

кин // Вестник Самарского гос. аэрокосмического ун-та. – 2016. – Т. 15, № 2.- С. 114-121.

9.  $\text{BaSi}_2$  – перспективный материал для фотоэлектрических преобразователей / В.Л. Дубов, Д.В. Фомин // Успехи прикладной физики. – 2016. – Т. 4, № 6. – С. 599-605.

10. Взаимосвязь оптических и фотоэлектрических свойств пленок и диодных гетероструктур на основе  $\text{BaSi}_2$  и  $\text{Si}(111)$  / Н.Г. Галкин, Д.Л. Горошко, В.Л. Дубов, Д.В. Фомин, К.Н. Галкин, Е.А. Чусовитин, С.В. Чусовитина // Химическая физика и мезоскопия. – 2019. – Т. 4, № 6. – С. 375-385.

11. Handbook of Auger electron spectroscopy: A reference book of standard data for identification and interpretation of Auger electron spectroscopy data // Paul William Palmberg. Physical Electronics Industries, 1972 – P. 160.

12. Лифшиц, В.Г., Луняков, Ю.В., Спектры ХПЭЭ поверхностных фаз на кремнии. – Владивосток: Дальнаука, 2004. – 315 с.

УДК 533.6.011

**Верхотурова Ирина Владимировна**

Амурский государственный университет

г. Благовещенск, Россия,

E-mail: [loy-iver@rambler.ru](mailto:loy-iver@rambler.ru)

**Verkhoturova Irina Vladimirovna**

Amur State University,

Blagoveshchensk, Russia

E-mail: [loy-iver@rambler.ru](mailto:loy-iver@rambler.ru)

## МОДЕЛИРОВАНИЕ ОБТЕКАНИЯ ТЕЛ С ОТРЫВОМ ПОТОКА ЖИДКОСТИ В СРЕДЕ COMSOL MULTIPHYSICS

### SIMULATION OF BODY FLOW WITH A SEPARATED LIQUID FLOW IN A COMSOL MULTIPHYSICS ENVIRONMENT

*Аннотация. В статье представлены результаты применения среды COMSOL Multiphysics для выполнения одной из лабораторных работ модуля «Аэродинамика» дисциплины «Гидрогазоаэродинамика». В среде COMSOL Multiphysics предлагается провести моделирование процесса обтекания ламинарным потоком вязкой несжимаемой жидкости тел различной геометрической формы, что позволяет наглядно визуализировать пограничный слой, его отрыв от поверхности обтекаемого тела.*

*Abstract. The article presents the results of using the COMSOL Multiphysics environment to perform one of the laboratory works of the Aerodynamics module of the Hydrogas and Aerodynamics discipline. In the COMSOL Multiphysics environment, it is proposed to simulate the process of a laminar flow of a viscous incompressible fluid around bodies of various geometric shapes, which allows you to visually visualize the boundary layer, its separation from the surface of the streamlined body.*

*Ключевые слова: модельный эксперимент, лабораторные работы, COMSOL Multiphysics, обтекание тел, ламинарный поток, число Рейнольдса.*

*Key words: model experiment, laboratory work, COMSOL Multiphysics, flow around bodies, laminar flow, Reynolds number.*

DOI: 10.22250/jasu.93.7

В настоящее время компьютерное моделирование как метод исследования различных физических процессов прочно заняло место не только в системе научных исследований, но и в современном лабораторном практикуме. Модельный эксперимент, не являясь альтернативой реальному, с помо-

щью компьютерных реализаций, сопровождающихся какой-либо формой визуализации изучаемого процесса, позволяет лучше понимать физический процесс или явление, делает их наглядными, а также дает возможность изучать процессы, недоступные или трудноразличимые для реальных опытов.

В данной работе представлены результаты применения среды COMSOL Multiphysics, обладающей мощным графическим интерфейсом [1], для выполнения одной из лабораторных работ модуля «Аэродинамика» дисциплины «Гидрогазоаэродинамика». В лабораторной работе предлагается в среде COMSOL Multiphysics провести моделирование процесса обтекания ламинарным потоком вязкой несжимаемой жидкости (воздуха) тел различной геометрической формы (сфера, цилиндр, профиль крыла). Моделирование этого процесса при различных числах Рейнольдса позволяет наглядно визуализировать пограничный слой, зоны его отрыва от поверхности обтекаемого тела, зоны максимальных скоростей в области миделевого сечения, зоны концевых эффектов в случае обтекания цилиндра и профиля [2, 3].

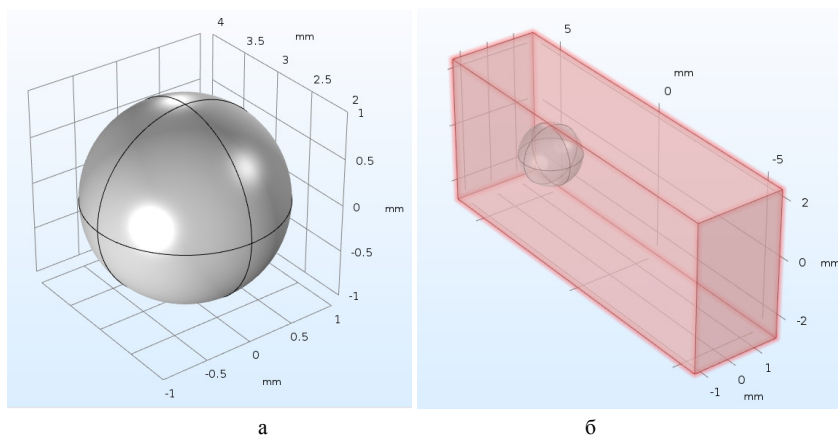
Ниже представлены основные этапы выполнения лабораторной работы по моделированию процесса обтекания ламинарным потоком воздуха твердого тела (на примере металлической сферы).

На первом этапе моделирования выбираются:

размерность пространства модели, в данном случае – 3D;

раздел физики – Fluid Flow, в котором необходимо выбрать однофазный поток Single – Phase Flow и ламинарное течение жидкости Fluid Flow;

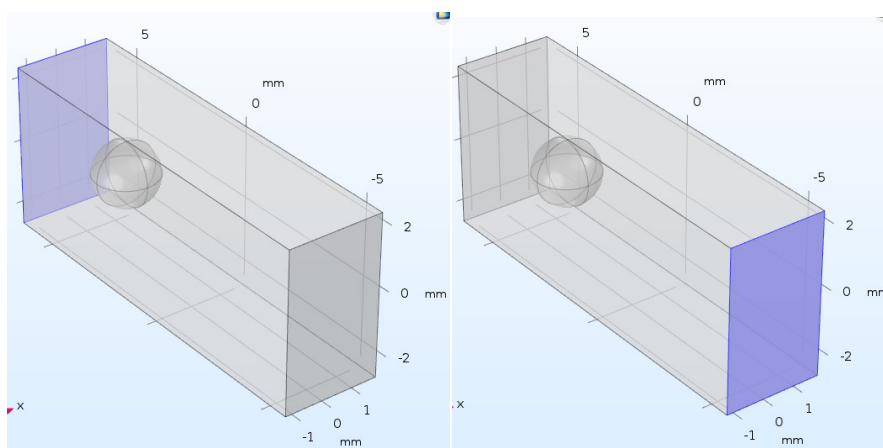
тип исследования – stationary.



Второй этап моделирования – построение геометрии обтекаемого тела с помощью функций раздела «Geometry» (рис. 1, а) и расчетного домена, т.е. области потока воздуха в форме параллелепипеда, внутри которого находится исследуемое тело (рис. 1, б). В разделе «Material» задается материал сферы.

Рис. 1. Обтекаемое тело и расчетный домен.

Третий этап моделирования – задание граничных и начальных условий на расчетном домене.



Одно из граничных условий – стенка параллелепипеда (выделенная темным на рис. 2, а), которая яв-

ляется границей (boundary – inlet) впуска жидкости (воздуха) в параллелепипед с определенной скоростью.

а б

Рис. 2. Граничные условия на расчетном домене.

Второе граничное условие – стенка параллелепипеда (выделенная темным на рис. 2, б), которая является границей (boundary – outlet) выпуска жидкости из параллелепипеда.

Граница выпуска находится параллельно границе впуска жидкости. Значение избыточного давления на границе выпуска жидкости принимается равным нулю. Остальные стенки параллелепипеда, соединяющие впуск и выпуск жидкости, считаются не пропускающими ее. Для этого нормальную составляющую вектора скорости жидкости принимают равной нулю. После задания граничных условий задается начальное условие – температура жидкости. Плотность жидкости и динамическая вязкость заданы в программе в свойствах выбранных материалов.

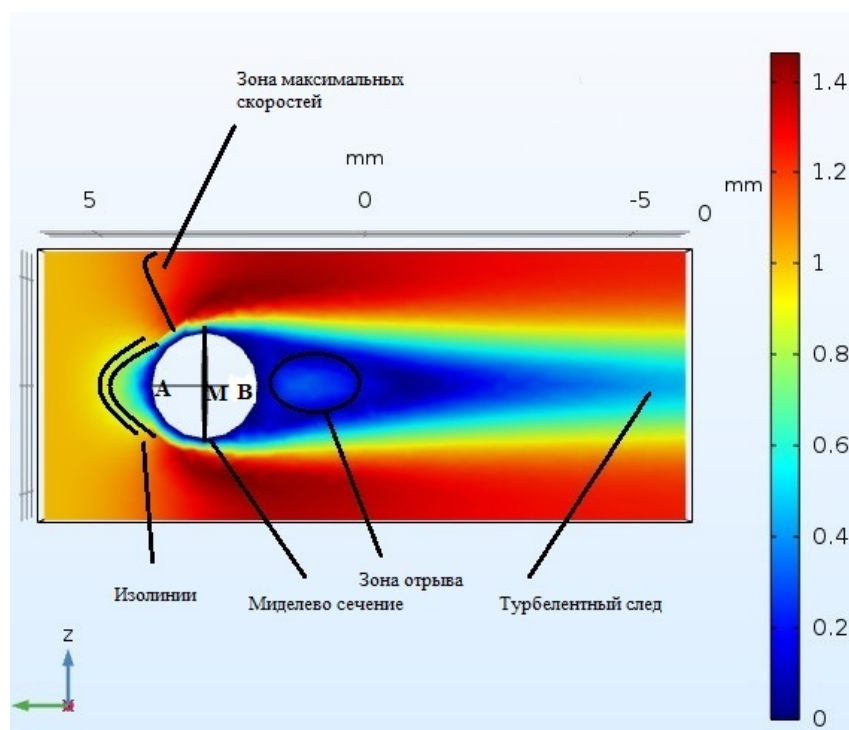
Задача обтекания твердого тела формулируется в рамках модели вязкой несжимаемой ньютоновской жидкости, основываясь на дифференциальных уравнениях в частных производных. Такой процесс описывается нестационарной системой уравнений Навье – Стокса, которые можно представить в тензорной форме следующим образом:

$$\frac{\partial u}{\partial t} + \nabla \cdot uu = \nabla \cdot \nu \nabla (u + (u)^T) - \frac{1}{\rho} \nabla p, \quad (1)$$

$$\nabla \cdot u = 0, \quad (2)$$

где  $p$  – скалярное поле давления;  $u$  – векторное поле скорости;  $uu$  – тензор второго ранга, определенный как внешнее произведение векторов.

Четвертый этап моделирования – задание сетки разбиения образца и расчетного домена и вы-



полнение расчетов. Сетка разбивает элемент (домен) на малые тетраэдры, в каждом из которых производится расчет скорости течения жидкости и давления. Так как материалы у сферы и параллелепипеда различны, то и размер сетки для этих элементов необходимо выбрать разного размера. После построения сетки производится симуляция процесса, результатом чего становится картина распределения скорости в окрестности сферы при обтекании ее ламинарным потоком жидкости (рис. 3).

Рис. 3. Распределение скорости потока при обтекании сферы.

Таким образом, выполняющие лабораторную работу, проделав все этапы моделирования и получив картину распределения скорости (в срезе плоскости YZ) моделируемой области, могут на ней наблюдать: зону торможения потока вблизи передней критической точки А; пограничный слой, прилегающий к поверхности обтекаемого тела; зоны отрыва пограничного слоя от поверхности обтекаемого тела; зоны максимальных скоростей в области миделевого сечения при обтекании потоком цилиндра или профиля зоны концевых эффектов.

В рамках выполнения работы или в качестве дополнительного задания можно изменять скорость набегающего потока, тем самым при докритических и закритических числах Рейнольдса наблюдать изменения вышеперечисленного.

---

1. Comsol.ru: руководство пользователя. – 2014. – Режим доступа: [www.comsol.ru/support/knowledgebase/](http://www.comsol.ru/support/knowledgebase/). – 18.12.20

2. Поляков, К.А. Моделирование обтекания шара вязкой средой при наличии скольжения на поверхности в пакете ANSYS/CFX: электронное пособие для дистанционного обучения/ К. А. Поляков, В. Н. Калабухов. – М.: СГУ, 2013. – 67 с. – Режим доступа: [http://mmm\\_samgu.samsu.ru/posob.html](http://mmm_samgu.samsu.ru/posob.html). – 19.12.20

3. Малога, В.С. Численное моделирование обтекания сферы потоком вязкой несжимаемой жидкости // Прикладная гидромеханика. – 2013. – Т. 15, № 3. – С.43-67. – Режим доступа: [http://hydromech.org.ua/content/pdf/ph/ph-15-3\(43-67\).pdf](http://hydromech.org.ua/content/pdf/ph/ph-15-3(43-67).pdf) – 19.12.20.

УДК 629.7

**Беляков Андрей Алексеевич**

Институт ракетно-космической техники Самарского университета,  
г. Самара, Россия

*E-mail:* [shulepov-al@mail.ru](mailto:shulepov-al@mail.ru)

**Belyakov Andrey Alekseevich**

Institute of Rocket and Space Technology of Samara University,  
Samara, Russia

*E-mail:* [shulepov-al@mail.ru](mailto:shulepov-al@mail.ru)

**Шулепов Александр Иванович**

Институт ракетно-космической техники Самарского университета,  
г. Самара, Россия

*E-mail:* [shulepov-al@mail.ru](mailto:shulepov-al@mail.ru)

**Shulepov Alexander Ivanovich**

Institute of Rocket and Space Technology of Samara University,  
Samara, Russia

*E-mail:* [shulepov-al@mail.ru](mailto:shulepov-al@mail.ru)

## СИСТЕМА УПРАВЛЕНИЯ РАЗМЕЩЕНИЕМ ГРУЗОВ

## CARGO ARRANGEMENT MANAGEMENT SYSTEM

*Аннотация. Цель исследования – разработка системы управления размещением грузов в грузовых отсеках космических аппаратов. В статье приводится описание системы управления размещением грузов, ее целевого назначения и базовых функций. Предлагается возможность создания системы на базе транспортного космического комплекса и обосновывается стратегиче-*