]. Результаты расчетов показали, что для условий проведенных экспериментов температура частиц в процессе осаждения изменяется незначительно (менее 1%). Поэтому температура нагретой (охлажденной) частицы можно счи-

тать постоянной ($T_p = \text{const}$). Это допущение подтверждается линейностью графиков зависимости $x(t)$ на рис. 4, из которых следует постоянство скорости частиц в процессе осаждения ($u = \text{const}$).

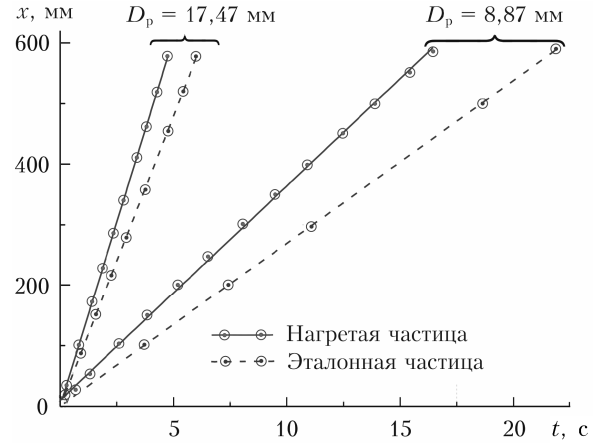


Рис. 4. Зависимости от времени t расстояния x , пройденного нагретыми ($T_p = 300^\circ\text{C}$) и эталонными ($T_p = 17^\circ\text{C}$) частицами ($T_l = 17^\circ\text{C}$)

В табл. 5 приведены измеренные значения скорости осаждения эталонной частицы, осредненные по пяти дублирующим опытам; рассчитанные по формуле (4) значения коэффициента сопротивления C_{x0} , числа Рейнольдса

$$Re_l = \frac{\rho_l u_0 D_p}{\mu_l}$$

и коэффициенты сопротивления, найденные для изотермических условий по аппроксимационной зависимости [15]:

$$C_x^{(appr)} = \frac{24}{Re_l} + \frac{4}{\sqrt[3]{Re_l}}. \quad (7)$$

Таблица 5

Характеристики осаждения частиц в изотермических условиях ($T_p = T_l = 17^\circ\text{C}$)

D_p , мм	u_0 , мм/с	$Re_l \cdot 10^3$	$C_{x0} \cdot 10^{-3}$	$C_x^{(appr)} \cdot 10^{-3}$
3	3,065	0,83	28,87	28,90
8,87	26,89	21,54	1,109	1,114
17,47	96,02	151,50	0,171	0,166

Из данных табл. 5 видно, что значения коэффициента сопротивления C_{x0} в изотермических условиях соответствуют зависимости (7). Расхождение составляет 0,1% (для $D_p = 3$ мм); 0,4% ($D_p = 8,87$ мм); 2,9% ($D_p = 17,47$ мм). Увеличение расхождения для более крупных частиц связано, по видимому, с погрешностью аппроксимационной зависимости (7).

Измеренные скорости осаждения $u(\Delta T)$ и рассчитанные по формуле (6) коэффициенты сопротивления для нагретых частиц ($T_p = 300^\circ\text{C}$, $T_l = 17^\circ\text{C}$) приведены в табл. 6. Здесь же даны значения отно-

сительного снижения коэффициента сопротивления частиц при их нагреве до 300 °С, вычисленные по формуле

$$\Delta C_x = \frac{C_{x0} - C_x(\Delta T)}{C_{x0}} \cdot 100\%.$$

Таблица 6

**Характеристики осаждения частиц
в неизотермических условиях**

D_p , мм	$u(\Delta T)$, мм/с	$C_x(\Delta T) \cdot 10^{-3}$	$C_{x0} \cdot 10^{-3}$	ΔC_x , %
8,87	34,08	0,690	1,109	38,0
17,47	122,05	0,106	0,171	38,0

Из табл. 6 следует, что при нагреве шариков диаметром 8,87 и 17,47 мм относительное снижение коэффициентов их сопротивления одинаково и составляет 38%.

Заключение

Представлены новые методы и схемы экспериментальных установок для определения коэффициента сопротивления сферической частицы при вдуве газа с ее поверхности и при гравитационном осаждении в вязкой жидкости в неизотермических условиях.

Показано, что значения коэффициента сопротивления (без вдува газа) в диапазоне чисел Рейнольдса $Re_0 = (3,14 \div 9,94) \cdot 10^3$ согласуются со стандартной зависимостью для турбулентного режима обтекания. При вдуве газа с поверхности частицы в исследованном диапазоне чисел Рейнольдса коэффициент сопротивления уменьшается примерно на 20%.

Получены новые экспериментальные данные по коэффициенту сопротивления твердых сферических частиц в неизотермических условиях в диапазоне малых чисел Рейнольдса ($Re < 1$). Показано, что при максимальной разности температур частиц и жидкости (283 °С) коэффициент сопротивления снижается на 38%.

Исследование выполнено при финансовой поддержке РФФИ (проект № 15-19-10014).

1. Нигматулин Р.И. Динамика многофазных сред. Ч. 1. М.: Наука, 1987. 464 с.
2. Келбалиев Г.И. Коэффициенты сопротивления твердых частиц, капель и пузырей различной формы // Теоретические основы химической технологии. 2011. Т. 45, № 3. С. 264–283.
3. Стернин Л.Е., Шрайбер А.А. Многофазные течения газа с частицами. М.: Машиностроение, 1994. 320 с.
4. Архипов В.А., Усанина А.С. Движение частиц дисперсной фазы в несущей среде. Томск: Издательский Дом ТГУ, 2014. 252 с.
5. Померанцев В.В., Арефьев К.М., Ахмедов Д.Б., Конович М.Н., Корчунов Ю.Н., Рундыгин Ю.А., Шагалава С.Л., Шестаков С.М. Основы практической теории горения. Л.: Энерготомиздат, 1986. 312 с.
6. 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.
7. Pfender E., Lee Y.C. Particle dynamics and particle heat and mass transfer in thermal plasmas. Part 1. The motion of a single particle without thermal effects // Plasma Chem. Plasma Process. 1985. V. 5, N. 3. P. 211–237.
8. Eisenklam P., Arunachalam S.A. The drag resistance of burning drops // Combust. Flame. 1966. V. 10, N. 2. P. 171–181.
9. Петунин А.Н. Методы и техника измерений параметров газового потока. М.: Машиностроение, 1996. 380 с.
10. Счетчик газа СГ-6: Пат. 43023. Россия, МКПО 10-04. Архипов В.А., Бинфет Р.Г., Рожин Ю.К., Соболевский В.И.; НИ Том. гос. ун-та. № 94038218; Заявл. 17.10.1994; Опубл. 16.12.1996. Бюл. № 12.
11. Справочник химика. Основные свойства неорганических и органических соединений. Т. 2. Л.: Химия, 1971. 1168 с.
12. Усанина А.С., Басалаев С.А. Движение высококонцентрированной системы частиц в стоковом режиме. // XI Междунар. конф. студентов и молодых ученых.: сб. науч. тр. Томск: НИ ТПУ, 2014. С. 234–236.
13. Архипов В.А., Усанина А.С. Гравитационное осаждение совокупности твердых сферических частиц в режиме частично продуваемого облака // Инженерно-физический журнал. 2017. Т. 90, № 5. С. 1–8.
14. Лыков А.В. Тепломассообмен М.: Энергия, 1978. 480 с.

V.A. Arkhipov, A.A. Antonnikova, S.A. Basalaev, K.G. Perfilieva. Technique for measurements of the drag coefficient of a spherical particle in nonstandard conditions.

A technique and results of the experimental study of a drag coefficient of a spherical particle in nonstandard conditions are presented. The effect of the gas injection from a surface of a solid spherical particle on the drag coefficient is analyzed under variations in the ratio of the gas injection velocity and the velocity of airflow around the particle. The dependence of the drag coefficient on the velocity of the gas injection from a particle surface is derived. The influence of the temperature difference between the fluid and particle on the drag coefficient during particle sedimentation in a viscous fluid is studied; the corresponding dependence is found.