

УДК 532.582.33, 533.6.011.12

Численное моделирование свободного падения твёрдого шара в воду

Константинов С.Г.

Московский авиационный институт (национальный исследовательский университет), МАИ, Волоколамское шоссе, 4, Москва, А-80, ГСП-3, 125993, Россия
e-mail: slk.konstantinov@gmail.com

Аннотация

Представлены результаты численного 3D-моделирования свободного падения твёрдого шара в воду с последующим погружением. Расчётным путём определены аэрогидродинамические характеристики шара, траектория и скорость погружения. Получены картины распределения суммарной скорости в расчётной области, а также показана визуализация процесса формообразования каверны в воде по мере погружения шара с гидрофобными свойствами. Проведено сравнение результатов численного моделирования погружения шара в воде с экспериментальными данными. Реализованный метод может применяться для определения динамических характеристик гидросамолётов и вертолётных способных приводиться и осуществлять перемещение по поверхности воды.

Ключевые слова: аэрогидродинамические характеристики шара; численное моделирование; метод RANS; модель VOF; модель 6DOF.

Траектория движения твердого тела существенно зависит от его аэрогидродинамических характеристик. Поэтому важной задачей является определение аэрогидродинамических сил и моментов, действующих на тело, в зависимости от его пространственного положения и свойств окружающей среды. Для определения динамических характеристик свободно падающего и погружающегося в воде твёрдого тела в этой связи весьма актуальным становится применение современных расчётных методов, позволяющих учитывать сложную физическую картину обтекания тела в вязком турбулентном потоке жидкости и сжимаемого газа.

Методы вычислительной гидродинамики (*Computational fluid dynamics* – CFD) [6, 7, 16], построенные на решении полных уравнений Навье-Стокса, позволяют моделировать динамику потоков жидкостей и газов с учетом влияния вязкости, сжимаемости и отрывных явлений [3, 5]. Поэтому для определения аэрогидродинамических характеристик свободно падающего шара в воду, а также определения траектории падения и погружения были проведены расчёты с применением метода CFD, реализованного в программе ANSYS FLUENT [9].

Тестирование моделей турбулентности RANS при обтекании шара в воздушной среде

Основной проблемой при использовании методов CFD, является моделирование турбулентных течений. До настоящего времени не разработаны универсальные модели турбулентности, способные учитывать все масштабы турбулентности. Поэтому с точки зрения затрат вычислительных ресурсов на

проведение расчётов наиболее широко используются осредненные по Рейнольдсу уравнения Навье-Стокса (Reynolds averaged Navier-Stokes equations – RANS), замкнутые с помощью той или иной модели турбулентности. При таком подходе точность численного эксперимента во многом зависят от правильного выбора модели турбулентности.

Для оценки достоверности RANS метода были проведены расчёты аэродинамических характеристик шара с применением моделей турбулентности Spalart-Allmaras [17], k- ω SST [15] и k- ϵ Realizable [19] и сравнение с экспериментальными данными [2].

Расчёты проводились для шара с радиусом $R = 0,0127$ м, чисел $Re = \frac{L \cdot V \cdot \rho_{возд}}{\mu_{возд}} = 1 \times 10^2; 1 \times 10^3; 1 \times 10^4$ соответствующих скорости набегающего потока $V = 0,058$ м/с; $0,585$ м/с; $5,849$ м/с.

Где $L = 2R = 0,0254$ характерный линейный размер, м.

V - скорость набегающего потока, м/с;

$\rho_{возд} = 1,225$ - плотность воздуха, кг/м³;

$\mu_{возд} = 1,82E - 05$ - динамическая вязкость воздуха при температуре воздуха 20⁰С, Нс/м²;

Коэффициент силы сопротивления шара определялся по формуле:

$$C_x = F_x / \left(\frac{\rho_{возд} V^2}{2} S_m \right);$$

где $S_m = \pi R^2$ - площадь миделя шара, м²;

F_x - аэродинамическая сила сопротивления шара, Н.

Расчётные сетки создавались с помощью программы ANSYS ICEM CFD. Расчётная область имела цилиндрическую форму (рис. 1). Боковая граница расчётной области располагалась от шара на расстоянии $45R$, входная граница на $40R$, выходная граница на $150R$. Расчётная сетка, содержала около двух миллионов ячеек из тетраэдров и призм. Для достоверного определения аэродинамических характеристик шара расчётная сетка строилась со сгущением по количеству ячеек вблизи шара (рис. 2).

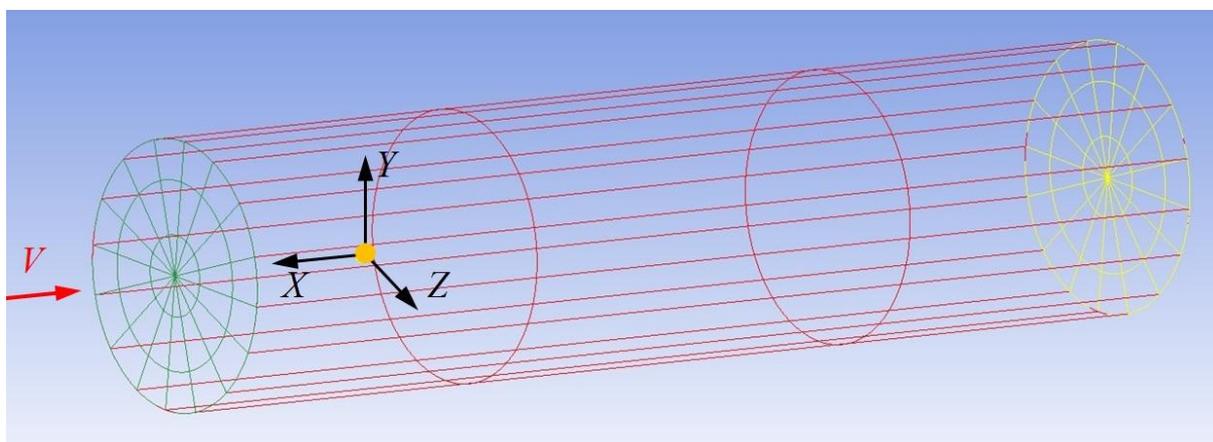


Рис. 1. Расчётная область и принятая система координат

Для учёта пристеночных течений на поверхности шара создавался призматический слой, состоящий из двенадцати призматических ячеек. Призматический слой сетки строился таким образом, чтобы первый узел призматической ячейки находился в вязком подслое ($Y^+ \leq 1$) [8].

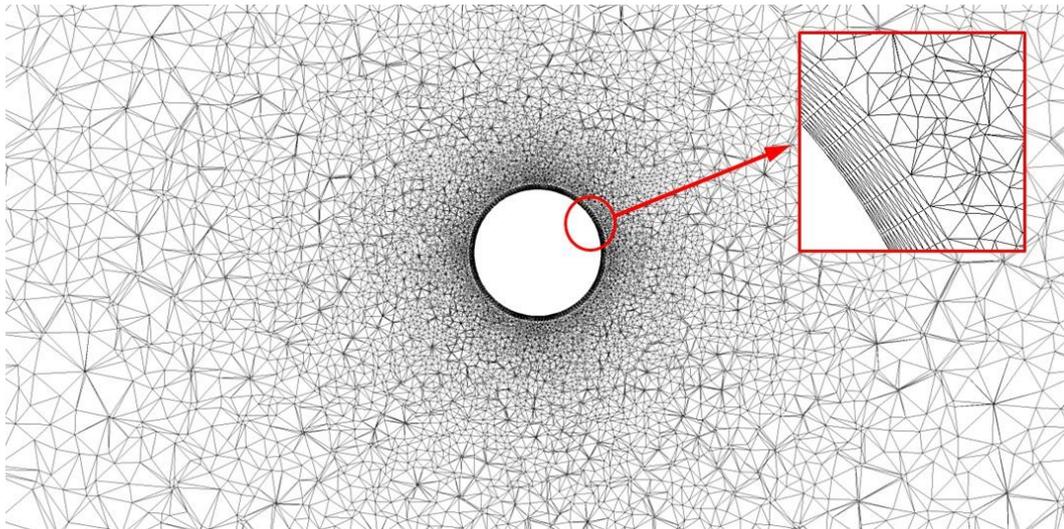


Рис. 2. Структура сетки в продольном сечении расчётной области

Параметры начальной турбулентности выбирались исходя из условий средней интенсивности развитого турбулентного потока. Значение относительной турбулентной вязкости принималось равным $\frac{\mu_t}{\mu} = 3$.

На рис. 3 представлены результаты расчётов по трём моделям турбулентности Spalart-Allmaras, k- ω SST, k- ϵ Realizable и их сравнение с экспериментом [2]. Видно, что результаты расчётов по моделям k- ω SST и Spalart-Allmaras наиболее близки к экспериментальным данным. Поэтому в дальнейших расчётах будет использоваться двухпараметрическая модель турбулентности k- ω SST.

На рис. 4 показана картина распределения коэффициента давления в окрестности шара в продольном сечении расчётной области. На рисунках хорошо видны области, соответствующие полному торможению потока ($C_p = 0$), области, где реализуется максимальное разрежение, а также области перепада давления, образовавшиеся вследствие срыва потока.

На рис. 5 показана картина линий тока в продольном сечении расчётной области. На рис. 6 показана визуализация поля единичных векторов скорости в продольном сечении расчётной области и экспериментальная картина обтекания шара [1]. Представленные результаты наглядно подтверждают срывной характер обтекания шара, отмеченный в эксперименте. На рисунках хорошо наблюдаются границы и форма отрывной области, масштаб которой сопоставим с размером шара. Также видны области отрывных вихревых структур, приводящих к образованию дорожки Кармана в спутном следе шара.

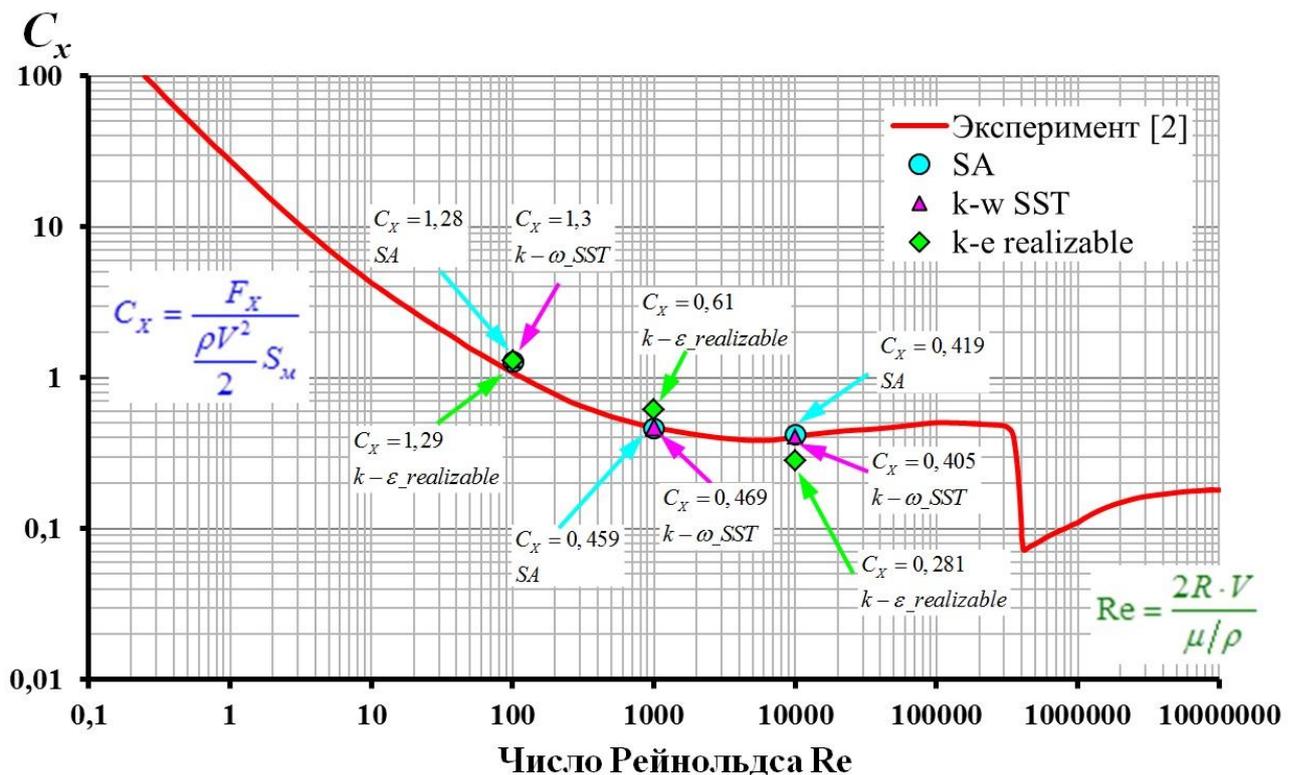


Рис. 3. Зависимость коэффициента сопротивления шара от числа Рейнольдса

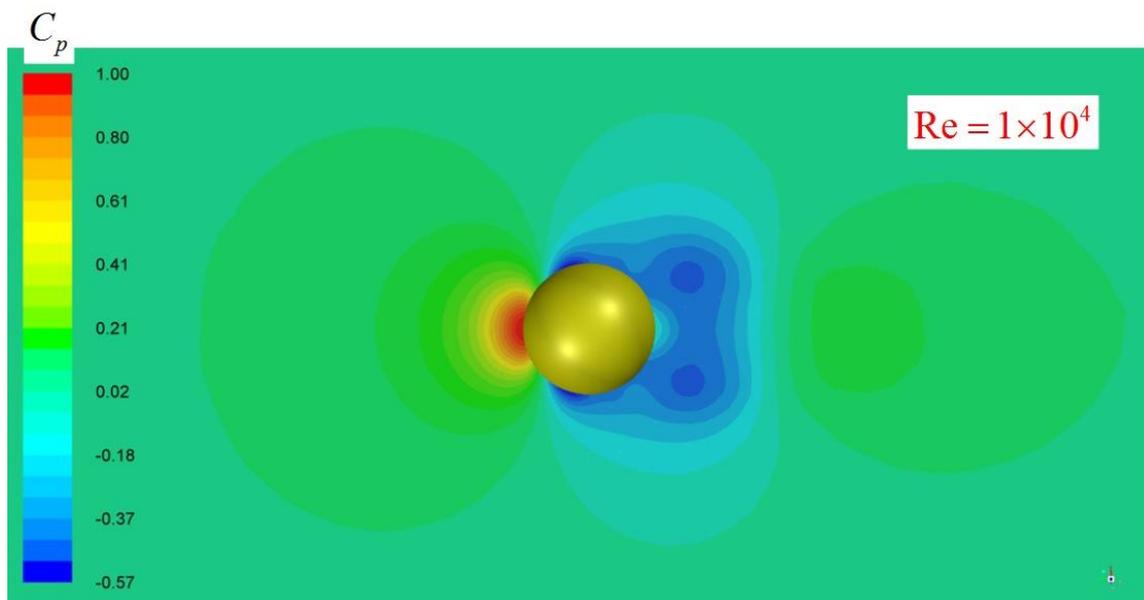


Рис. 4 Картина распределения коэффициента давления в окрестности шара в продольном сечении расчётной области

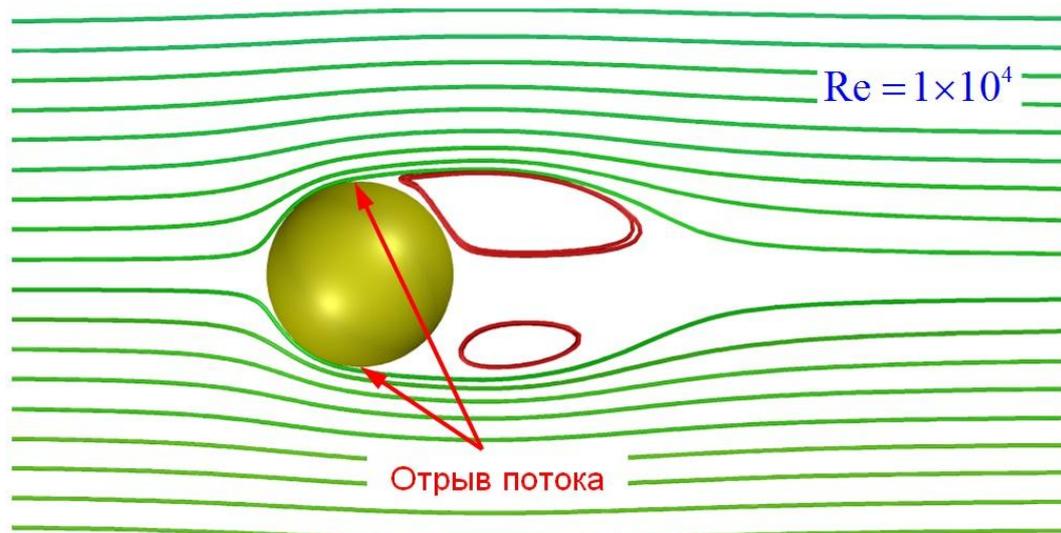


Рис. 5 Линии тока в продольном сечении расчётной области

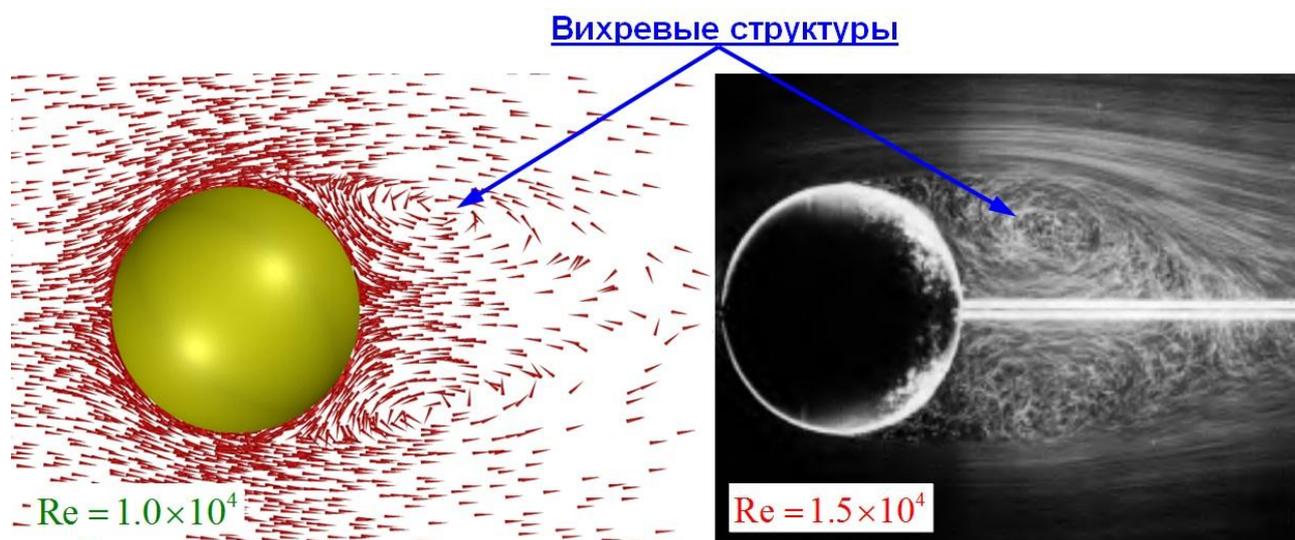


Рис. 6 Поле единичных векторов скорости в продольном сечении расчётной области и экспериментальная картина обтекания шара [1]

Численное моделирование свободного падения твёрдого шара в воду

Исследование падения твёрдого тела в воду является актуальной задачей гидродинамики. В силу сложности физических процессов, происходящих в момент взаимодействия падающих твёрдых тел с водной поверхностью, изначально проводились экспериментальные работы, направленные на исследование влияния скорости входа тела в воду [14], угла входа [11] и шероховатости поверхности тела [12] на динамические характеристики тела. Также экспериментальные исследования проводились с целью изучения формообразования каверны, образующейся в процессе погружения тел с гидрофобными свойствами [18]. В результате таких исследований были получены важные данные, которые используются сегодня при решении задач гидродинамики в различных областях.

Численное моделирование течений с поверхностями раздела двух или более сред относится к одному из наиболее сложных классов задач вычислительной гидродинамики, решению которых было посвящено ряд отечественных и зарубежных работ [4, 20]. Для задач, связанных с моделированием свободной поверхности, ввиду того, что плотность фаз, например, жидкости и воздуха, на порядки различаются друг от друга, предполагается, что на движение жидкости газ не оказывает большого влияния и ограничиваются предположением о том, что взаимодействующие фазы не смешиваются. В программе ANSYS FLUENT моделирование таких течений осуществляется с помощью специализированной модели Volume of fluid – VOF, основанной на выделении объемной доли вещества в объеме расчётной ячейки [9].

Помимо моделирования свободной поверхности необходимо производить учёт динамических характеристик твёрдого тела. В программе ANSYS FLUENT это выполняется с помощью модели шести степеней свободы (Six degree of freedom – 6DOF) [9]. Модель 6DOF использует заданную пользователем функцию (User define functions – UDF), определяющую массовые и инерционные характеристики тела. В процессе численного моделирования модель 6DOF и ее функция UDF, подсоединяются к расчетному модулю путем подготовки и загрузки динамической библиотеки (dll) с помощью внешнего компилятора (MS Visual C++).

Основное свойство 6DOF модели заключается в использовании уравнения, описывающего перемещение и движение центра масс в инерционной системе координат. Для расчета перемещения и углового вращения относительно центра силы тяжести используются значения внешних сил и моментов от

аэрогидродинамических и гравитационных сил, приложенных к телу. Аэрогидродинамические силы вычисляются численным интегрированием давления и напряжений на поверхности тела.

Для оценки достоверности используемого RANS метода с моделью турбулентности $k-\omega$ SST применительно к задачам падения твёрдых тел в воду с последующим погружением было проведено численное моделирование свободного падения шара в воду и сравнение результатов расчёта с экспериментом [18].

Численное моделирование свободного падения шара в воду проводилось для шара с плотностью $\rho_{ш} = 3900 \text{ кг/м}^3$, радиуса $R = 0,0127 \text{ м}$ и высоты падения $H = 0,6 \text{ м}$.

Поверхность шарика обладала гидрофобными свойствами, значение краевого угла смачивания $\Theta = 118^\circ$, с шероховатостью поверхности $h = 2.42 \text{ мкм}$.

В расчётах использовалась подвижная динамически перестраиваемая сетка (рис. 7), обладающая той же структурой, формой и геометрическими размерами, которая использовалась в расчётах, проведенных для оценки достоверности применяемого метода и выбора расчётной модели турбулентности при обтекании шара в воздушной среде.

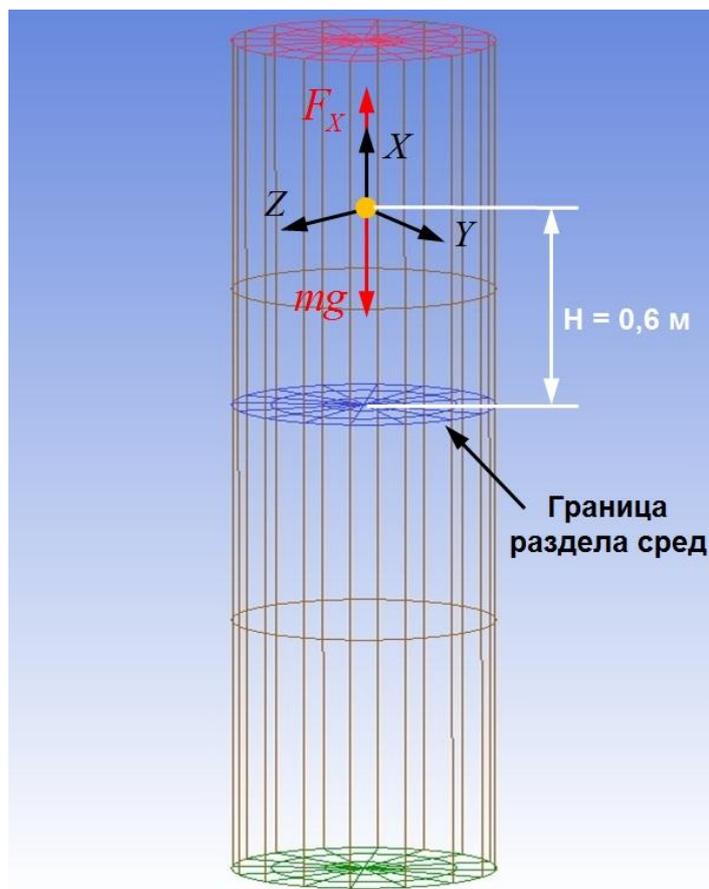


Рис. 7. Расчётная область и принятая система координат

На рис. 8 представлены картины полей суммарной скорости в продольном сечении расчётной области. Здесь максимум скорости соответствует красному цвету, а синему - минимум скорости $V = 0 \text{ м/с}$. Видно, что по мере роста скорости падения шара за ним происходит образование и развитие цепочки регулярных вихревых областей (дорожки Кармана) до момента достижения поверхности воды. При достижении границы раздела сред происходит резкий рост местной скорости, вызванный отсутствием сжимаемости воды. Далее по мере погружения, поле суммарной скорости в спутном следе шара существенным образом зависит от формы каверны и её деформации.

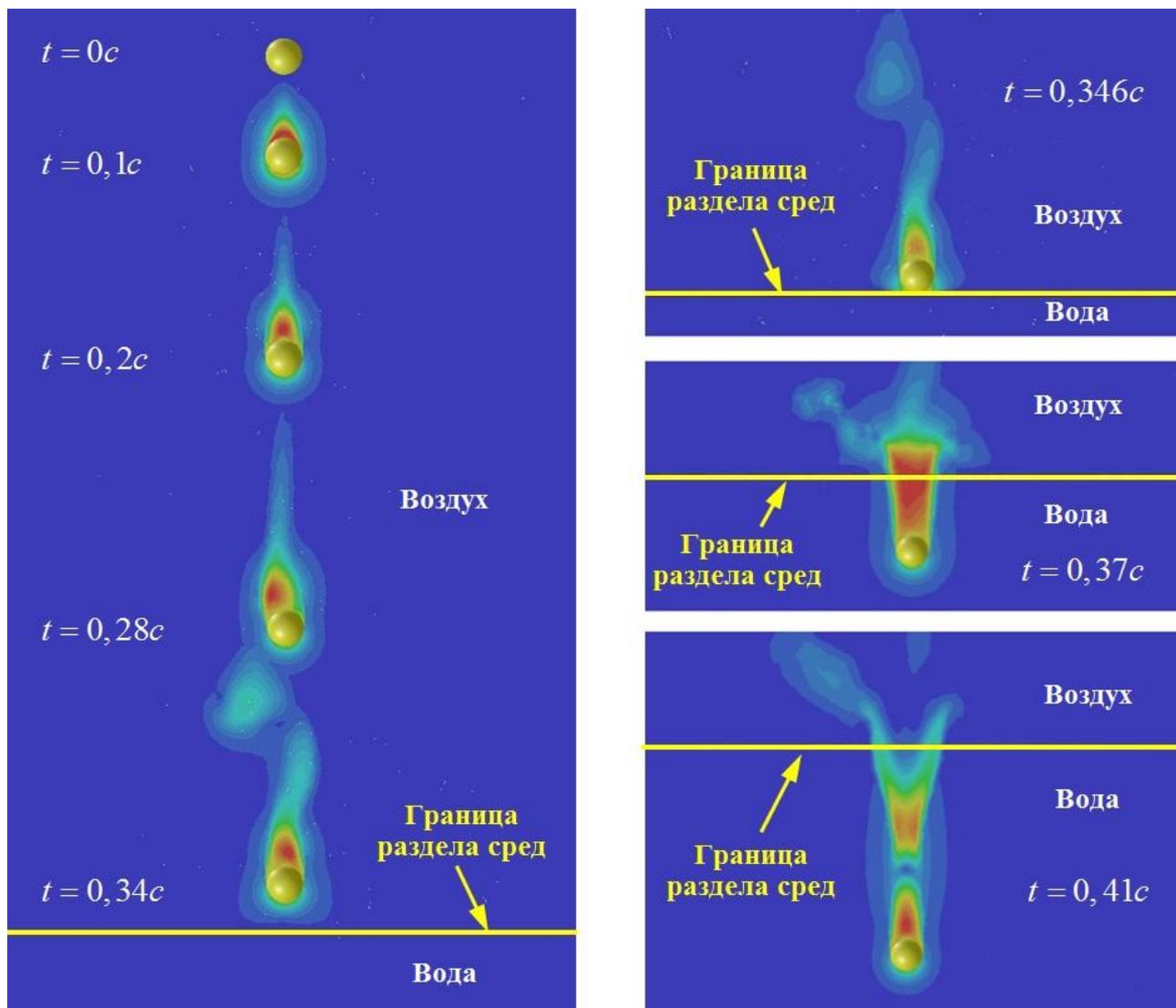


Рис. 8. Контурное распределение суммарной скорости в продольном сечении расчётной области при расчёте траектории перемещения шара в воздушной среде и в воде

На рис. 9 показаны картины погружения шара в воде по результатам эксперимента и расчётов для соответствующих моментов времени. На расчётных картинах красным цветом изображена жидкая фаза, а синим воздушная. Видно, что в момент времени $t = 0,347c$ шарик достигает поверхности воды. В момент времени $t = 0,354c$ происходит полное погружение шара в воде и образование каверны. Также видно, что при достижении значения времени $t = 0,418c$ происходит

разрушение каверны по результатам эксперимента и численного моделирования. Следует отметить, что представленные картины погружения шара демонстрируют хорошее качественное согласование численных и экспериментальных результатов.

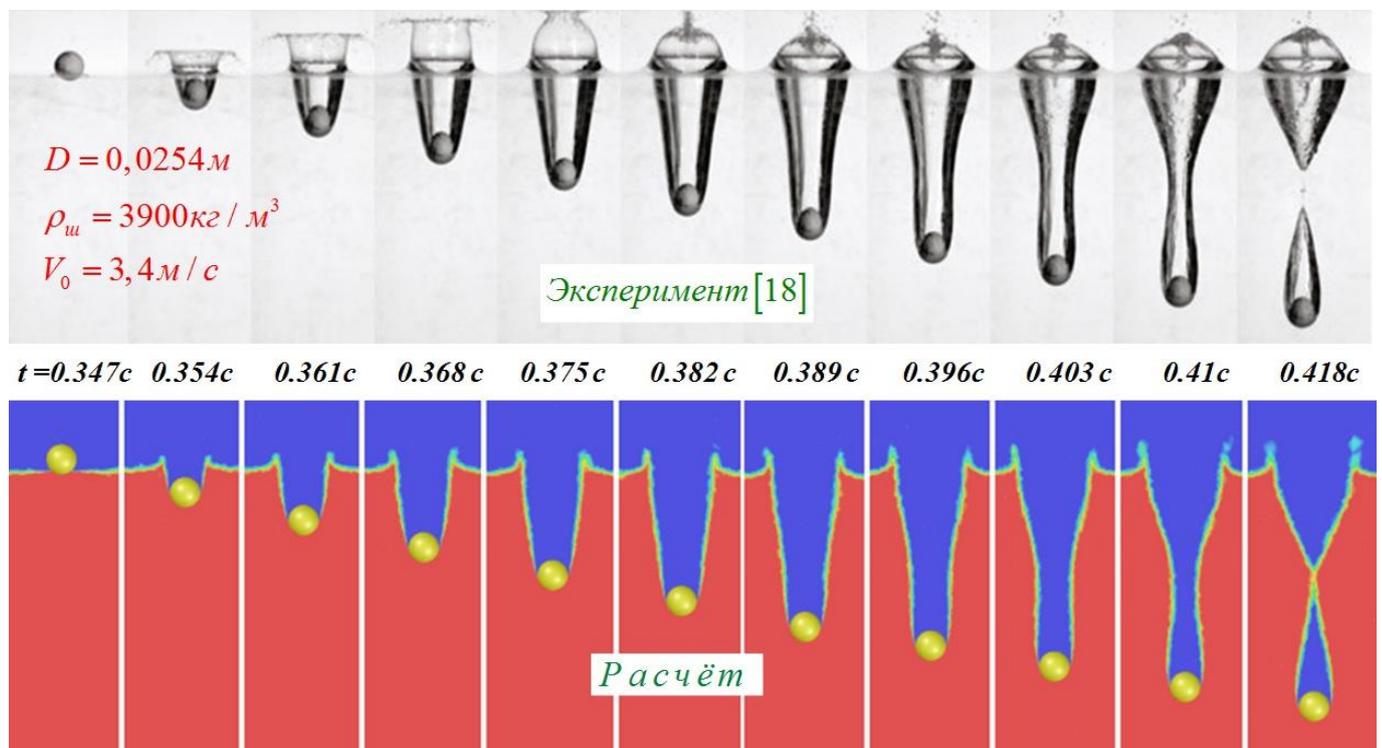


Рис. 9. Сопоставление расчётных и экспериментальных картин погружения шара в воде

На рис. 10 более подробно представлена расчётная визуализация границы раздела двух сред. Видно образование, и изменение формы каверны по мере погружения шара.

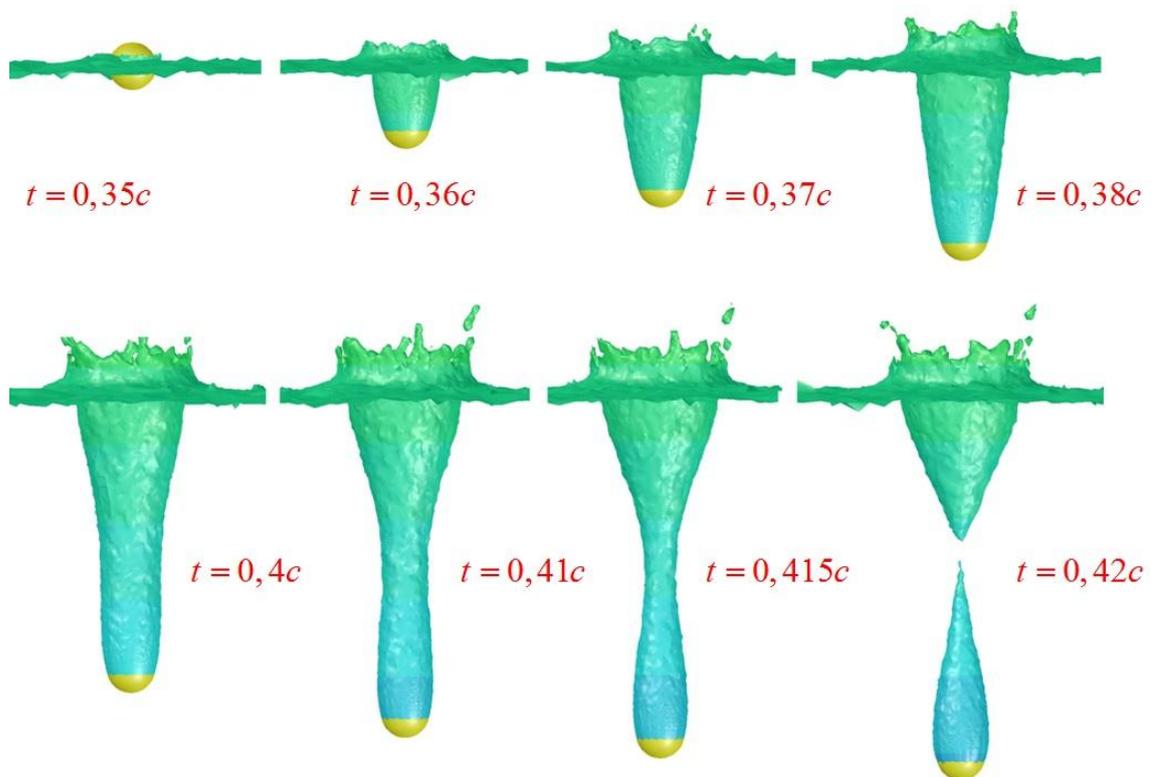


Рис. 10. Расчётная визуализация границы раздела двух сред по мере погружения шара в различные моменты времени

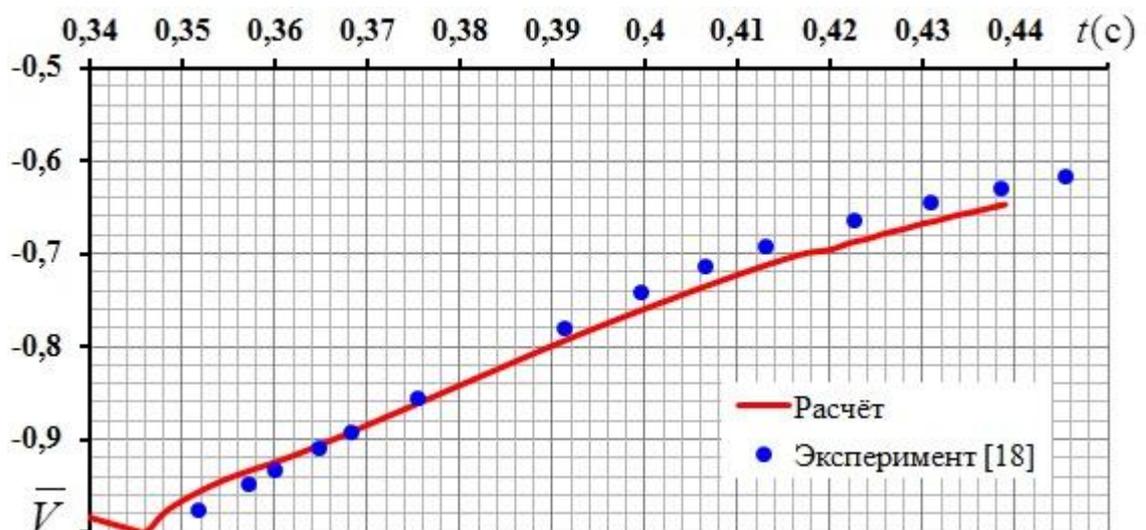


Рис. 11. Изменение относительной скорости погружения шара от времени

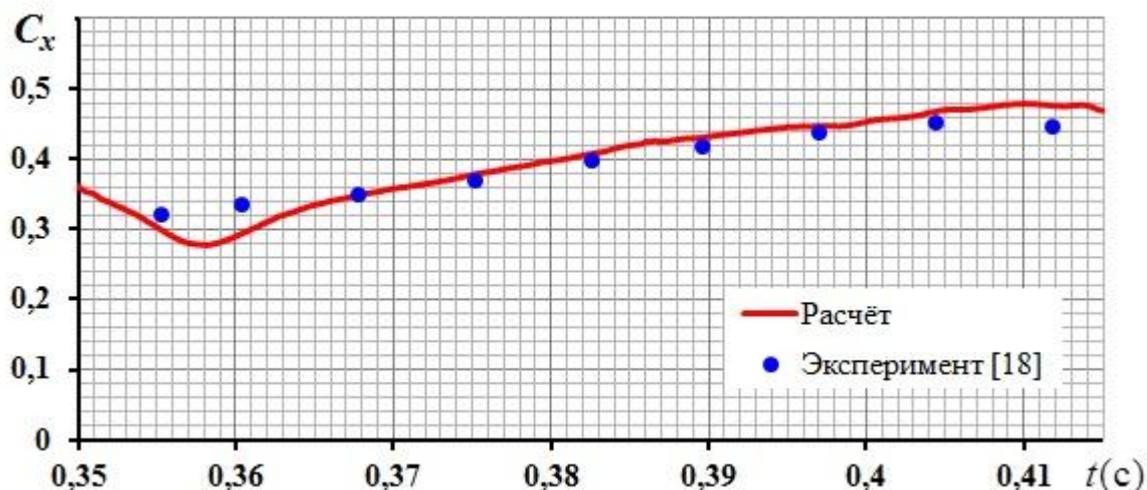


Рис. 12. Изменение коэффициента сопротивления шара от времени при погружении

На рис. 11 показаны зависимости изменения относительной скорости погружения шара от относительного времени. Видно, что наблюдается удовлетворительное совпадение результатов расчёта с экспериментальными данными.

Относительная скорость вычислялась по формуле: $\bar{V} = \frac{V}{V_0}$

где V - локальное значение скорости, м/с;

V_0 - значение скорости шара в момент касания поверхности воды, м/с.

Значение скорости шара в момент касания поверхности воды можно найти из

уравнения:
$$\frac{mV_0^2}{2} = mgH - C_x \frac{\rho_{\text{возд}} V_0^2}{2} S_M H.$$

Тогда:
$$V_0 = \sqrt{\frac{2mgH}{m + \rho_{\text{возд}} C_x S_M H}} = 3,4 \text{ м/с}$$

где $m = \rho_w \frac{4}{3} \pi R^3$ - масса шара, кг;

$g = 9,81$ - ускорение свободного падения, м/с²;

$C_x \approx 0,4$ - коэффициент сопротивления шара, в диапазоне чисел Рейнольдса $Re = 0,5 \times 10^3 \dots 1 \times 10^4$.

Время падения можно найти из уравнения: $\frac{mV}{t} = mg - C_x \frac{\rho_{\text{возд}} V^2}{2} S_m$.

$$\text{Тогда } t = \frac{mV}{(mg - C_x \frac{\rho_{\text{возд}} V^2}{2} S_m)} = 0,347c.$$

На рис. 12 показаны графики изменения коэффициента сопротивления шара от времени. Видно, что в момент времени, когда значительно деформируется форма каверны $t \approx 0,41c$, сопротивление шара достигает своего максимального значения. Результаты расчётов показали, что после разрушения каверны возникают пульсации коэффициента сопротивления с последующим затуханием по мере погружения. Данный эффект, возможно, вызван нестационарными процессами обтекания, вследствие срыва потока и последовательного разрушения воздушного пузыря на поверхности шара, образовавшегося после разрушения каверны рис. 13.

Представленные результаты расчётов аэрогидродинамических характеристик шара и численного моделирования погружения шара в воде демонстрируют удовлетворительное совпадение с экспериментальными данными, что свидетельствует о достоверности физико-математической модели применяемого метода. Реализованный метод может использоваться в авиастроительной отрасли для решения задач, связанных с вопросами определения динамических характеристик гидросамолётов и вертолётных способных приводиться и

осуществлять перемещение по поверхности воды с учётом влияния набегающего воздушного потока, течений и волнения свободной поверхности.

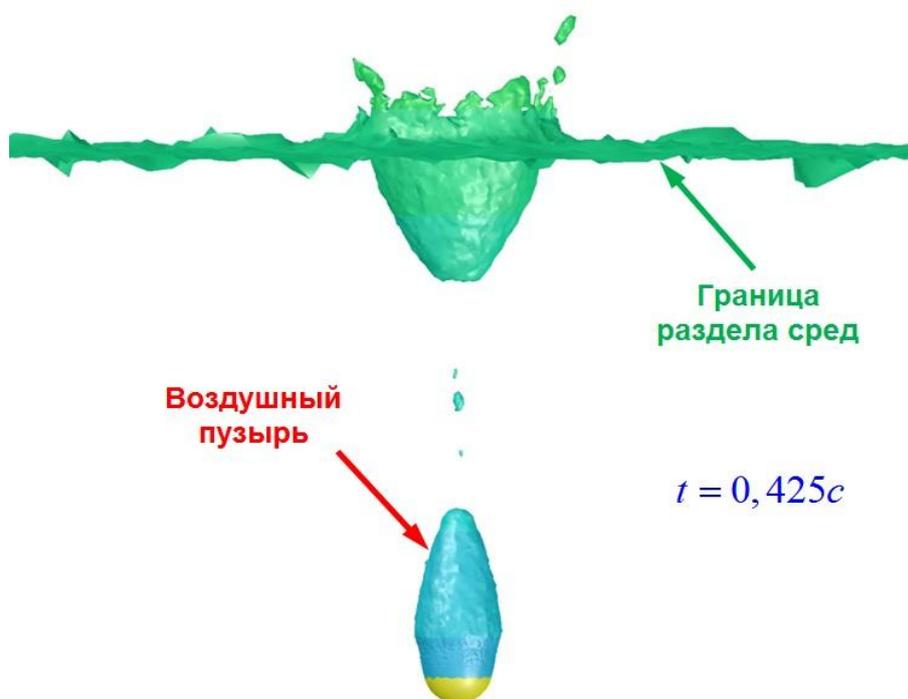


Рис. 13. Пример визуализации воздушного пузыря на поверхности шара образовавшегося после разрушения каверны

Заключение

1. Решена задача о свободном падении твёрдого шара из воздушной среды в воду с последующим погружением. С применением численного метода RANS и модели турбулентности $k-\omega$ SST определены аэрогидродинамические характеристики шара, а также траектория падения и погружения.

2. Информативность используемого расчётного метода, а также возможность определения не только суммарных, но и распределённых характеристик по

поверхности исследуемого тела позволяет выявить зоны неблагоприятного обтекания и срыва потока. Наличие такой информации может успешно применяться в задачах, связанных с оптимизацией аэрогидродинамической формы исследуемого объекта, а также позволит оценить действующие на него аэрогидродинамические нагрузки.

3. Сравнительное тестирование моделей турбулентности Spalart-Allmaras, $k-\omega$ SST и $k-\epsilon$ Realizable на основе расчёта аэродинамических характеристик шара при обтекании в воздушной среде в широком диапазоне чисел Рейнольдса $Re = 1 \times 10^2 \dots 1 \times 10^4$ показало, что наиболее близкими к экспериментальным данным являются результаты расчётов, полученные по моделям турбулентности Spalart-Allmaras и $k-\omega$ SST.

4. Анализ визуализации свободного падения шара ($D = 0,0254$ м) с высоты $H=0,6$ м показал, что обтекание шара сопровождается отрывом потока.

5. Анализ визуализации погружения шара ($D = 0,0254$ м) обладающего гидрофобными свойствами и начальной скоростью $V_0 = 3,4$ м/с показал, что погружение шара происходит с образованием каверны. Максимальное значение коэффициента сопротивления шара достигается в момент времени, когда значительно деформируется форма каверны $t \approx 0,41$ с.

6. Результаты расчётов аэрогидродинамических характеристик шара и численного моделирования погружения шара в воде демонстрируют удовлетворительное совпадение с экспериментальными данными, что свидетельствует о достоверности физико-математической модели применяемого

метода. Реализованный метод может использоваться в авиастроительной отрасли для решения задач, связанных с вопросами определения динамических характеристик гидросамолётов и вертолётных способных приводиться и осуществлять перемещение по поверхности воды с учётом влияния набегающего воздушного потока, течений и волнения свободной поверхности.

Библиографический список

1. Ван-Дайк М. Альбом течений жидкости и газа. - М.: Мир, 1986. - 184 с.
2. Девнин С.И. Аэрогидромеханика плохообтекаемых конструкций: справочник. – Л.: Судостроение, 1983. - 332 с.
3. Игнаткин Ю.М., Константинов С.Г. Исследование аэродинамических характеристик несущего винта вертолётного метода CFD // Труды МАИ. 2012. № 57.
URL: <http://trudymai.ru/published.php?ID=30875>
4. Козелков А.С. и др. Минимальный базис задач валидации методов расчёта течений со свободной поверхностью // Труды Нижегородского государственного технического университета имени Р.Е. Алексеева. 2015. №2 (109). С. 49 – 69.
5. Ле Куок Динь, Семенчиков Н.В., Яковлевский О.В., Чан Куанг Дык. Численное исследование влияния движителей на аэродинамические характеристики дирижабля // Труды МАИ. 2012. № 52. URL: <http://trudymai.ru/published.php?ID=29590>
6. Флетчер К. Вычислительные методы в динамике жидкостей. Т. 1. - М.: Мир, 1991. - 504 с.

7. Фрик П.Г. Турбулентность: модели и подходы. Часть 1. – Пермь: ПГТУ, 1998. - 108 с.
8. Шлихтинг Г. Теория пограничного слоя. - М.: Наука, 1974. - 712 с.
9. ANSYS FLUENT 6.3. Theory Manual. 2005. Fluent Inc. Central Source Park, 10 Cavendish Court, Lebanon, NH 03766, USA, available at: <http://www.fluent.com>
10. Aristoff J.M., & Bush J. W.M. Water entry of small hydrophobic spheres // Journal of Fluid Mechanics, 2009, vol. 619, pp. 45 - 78.
11. Asfar K. and Moore S. Rigid-body water impact at shallow angles of incidence // Proceedings of the international offshore mechanics and arctic engineering symposium, ASME, Virginia Polytechnic Inst. State Univ., Blacksburg, VA, USA, 1987, vol. 2, pp. 105 – 112.
12. Duez C., Ybert C., Clanet C., & Bocquet L. Making a splash with water repellency // Nature Physics, 2007, no. 3, pp. 180 – 183.
13. Ferziger J.H., Peric M. Computational methods for fluid dynamics, Springer-Verlag, Berlin, 1996, 356 p.
14. May A. & Hoover W.R. A study of the water-entry cavity. Unclassified NOLTR 63 – 264, United States Naval Ordnance Laboratory, White Oak, Maryland, USA, 1963.
15. Menter F.R. Zonal two equation turbulence models for aerodynamic flows // 24th Fluid Dynamics Conference, July 6-9, 1993, Orlando, Florida, available at: [https://cfд.spbstu.ru/agarbaruk/doc/1993_Menter_Zonal%20Two%20Equation%20k-w%20Turbulence%20Models%20for%20Aerodynamic%20Flows\(2\).pdf](https://cfд.spbstu.ru/agarbaruk/doc/1993_Menter_Zonal%20Two%20Equation%20k-w%20Turbulence%20Models%20for%20Aerodynamic%20Flows(2).pdf)

16. Salvi R. Navier-Stokes equations theory and numerical methods, Marcel Dekker, Inc., 2002, vol. 223, 308 p.
17. Spalart P.R., Allmaras S.R. A One-equation turbulence model for aerodynamics // Conference Reno, Nevada, USA, 1999, pp. 92–439.
18. Tadd T. Truscott, Brenden P. Epps, Alexandra H. Techet. Unsteady forces on spheres during free-surface water entry // Journal of Fluid Mechanics, Cambridge University Press, 2012, vol. 704, pp. 173 – 210.
19. Wilcox D.C. Turbulence modeling for CFD, California, DCW Industries, Inc., 1994, 460 p.
20. Sun Zhao, CaoWei, and Wang Cong. Numerical Investigation of Water Entry of Half Hydrophilic and Half Hydrophobic Spheres // Mathematical Problems in Engineering, volume 2016, Article ID 5265818, available at: <http://dx.doi.org/10.1155/2016/5265818>