

Научная статья

УДК 532.5.011

doi: 10.17223/19988621/81/6

Экспериментально-теоретическое исследование обтекания сферы с учетом вдува газа с ее поверхности

Владимир Афанасьевич Архипов¹, Сергей Александрович Басалаев²,
Кирилл Владимирович Костюшин³, Ксения Григорьевна Перфильева⁴,
Анна Сергеевна Усанина⁵

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

¹leva@niipmm.tsu.ru

²tarm@niipmm.tsu.ru

³kostushink@niipmm.tsu.ru

⁴k.g.perfiljeva@yandex.ru

⁵usaninaanna@mail.ru

Аннотация. Представлены новые экспериментально-теоретические данные по исследованию обтекания твердой сферы в условиях истечения потока массы с ее поверхности. Предложен новый способ определения коэффициента аэродинамического сопротивления твердой сферы при истечении потока воздуха с ее поверхности, включающий измерение аэродинамической силы, действующей на обдуваемую равномерным газовым потоком полую сферу с пористой оболочкой, при подаче во внутреннюю полость сферы сжатого газа под давлением.

Ключевые слова: твердая сфера, обтекание сферы, вдув газа, коэффициент сопротивления, экспериментальное исследование, численное моделирование

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

Для цитирования: Архипов В.А., Басалаев С.А., Костюшин К.В., Перфильева К.Г., Усанина А.С. Экспериментально-теоретическое исследование обтекания сферы с учетом вдува газа с ее поверхности // Вестник Томского государственного университета. Математика и механика. 2023. № 81. С. 57–72. doi: 10.17223/19988621/81/6

Original article

Experimental and theoretical studies of the flow around a sphere with account for gas injection from its surface

Vladimir A. Arkhipov¹, Sergey A. Basalaev², Kirill V. Kostyushin³,
Kseniya G. Perfil'eva⁴, Anna S. Usanina⁵

1, 2, 3, 4, 5 Tomsk State University, Tomsk, Russian Federation

¹leva@niipmm.tsu.ru

² *tarm@niipmm.tsu.ru*

³ *kostushink@niipmm.tsu.ru*

⁴ *k.g.perfiljeva@yandex.ru*

⁵ *usaninaanna@mail.ru*

Abstract. The results of the experimental and theoretical studies of the gas flow around a solid sphere under conditions of mass outflow from its surface are presented. A new experimental setup and a method for studying the flow around a solid sphere during the gas injection from its surface are proposed with the aim of improving the accuracy of determining the drag coefficient. In the range of the Reynolds number ($Re = 133 \div 667$), experimental results show that the drag coefficient decreases at the gas injection from the surface of the sphere. Moreover, the drag coefficient decreases with an increase in the density of the injected air flow at the fixed Reynolds number. Numerical simulation of a two-phase flow around a sphere with the gas injection from its surface is carried out for two calculation cases: with a uniform gas outflow from the surface of a porous sphere and with gas injection from perforated holes on the sphere surface. The numerical calculation results for the case of gas injection from the holes of the sphere are in quantitative and qualitative agreement with the experimental data.

Keywords: solid sphere, flow around a sphere, gas injection, drag coefficient, experimental study, numerical simulation

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

For citation: Arkhipov, V.A., Basalaev, S.A., Kostyushin, K.V., Perfil'eva, K.G., Usanina, A.S. (2023) Experimental and theoretical studies of the flow around a sphere with account for gas injection from its surface. *Vestnik Tomskogo gosudarstvennogo universiteta. Matematika i mekhanika – Tomsk State University Journal of Mathematics and Mechanics*. 81. pp. 57–72. doi: 10.17223/19988621/81/6

Введение

Обтекание сферической частицы дисперсной фазы (твердой или жидкой) газовым потоком реализуется в различных технических системах и технологических процессах. Исследованию влияния истечения потока газа с поверхности твердой сферы посвящены в основном расчетно-теоретические работы [1–9]. В частности, в работах J.K. Dukowicz [2, 3] проведено численное моделирование обтекания твердой сферической частицы с равномерным истечением потока массы с ее поверхности при малых числах Рейнольдса ($Re < 1$) и получены теоретические зависимости коэффициента аэродинамического сопротивления от Re обтекающего потока и параметра вдува, характеризующего скорость оттекающего от поверхности частицы потока газа. В работе T.R. Jayawickrama и соавт. [4] проведено теоретическое исследование влияния истечения потока массы с поверхности частицы на коэффициент аэродинамического сопротивления при ее движении в однородном потоке в изотермических условиях в диапазоне чисел Рейнольдса $Re = 0.2 \div 14$. Такая же задача решалась в диапазоне чисел Рейнольдса $Re = 1 \div 200$ численным методом конечных разностей для уравнения Навье–Стокса в работах [5, 6]. В работе M. Watanabe, J. Yahagi [7] представлены результаты численного моделирования динамики движения частицы горящего топлива

с неоднородным вдувом газового потока с поверхности в диапазоне чисел Рейнольдса $Re = 1 \div 200$. Исследовано изменение двух составляющих коэффициента аэродинамического сопротивления (коэффициенты давления и трения) при разном направлении истечения газового потока с поверхности частицы. В большинстве рассмотренных работ показано снижение коэффициента сопротивления при увеличении скорости вдуваемого потока газа с поверхности частицы. Экспериментальному исследованию обтекания сфероида в условиях вдува газа с его поверхности посвящено ограниченное число публикаций [8, 9].

Анализ известных публикаций по данной тематике показал, что в большинстве работ исследования проводились, как правило, при ускорении частицы, что не позволяет выделить влияние только вдува газа с поверхности частицы на коэффициент аэродинамического сопротивления. При этом данные разных авторов имеют большой разброс (иногда противоречат друг другу). Поэтому для практических расчетов известные зависимости по влиянию эффекта вдува на коэффициент сопротивления требуют дальнейшего тщательного экспериментально-теоретического подтверждения и уточнения.

Цель данной работы – комплексное (экспериментальное и теоретическое) исследование обтекания твердой сферы в условиях оттока массы от ее поверхности и получение зависимости для силы аэродинамического сопротивления. Влияние силы, действующей на твердую сферу при обтекании в автоматическом и переходном режимах, экспериментально исследовано в работах [10, 11]. Для повышения чувствительности метода измерения коэффициента сопротивления в переходном режиме разработана экспериментальная установка, включающая рычаг с закрепленной на нем твердой сферой [12].

Экспериментальная установка и методика исследования

Схема экспериментальной установки для исследования влияния истечения потока газа с поверхности одиночной твердой сферы на коэффициент аэродинамического сопротивления приведена на рис. 1 [12].

Твердая полая перфорированная сфера 1 закреплялась на длинном плече 2 рычага. Рычаг устанавливался на неподвижной точке опоры 3 с возможностью его вращения вокруг горизонтальной оси 4. На коротком плече 5 рычага крепился стержень 6, контактирующий с приемной площадкой 7 датчика силы 8, в качестве которого использовались высокоточные электронные аналитические весы марки AND GX-200 с погрешностью ± 0.002 гс ($1 \text{ гс} = 9.80665 \text{ мН}$).

В ходе эксперимента предварительно на коротком плече 5 рычага размещался дополнительный груз 9 для уравнивания моментов силы тяжести, приложенных к плечам рычага. При открытии запорного вентиля 10 во внутреннюю полость твердой сферы 1 подавался через тонкостенную трубку 11 сжатый воздух из батареи баллонов 12 через расходомер 13, давление перед которым регистрировалось манометром 14. После открытия запорного вентиля 15 сжатый воздух из батареи баллонов 12 через расходомер 16 и гибкий шланг 17 поступал внутрь патрубка 18, расположенного под полый твердой сферой 1. Давление перед расходомером регистрировалось манометром 19. В качестве расходомеров 13, 16 использовались ротаметры марки РМ-0.63Г с погрешностью $\pm 2.5\%$, которые были отградуированы для объемного расхода.

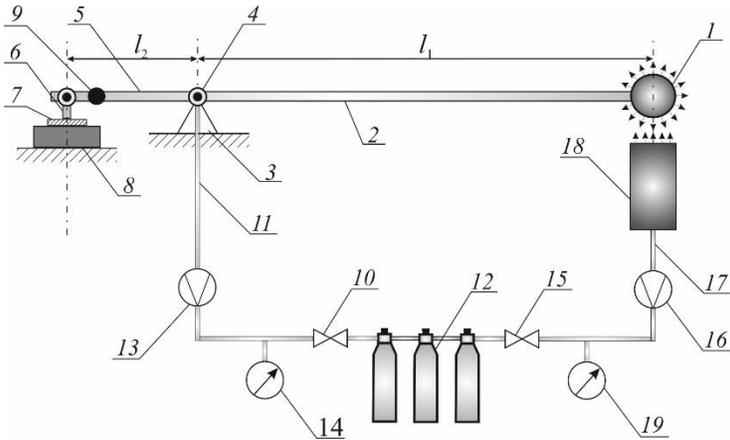


Рис. 1. Схема экспериментальной установки для исследования обтекания твердой сферы в условиях вдува газа с ее поверхности: 1 – полая сфера; 2 – длинное плечо рычага; 3 – точка опоры; 4 – ось; 5 – короткое плечо рычага; 6 – стержень; 7 – приемная площадка; 8 – датчик силы; 9 – груз; 10 – запорный вентиль; 11 – трубка; 12 – батарея баллонов; 13 – расходомер; 14 – манометр; 15 – запорный вентиль; 16 – расходомер; 17 – гибкий шланг; 18 – патрубок; 19 – манометр

Fig. 1. Diagram of an experimental setup for studying the flow around a solid sphere under conditions of gas injection from its surface: (1) hollow sphere; (2) long lever arm; (3) fulcrum; (4) axis; (5) short lever arm; (6) pin; (7) receiving platform; (8) force sensor; (9) block; (10) shut-off valve; (11) tube; (12) bank of air flasks; (13) flow meter; (14) manometer; (15) shut-off valve; (16) flow meter; (17) flexible hose; (18) branch pipe; and (19) manometer

Закрепление твердой полый сферы на длинном плече рычага и стержня, контактирующего с приемной площадкой датчика силы, на коротком плече рычага обеспечивает увеличение измеренной датчиком силы F в n раз по сравнению с аэродинамической силой F_a , действующей на обдуваемую равномерным газовым потоком сферу: $F = F_a \cdot n$, где $n = l_1/l_2 > 1$ – передаточное отношение рычага, равное отношению длин плеч.

Предварительное уравнивание моментов силы тяжести, приложенных к плечам рычага, путем помещения дополнительного груза на коротком плече рычага обеспечивает исключение влияния массы твердой сферы, тонкостенной трубки для подачи сжатого газа во внутреннюю полость сферы, стержня, контактирующего с приемной площадкой датчика силы и другими элементами рычага, на результаты измерений. При этом датчик силы регистрирует только усиленную в n раз аэродинамическую силу, действующую на твердую полую сферу.

Предложенный способ определения влияния истечения потока газа с поверхности твердой перфорированной сферы на коэффициент аэродинамического сопротивления позволяет повысить точность измерения аэродинамической силы при малых числах Рейнольдса, соответствующих малым скоростям обдува сферы.

Для получения достоверных данных о влиянии истечения потока массы через перфорированную поверхность твердой сферы в экспериментах измерены основные параметры, описывающие рассматриваемый процесс: диаметр твердой сферы D ; скорость обдувающего потока u ; скорость вдуваемого с поверхности твердой сферы потока u_s .

В экспериментах использовались перфорированные твердые сферы, изготовленные на 3D-принтере. Диаметр используемых в экспериментах сфер измерялся микрометром с погрешностью 0.01 мм. Эксперименты проведены для сфер диаметрами $D = 10$ и $D = 20$ мм; количество перфораций диаметром 1 мм на поверхностях сфер $n = 11$ и $n = 44$ соответственно.

Длина тонкостенной трубки составляла 65 см. Расстояние от центра сферы до точки опоры рычага $l_1 = 44$ см, а расстояние от стержня, контактирующего с приемной площадкой датчика силы, до точки опоры рычага $l_2 = 7$ см.

Скорость обдувающего и истекающего потока воздуха с поверхности твердой сферы измерялась с помощью цифрового анемометра АП-1 с погрешностью ± 0.1 м/с. В экспериментах значения скорости истекающего с поверхности потока воздуха варьировали в диапазоне $u_s = 0.5 \div 1.7$ м/с, а значения обдувающего потока воздуха составляли $u = 0.7 \div 1.4$ м/с.

Экспериментальное значение коэффициента аэродинамического сопротивления от числа Рейнольдса обдувающего потока и плотности потока вдуваемого газа определялось из соотношения

$$C_D(\text{Re}, q_s) = C_{D0}(\text{Re}) \frac{F(\text{Re}, q_s)}{F_0(\text{Re})},$$

где в качестве $C_{D0}(\text{Re})$ использовалась стандартная кривая сопротивления [13]

$$C_{D0}(\text{Re}) = \begin{cases} \frac{24}{\text{Re}}, & \text{Re} \leq 1, \\ \frac{24}{\text{Re}} + \frac{4}{\sqrt[3]{\text{Re}}}, & \text{Re} = (1 \div 700), \\ 0.44 & \text{Re} \geq (700 \div 3 \cdot 10^5), \end{cases}$$

и число Рейнольдса Re определялось из соотношения

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

где $F(\text{Re}, q_s)$ – сила, измеренная датчиком при заданных значениях Re , q_s ; $F_0(\text{Re})$ – сила, измеренная датчиком при заданном значении Re при отсутствии вдува с поверхности сферы; D – диаметр полой сферы; ρ , μ – плотность и коэффициент динамической вязкости газа, обдувающего сферу; u – скорость обдувающего сферу газового потока. При численном моделировании плотность потока газа, равномерно вдуваемого через пористую оболочку, определялась по формуле

$$q_s = \rho_s \frac{Q_s}{\pi D^2}, \quad (1)$$

где ρ_s – плотность газа, вдуваемого с поверхности сферы; Q_s – объемный расход газа. В экспериментах величина q_s рассчитывалась из выражения

$$q_s = \rho_s \frac{Q_s}{S}, \quad (2)$$

где S – суммарная площадь перфораций.

Математическая постановка задачи и метод решения

Для математического описания задачи обтекания твердой сферы при наличии газоприхода с ее поверхности использовалась система уравнений Навье–Стокса, осредненная по Фавру [14, 15] в декартовой системе координат x_1, x_2, x_3 .

Уравнение неразрывности имеет вид:

$$\frac{\partial \bar{\rho}}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x_j} [\bar{\rho} \tilde{u}_j] = 0, \quad (3)$$

где ρ – плотность; t – время; u_j – скорость; x_j – координата.

Уравнения импульса имеют вид:

$$\frac{\partial (\bar{\rho} \tilde{u}_i)}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x_j} [\bar{\rho} \tilde{u}_i \tilde{u}_j + \bar{p} \delta_{ij} - \tilde{\tau}_{ij}] = 0, \quad (4)$$

где $i = 1, 2, 3$; p – давление; δ_{ij} – символ Кронекера.

Уравнение энергии запишется в виде:

$$\frac{\partial (\bar{\rho} \tilde{E})}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x_j} [\bar{\rho} \tilde{u}_j \tilde{E} + \tilde{u}_j \bar{p} - \tilde{u}_i \tilde{\tau}_{ij}] = 0, \quad (5)$$

где E – полная внутренняя энергия.

Система уравнений (4), (5) замыкается уравнением состояния идеального газа

$$\bar{p} = \bar{\rho} R \tilde{T},$$

где T – температура; R – газовая постоянная.

Тензор вязких напряжений имеет следующий вид:

$$\tilde{\tau}_{ij} = \mu \left(\frac{\partial \tilde{u}_i}{\partial x_j} + \frac{\partial \tilde{u}_j}{\partial x_i} \right) - \frac{2}{3} \mu \frac{\partial \tilde{u}_k}{\partial x_k} \delta_{ij} - \overline{\rho u_i'' u_j''},$$

где μ – коэффициент динамической вязкости.

Для замыкания системы уравнений вязкого газа использовалась модель турбулентности SST $k-\omega$ [15].

Расчеты проведены для двух модельных вариантов подачи газового потока с поверхности твердой сферы (рис. 2). Для первого варианта (см. рис. 2, а), соответствующего физической постановке рассматриваемой задачи, равномерный вдув газового потока задавался по всей поверхности пористой сферы; плотность потока газа определялась формулой (1). Для второго варианта (см. рис. 2, б) газ подавался через трубку в полость твердой сферы с перфорированной поверхностью, что соответствовало условиям проведения экспериментов; плотность потока газа при этом определялась формулой (2). На рис. 2 представлены виды расчетной области и обозначения границ для постановки граничных условий. В качестве граничных условий на границе 1 задавались вектор скорости обтекающего твердую сферу потока $\bar{u} = u_{in} \bar{n}$ (где \bar{n} – вектор внутренней нормали к границе 1), давление и температура окружающей среды: $P = 1$ атм, $T = 296$ К, кинетическая энергия турбулентности и диссипация кинетической энергии турбулентности: $k = k_0$, $\omega = \omega_0$. Для границ 2 и 3 использовались мягкие граничные условия: $\partial / \partial n = 0$. На поверхности вдува (граница 4) задавались газоприход $G = G_{vd}$

и полная энтальпия $H = H_0$. Направление вдува – по нормали к поверхности. Для конфигурации со вдувом через отверстия на всех непроницаемых поверхностях твердой сферы и трубки (граница 5) для скорости задавались условия непротекания и прилипания: $\vec{u} = [0 \ 0 \ 0]^T$, для температуры – условия теплоизоляции: $\text{grad}(T) = 0$, для давления: $\text{grad}(P) = 0$. Для постановки граничных условий для характеристик турбулентности на стенке используется метод пристеночных функций. В качестве начальных условий во всей области течения задавались параметры набегающего потока. Газ – воздух с параметрами: $k = 1.4$, $R = 287$ Дж/(кг·К), динамическая вязкость: $1.8 \cdot 10^{-5}$ Па·с.

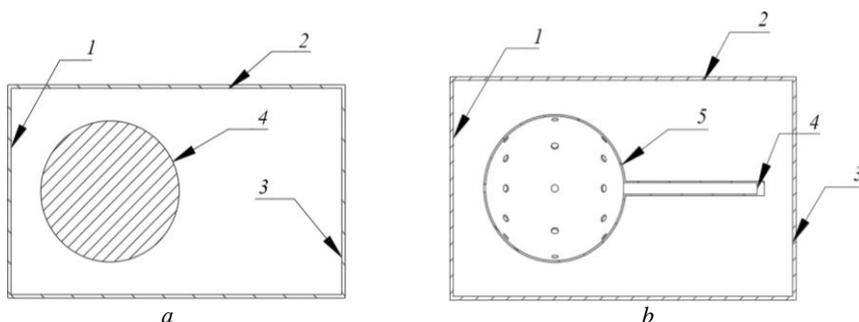


Рис. 2. Расчетная область и обозначения граничных условий: *a* – вариант с равномерным по пористой поверхности твердой сферы вдувом; *b* – вариант с вдувом через перфорированные отверстия на поверхности твердой сферы

Fig. 2. Computational domain and notations of boundary conditions: (*a*) a case with uniform injection on the porous surface of a solid sphere and (*b*) a case with injection through perforated holes on the solid sphere surface

Численный расчет проводился методом установления. Для повышения порядка точности по пространству использовался метод кусочно-линейной реконструкции решения, с ограничителями Venkatakrisnan [16]. Для определения параметров на гранях расчетных ячеек использовался метод Roe с энтропийной коррекцией [17].

Результаты экспериментального и численного исследования

Результаты экспериментальных исследований получены в диапазоне чисел Рейнольдса обдувающего потока $Re = 133 \div 1811$, что соответствует переходному и автомодельному режимам.

Качественная картина истечения газового потока из перфорированных отверстий на поверхности твердой сферы при отсутствии и в присутствии обдувающего потока ($u = 0.2$ м/с) показана на рис. 3.

Экспериментальные значения коэффициента аэродинамического сопротивления твердой сферы C_D при истечении газового потока с ее поверхности в зависимости от значения плотности потока газа q_s приведены в табл. 1–3. Эксперименты проведены для двух значений q_s : $q_s = 0.60$ кг/(м²·с) и $q_s = 1.09$ кг/(м²·с).

В табл. 1–3 приведены измеренные значения скорости обдувающего потока газа (воздуха) u , рассчитанные по формуле (3) значения плотности потока вдува-

емого газа q_s , значения числа Рейнольдса Re , значения коэффициента аэродинамического сопротивления от числа Рейнольдса $C_{D0}(Re)$, рассчитанные по стандартной зависимости (2) и измеренные значения коэффициента аэродинамического сопротивления твердой сферы $C_D(Re, q_s)$, определенные по формуле (1).

Из приведенных в табл. 1 и 2 результатов следует, что при вдуве газа с поверхности сферы в исследованном диапазоне чисел $Re = 133 \div 667$ коэффициент аэродинамического сопротивления уменьшается. По мере увеличения плотности вдуваемого потока газа при постоянном значении числа Рейнольдса обтекающего потока наблюдается наибольшее изменение (уменьшение) коэффициента аэродинамического сопротивления сферы.

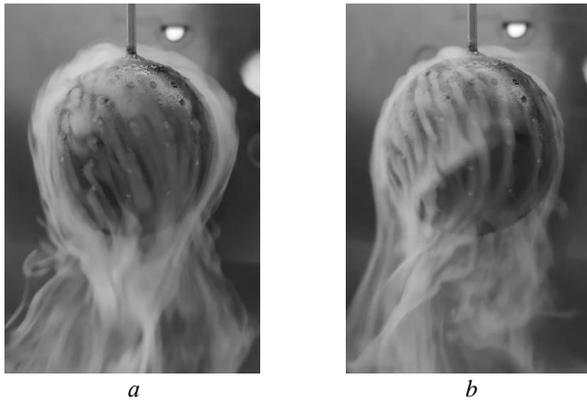


Рис. 3. Фотографии процесса истечения воздушного потока из перфорированных отверстий на поверхности твердой сферы ($D = 20$ мм) при отсутствии (a) и в присутствии (b) обдувающего потока ($u = 0.2$ м/с)

Fig. 3. Pictures of the air flow injection from perforated holes on the solid sphere surface ($D = 20$ mm): (a) in the absence and (b) in the presence of a blowing flow ($u = 0.2$ m/s)

Таблица 1

Результаты измерений коэффициента аэродинамического сопротивления сферы $D = 10$ мм при $q_s = 0.60$ кг/(м²·с)

Параметр	Значения						
	0.20	0.30	0.40	0.50	0.60	0.80	1.00
$u, \text{ м/с}$	0.20	0.30	0.40	0.50	0.60	0.80	1.00
Re	133	200	267	333	400	533	667
C_{D0}	0.96	0.80	0.71	0.65	0.60	0.54	0.49
C_D	0.87	0.72	0.71	0.63	0.60	0.52	0.48

Таблица 2

Результаты измерений коэффициента аэродинамического сопротивления сферы $D = 10$ мм при $q_s = 1.09$ кг/(м²·с)

Параметр	Значения						
	0.20	0.30	0.40	0.50	0.60	0.80	1.00
$u, \text{ м/с}$	0.20	0.30	0.40	0.50	0.60	0.80	1.00
Re	133	200	267	333	400	533	667
C_{D0}	0.96	0.80	0.71	0.65	0.60	0.54	0.49
C_D	0.98	0.65	0.62	0.56	0.60	0.51	0.49

Результаты измерений коэффициента аэродинамического сопротивления сферы $D = 20$ мм при $q_s = 0.60$ кг/(м²·с)

Параметр	Значения						
	0.20	0.30	0.40	0.50	0.60	0.80	1.00
u , м/с	0.20	0.30	0.40	0.50	0.60	0.80	1.00
Re	267	400	533	667	800	1066	1333
C_{D0}	0.71	0.60	0.54	0.49	0.44	0.44	0.44
C_D	0.61	0.56	0.53	0.48	0.44	0.43	0.46

Из табл. 3 следует, что по мере увеличения числа Re обтекающего твердую сферу потока газа коэффициент аэродинамического сопротивления при истечении газа с ее поверхности в промежуточном режиме уменьшается до некоторого переходного значения, соответствующего началу автомодельного режима. При наступлении автомодельного режима (при $Re \geq 700$) коэффициент аэродинамического сопротивления соответствует стандартному значению $C_{D0} = const = 0.44$.

Получены результаты численного моделирования обтекания твердой сферы диаметром 10 и 20 мм для случая равномерного вдува воздуха с ее поверхности и для случая вдува потока воздуха через перфорированные отверстия на поверхности твердой сферы. В расчетах варьировали скорость обтекающего твердую сферу потока и газоприход с поверхности сферы в соответствии со значениями параметров, используемых в экспериментах. Расчеты проведены в трехмерной постановке на неструктурированной расчетной сетке с числом ячеек ≈ 950 тыс.

На рис. 4 показана локальная картина течения для двух рассмотренных расчетных вариантов: с вдувом газа через перфорированные отверстия на поверхности твердой сферы (см. рис. 4, *a*) и с равномерным вдувом газа (см. рис. 4, *b*). При вдуве газового потока в полость сферы реализуется струйная картина течения, которая приводит к сильному возмущению течения в окрестности сферы. При равномерном вдуве газа наблюдается лишь небольшое отклонение линий тока набегающего потока.

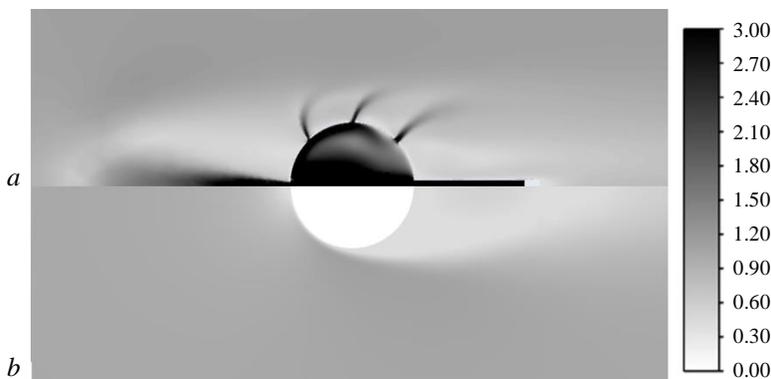


Рис. 4. Поле модуля вектора скорости $|\vec{u}|$ в окрестности твердой сферы ($D = 20$ мм) при $Re = 1120$, м/с: *a* – расчет с вдувом воздуха через перфорированные отверстия на поверхности сферы; *b* – расчет с равномерным вдувом воздуха

Fig. 4. The field of the velocity vector modulus $|\vec{u}|$ in the vicinity of a solid sphere ($D = 20$ mm) at the Reynolds number $Re = 1120$, м/с: (*a*) calculation with air injection through perforated holes on the sphere surface and (*b*) calculation with uniform gas injection

Локальная картина поля скоростей в окрестности твердой сферы диаметром 10 мм при равномерном вдуве потока воздуха с ее поверхности при значении числа Рейнольдса $Re = 506$ показана на рис. 5. По мере увеличения газоприхода с поверхности твердой сферы увеличивается область торможения набегающего потока и существенно расширяется зона рециркуляционного следа. На рис. 5 изображены изолинии скорости, в каждой точке которых величина модуля скорости сохраняет постоянное значение.

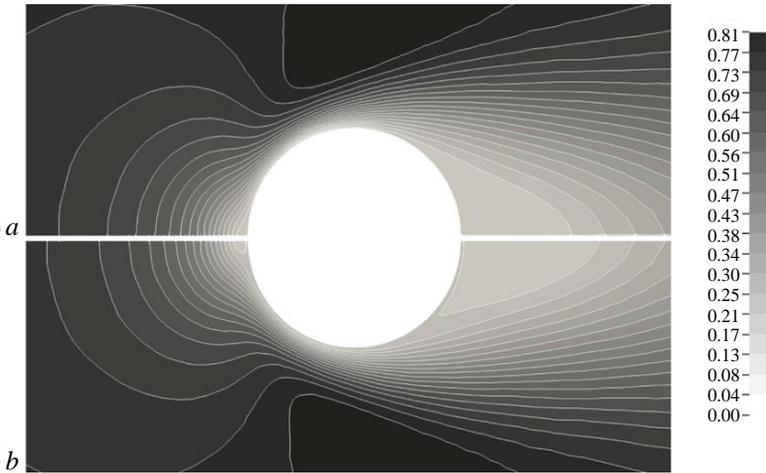


Рис. 5. Поле модуля вектора скорости $|\vec{u}|$ в окрестности твердой сферы ($D = 10$ мм) при $Re = 506$ ($u = 0.8$ м/с), м/с: $a - u_s = 0.5$ м/с; $b - u_s = 1.7$ м/с

Fig. 5. The field of the velocity vector modulus $|\vec{u}|$ in the vicinity of a solid sphere ($D = 10$ mm) at the Reynolds number $Re = 506$ ($u = 0.8$ m/s), m/s: $u_s = (a) 0.5$ and $(b) 1.7$ m/s

Распределение давления по поверхности твердой сферы диаметром 10 мм при различных числах Рейнольдса при фиксированной скорости вдуваемого потока воздуха приведено на рис. 6 (φ – зенитный угол в сферической системе координат). По мере увеличения скорости обтекающей твердую сферу потока уровень давления на поверхности сферы существенно увеличивается, но область повышенного давления остается неизменной.

На рис. 7 показано распределение давления по поверхности сферы диаметром 10 мм при значении числа Рейнольдса $Re = 905$. Видно, что при наличии вдува с поверхности твердой сферы, при увеличении газоприхода, максимальное значение давления изменяется незначительно. Стоит отметить, что по сравнению с результатами расчетов, полученными при отсутствии вдуваемого потока воздуха ($u_s = 0$), площадь области повышенного давления увеличивается на 10–15%. Эти эффекты наблюдаются для всех рассмотренных расчетных вариантов.

На рис. 8 приведены зависимости коэффициента сопротивления твердой сферы диаметром 20 мм от скорости вдуваемого потока воздуха u_s , рассчитанные для случая равномерного истечения газа с поверхности сферы (см. рис. 8, *a*) и при вдуве через перфорированные отверстия (см. рис. 8, *b*) при разных числах Рейнольдса. Отличия в значениях C_D на рис. 8, *a*, *b* при скорости вдува $u_s = 0$ объяс-

няется различием структуры поверхности моделируемой твердой сферы. Результаты расчета показывают, что при равномерном вдуве по мере увеличения скорости вдува воздуха с поверхности твердой сферы наблюдается постепенное снижение коэффициента сопротивления, а при значении $u_s > 1.3$ м/с происходит монотонное увеличение C_D относительно условий без вдува. Этот эффект связан, по-видимому, с изменением соотношения составляющих коэффициента полного сопротивления (коэффициентов сопротивления давления и трения) при изменении скорости вдуваемого потока [1].

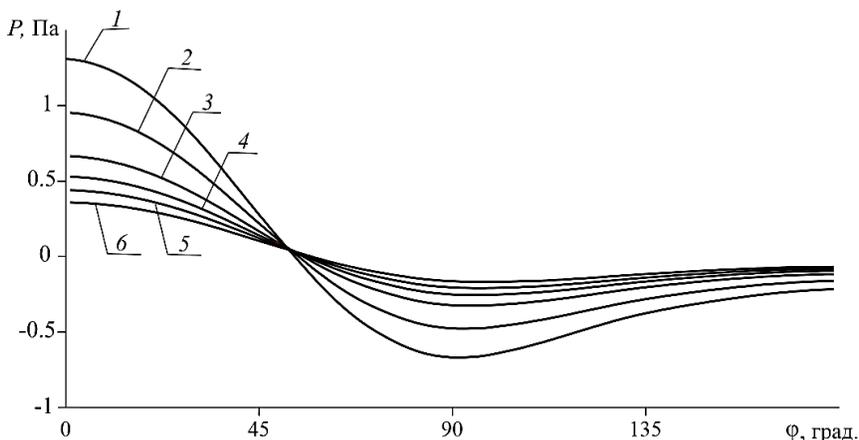


Рис. 6. Расчетное распределение давления по поверхности твердой сферы ($D = 10$ мм) при скорости вдуваемого потока воздуха $u_s = 0.9$ м/с: 1 – $Re = 905$; 2 – $Re = 766$; 3 – $Re = 633$; 4 – $Re = 559$; 5 – $Re = 506$; 6 – $Re = 453$

Fig. 6. Calculated pressure distribution on the solid sphere surface ($D = 10$ mm) at the blowing air flow velocity $u_s = 0.9$ m/s: $Re = (1) 905$; (2) 766; (3) 633; (4) 559; (5) 506; and (6) 453

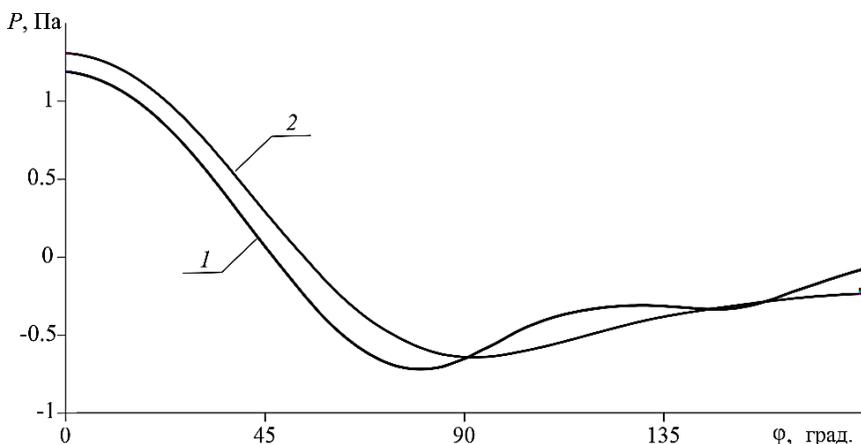


Рис. 7. Расчетное распределение давления по поверхности твердой сферы ($D = 10$ мм) при $Re = 905$: 1 – $u_s = 0$; 2 – $u_s = 1.7$ м/с

Fig. 7. Calculated pressure distribution on the solid sphere surface ($D = 10$ mm) at the Reynolds number $Re=905$: $u_s = (1) 0$ and (2) 1.7 m/s

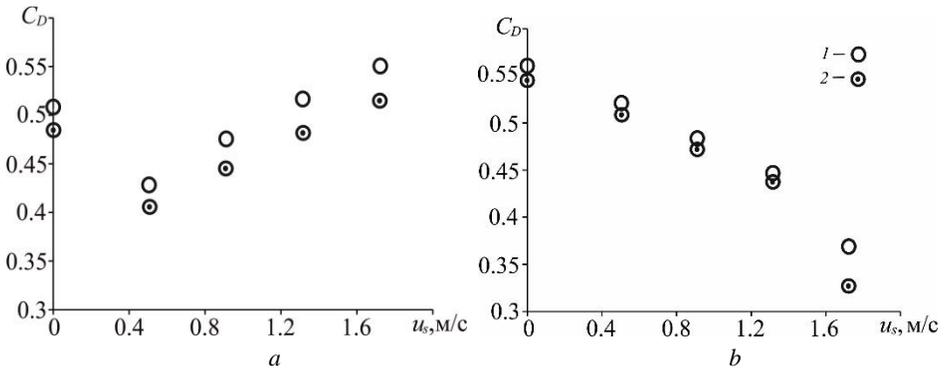


Рис. 8. Расчетные зависимости коэффициента сопротивления твердой сферы ($D = 20$ мм) от скорости вдува при равномерном вдуве с ее поверхности (а) и вдувом через перфорированные отверстия (b): 1 – $Re = 1\ 266$; 2 – $Re = 1\ 811$

Fig. 8. Calculated drag coefficient of a solid sphere ($D = 20$ mm) as a function of blowing velocity at (a) uniform injection from the sphere surface and (b) injection through perforated holes: $Re = (1) 1266$ and (2) 1811

При вдуве воздуха через перфорированную поверхность сферы наблюдается монотонное уменьшение C_D с увеличением скорости вдува. Это объясняется отличием интеграла сил давления по поверхности твердой сферы в области торможения потока при вдуве воздуха и его отсутствии. Отличие вызвано влиянием струйного течения при вдуве воздуха через перфорированные отверстия.

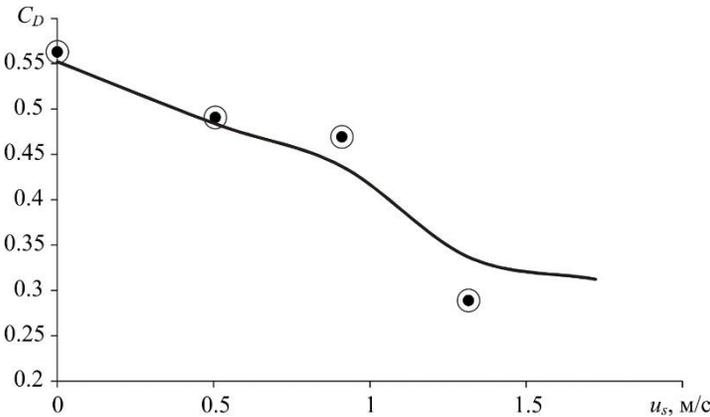


Рис. 9. Зависимость коэффициента сопротивления твердой сферы ($D = 20$ мм) от скорости вдува при $Re = 1\ 120$ (точки – экспериментальные данные, сплошная линия – численный расчет)

Fig. 9. Drag coefficient as a function of blowing velocity for a solid sphere ($D = 20$ mm) at $Re = 1120$ (the dotted line indicates experimental data; the solid line, the numerical calculation)

На рис. 9 приведены расчетная и экспериментальная зависимости коэффициента сопротивления C_D твердой сферы диаметром 20 мм от скорости вдува через ее перфорированную поверхность. Из приведенных на рис. 9 данных следует их количественное и качественное соответствие.

Заключение

– Предложены новая экспериментальная установка и методика исследования влияния истечения воздуха через перфорированную поверхность полый твердой сферы на коэффициент аэродинамического сопротивления в обдуваемом потоке.

– В исследованном диапазоне чисел Рейнольдса обдувающего потока $Re = 133 \div 1811$ экспериментально показано, что при истечении воздуха через перфорированную поверхность твердой сферы коэффициент аэродинамического сопротивления C_D уменьшается.

– Численным решением системы уравнений Навье–Стокса получена картина обтекания твердой сферы при равномерном вдуве газа с ее поверхности и при вдуве газа через перфорированную поверхность сферы. Показано, что при равномерном вдуве наблюдается небольшое отклонение линии тока набегающего потока; при вдуве через перфорированную поверхность реализуется струйная картина обтекания, которая приводит к сильному возмущению течения в окрестности сферы.

– Проведены численные расчеты коэффициента сопротивления сферы при равномерном вдуве газа с ее поверхности и при вдуве через перфорированные отверстия. Результаты расчетов показали, что при равномерном вдуве по мере увеличения скорости вдува наблюдается монотонное снижение C_D , а при значении скорости вдува более 1.3 м/с – увеличение C_D по сравнению с его значением при в отсутствие вдува. Этот эффект связан, по-видимому, с изменением соотношения составляющих коэффициента полного сопротивления (коэффициентов сопротивления давления и трения) при изменении скорости ддуваемого потока.

– Сравнение расчетных и экспериментальных зависимостей $C_D(u_s)$ при вдуве газа через перфорированную поверхность показало их количественное и качественное соответствие.

Список источников

1. Горохов М.М., Русяк И.Г., Тенев В.А. Численное исследование обтекания осесимметричных тел при наличии вдува с поверхности // *Механика жидкости и газа*. 1996. № 4. С. 162–166.
2. Dukowicz J.K. An exact solution for the drag of a sphere in low Reynolds number flow with strong uniform suction or blowing // *The Physics of Fluids*. 1982. V. 25 (7). P. 1117–1118.
3. Dukowicz J.K. Drag of evaporating or condensing droplets in low Reynolds number flow // *The Physics of Fluids*. 1984. V. 27 (6). P. 1351–1358. doi: 10.1063/1.864776
4. Jayawickrama T.R., Haugen N.E.L., Babler M.U. et al. The effect of Stefan flow on the drag coefficient of spherical particles in a gas flow // *International Journal of Multiphase Flow*. 2019. V. 117. P. 130–137. doi: 10.1016/j.ijmultiphaseflow.2019.04.022
5. Chuchottaworn P., Fujinami A., Asano K. Numerical analysis of the effect of mass injection or suction on drag coefficients of a sphere // *Journal of Chemical Engineering of Japan*. 1983. V. 16 (1). P. 18–24. doi: 10.1252/jcej.16.18
6. Kurose R., Makino H., Komori S. et al. Effects of outflow from the surface of a sphere on drag, shear lift, and scalar diffusion // *The Physics of Fluids*. 2003. V. 15 (8). P. 2338–2351. doi: 10.1063/1.1591770
7. Watanabe M., Yahagi J. Effects of nonuniform outflow and buoyancy on drag coefficient acting on a spherical particle // *Journal of Flow Control, Measurement & Visualization*. 2017. V. 5 (4). P. 99–110. doi: 10.4236/jfcmv.2017.54008

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 затуленных тел с сильным распределенным вдувом // Известия АН СССР. Механика жидкости и газа. 1978. № 3. С. 84–95.
10. 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
11. Архипов В.А., Басалаев С.А., Гольдин В.Д., Перфильева К.Г., Усанина А.С. Метод исследования влияния вдува газа с поверхности твердой сферы на коэффициент сопротивления // Оптика атмосферы и океана. 2022. Т. 35, № 6. С. 510–514. doi: 10.15372/AOO20220613
12. Архипов В.А., Басалаев С.А., Перфильева К.Г., Поленчук С.Н., Усанина А.С. Способ определения коэффициента аэродинамического сопротивления твердой сферы при вдуве газа с ее поверхности: заявка на патент РФ № 2022122234 от 16.08.2022. G01N 15/10.
13. Нигматулин Р.И. Динамика многофазных сред. М. : Наука, 1987. Ч. 1. 464 с.
14. Wilcox D.C. Turbulence modeling for CFD. California : DCW Industries, Inc., 1993. 460 p.
15. Menter F.R., Kuntz M., Langtry R. Ten years of industrial experience with the SST turbulence model // Proceedings of the 4th International Symposium on Turbulence, Heat and Mass Transfer. 2003. P. 625–632.
16. Venkatakrishnan V. On the accuracy of limiters and convergence to steady-state solutions // AIAA. 1993. Paper 93–0880. P. 1–11. doi: 10.2514/6.1993-880
17. Toro E.F. Riemann solvers and numerical methods for fluid dynamics. 3rd ed. London ; New York : Springer-Verlag, 2009. 748 p.

References

1. Gorokhov M.M., Rusyak I.G., Tenenev V.A. (1996) Numerical investigation of the flow past axisymmetric bodies with surface injection. *Fluid Dynamics*. 31(4). pp. 614–617. doi: 10.1007/BF02031770
2. Dukowicz J.K. (1982) An exact solution for the drag of a sphere in low Reynolds number flow with strong uniform suction or blowing. *Physics of Fluids*. 25(7). pp. 1117–1118. doi: 10.1063/1.863875
3. Dukowicz J.K. (1984) Drag of evaporating or condensing droplets in low Reynolds number flow. *The Physics of Fluids*. 27(6). pp. 1351–1358. doi: 10.1063/1.864776
4. Jayawickrama T.R., Haugen N.E.L., Babler M.U., Chishty M.A., Umeki K. (2019) The effect of Stefan flow on the drag coefficient of spherical particles in a gas flow. *International Journal of Multiphase Flow*. 117. pp. 130–137. doi: 10.1016/j.ijmultiphaseflow.2019.04.022
5. Chuchottaworn P., Fujinami A., Asano K. (1983) Numerical analysis of the effect of mass injection or suction on drag coefficients of a sphere. *Journal of Chemical Engineering of Japan*. 16(1). pp. 18–24. doi: 10.1252/jcej.16.18
6. Kurose R., Makino H., Komori S., Nakamuro M., Akamatsu F., Katsuki M. (2003) Effects of outflow from the surface of a sphere on drag, shear lift, and scalar diffusion. *Physics of Fluids*. 15(8). pp. 2338–2351. doi: 10.1063/1.1591770
7. Watanabe M., Yahagi J. (2017) Effects of nonuniform outflow and buoyancy on drag coefficient acting on a spherical particle. *Journal of Flow Control, Measurement & Visualization*. 5(4). pp. 99–110. doi: 10.4236/jfcmv.2017.54008
8. Nikolsky Yu.V., Khlopkov Yu.I. (1989) Teoreticheskoe i eksperimental'noe issledovanie sfery sverkhzvukovym potokom maloy plotnosti s uchetom kondensatsii i ispareniiya s poverkhnosti [Theoretical and experimental study of a low-density supersonic flow around a sphere

- taking into account condensation and evaporation from the surface]. *Uchenye zapiski TSAGI – TsAGI Science Journal*. 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. doi: 10.1007/s10891-016-1426-4
 10. Arkhipov V.A., Basalev S.A., Perfilieva K.G., Polenчук S.N., Usanina A.S. (2022) Metody opredeleniya koeffitsienta soprotivleniya pri vduve gaza s poverkhnosti sfericheskoy chastitsy [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
 11. Arkhipov V.A., Basalev S.A., Gol'din V.D., Perfilieva K.G., Usanina A.S. (2022) Metod issledovaniya vduva gaza s poverkhnosti tverdogo sfery na koeffitsient soprotivleniya [A method for studying the effect of gas injection from the surface of a solid sphere on the drag coefficient]. *Optika atmosfery i okeana*. 35(6). pp. 510–514. doi: 10.15372/AOO20220613
 12. Arkhipov V.A., Basalev S.A., Perfilieva K.G., Polenчук S.N., Usanina A.S. *Sposob opredeleniya koeffitsienta aerodinamicheskogo soprotivleniya tvyordoy sfery pri vduve gaza s eyo poverkhnosti* [A method for determining the drag coefficient of a solid sphere at gas injection from its surface]. Zayavka na patent RF № 2022122234.
 13. Nigmatulin R.I. (1990) *Dynamics of Multiphase Medium. Volume 1*. New York: Hemisphere Publishing Corporation.
 14. Wilcox D.C. (1993) *Turbulence Modeling for CFD*. California: DCW Industries, Inc.
 15. Menter F.R., Kuntz M., Langtry R. (2003) Ten years of industrial experience with the SST turbulence model. *Proceedings of the 4th International Symposium on Turbulence, Heat and Mass Transfer*. pp. 625–632.
 16. Venkatakrishnan V. (1993) On the accuracy of limiters and convergence to steady-state solutions. *AIAA*. Article 93–0880. pp. 1–11. doi: 10.2514/6.1993-880
 17. Toro E.F. (2009) *Riemann Solvers and Numerical Methods for Fluid Dynamics*. London–New York: Springer–Verlag.

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

Костюшин Кирилл Владимирович – младший научный сотрудник Научно-исследовательского института прикладной математики и механики Томского государственного университета, Томск, Россия. E-mail: kostushink@niipmm.tsu.ru

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

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

Information about the authors:

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

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

Kostyushin Kirill V. (Research Institute of Applied Mathematics and Mechanics of Tomsk State University, Tomsk, Russian Federation). E-mail: kostushink@niipmm.tsu.ru

Perfil'eva Kseniya G. (Candidate of Physics and Mathematics, Research Institute of Applied Mathematics and Mechanics of Tomsk State University, Tomsk, Russian Federation). E-mail: k.g.perfiljeva@yandex.ru

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

Статья поступила в редакцию 24.11.2022; принята к публикации 03.02.2023

The article was submitted 24.11.2022; accepted for publication 03.02.2023