

30. Poulain P.M., Barbanti R., Motyzhev S., Zatsepin A. Statistical description of the Black Sea near-surface circulation using drifters in 1999 – 2003, *Deep-Sea Research*, Part I, 2005, Vol. 52, pp. 2250-2274.
31. Korotaev G.K. [et al.] Contribution of the Black Sea observing system to ECOOP, *Ocean Sci. Discuss*, 2011, No. 8, pp. 1695-1722.
32. Motyzhev S.V., Tolstosheev A.P., Lunev E.G. Sistemy operativnykh kontaktnykh nablyu-deniy v pribrezhnoy zone [System operational contact of observations in the coastal zone], *Monitoring pribrezhnoy zony na Chernomorskom eksperimental'nom podsputnikovom poligone* [Monitoring of the coastal zone of the black sea pilot ground truth polygon]. Sevastopol: Morskoy gidrofizicheskiy in-stitut, 2014, pp. 104-118.

Статью рекомендовал к опубликованию д.т.н., профессор В.Х. Пшихопов.

**Мотыжев Сергей Владимирович** – Морской гидрофизический институт; e-mail: motyzhev@marlin-yug.com; 299011, г. Севастополь; ул. Капитанская, 2; тел. (факс): 8692540450; ведущий научный сотрудник; д.т.н.

**Лунев Евгений Геннадьевич** – e-mail: lunev@marlin-yug.com; научный сотрудник; к.т.н.

**Толстошеев Алексей Петрович** – e-mail: tolstosheev@marlin-yug.com; старший научный сотрудник; к.т.н.

**Безгин Александр Александрович** – e-mail: bezya3232@mail.ru; инженер-технолог 1 категории; аспирант Севастопольского государственного университета.

**Быков Егор Максимович** – e-mail: bykov@marlin-yug.com; инженер-технолог 1 категории; аспирант.

**Юркевич Наталья Юрьевна** – e-mail: urkevich@marlin-yug.com; инженер.

**Motyzhev Sergey Vladimirovich** – Marine Hydrophysical Institute; e-mail: motyzhev@marlin-yug.com; 2, Kapitanskaya street, Sevastopol, 299011, Russia; phone (fax): +7692540450; leading researcher of MHI; dr. of eng. sc.

**Lunev Evgeniy Gennad'evich** – e-mail: lunev@marlin-yug.com; research associate of MHI; cand. of eng. sc.

**Tolstosheev Aleksey Petrovich** – e-mail: tolstosheev@marlin-yug.com; senior researcher of MHI; cand. of eng. sc.

**Bezgin Aleksandr Aleksandrovich** – e-mail: bezya3232@mail.ru; engineer of MHI; postgraduate student of Sevastopol State University.

**Bykov Egor Maksimovich** – e-mail: bykov@marlin-yug.com; engineer of MHI; postgraduate student MHI.

**Yurkevich Natal'ya Yur'evna** – e-mail: urkevich@marlin-yug.com; engineer of MHI.

УДК 519.876.2: 519.876.5

**Б.Д. Аминев, С.К. Данилова**

### **ИСПОЛЬЗОВАНИЕ ПАКЕТА OPENFOAM ДЛЯ ИССЛЕДОВАНИЯ ШУМОВЫХ ХАРАКТЕРИСТИК МОРСКОГО ПОДВОДНОГО ОБЪЕКТА \***

*Рассматривается методика работы со свободно распространяемым пакетом вычислительной гидродинамики OpenFOAM, предоставляющим мощный набор утилит для проведения гидро- и аэродинамических экспериментов по моделированию взаимодействия среды с объектом исследования. Рассматривается как общий подход к проведению подоб-*

\* Работа выполнена при поддержке РФФИ, грант №15-08-05133а.

ного рода экспериментов, так и пример его применения к задаче исследования шумности морских подводных объектов (эргатических и роботехнических комплексов) при пространственном маневрировании. Это исследование призвано послужить оценкой успешности разрабатываемых алгоритмов малошумного маневрирования объекта и в перспективе стать альтернативой дорогостоящих ходовых испытаний, испытаний в аэродинамической трубе. Для достижения этой цели предлагается использовать богатые возможности утилит, подобных `cavitatingFoam`, `cavitatingDyMFoam`, `interPhaseChangeFoam` вкупе с интеграцией кода библиотеки `OpenFOAM` с разрабатываемыми авторами алгоритмами управления движением морского подводного объекта. Предлагаются подходы к такой интеграции, некоторые из которых уже реализованы коллективом. Также уделено внимание богатым возможностям открытого пакета `ParaView`, поставляемого вместе с дистрибутивом `OpenFOAM`, по визуализации результатов моделирования движения потока жидкости и влияния среды на объект, которые включают как создание трёхмерных отображений результатов экспериментов, потоков и завихрений, так и рассмотрение отдельно взятых срезов и генерацию анимаций. Рассмотрены возможности настройки эксперимента на `OpenFOAM` для автоматического построения визуализаций заданной структуры, поддерживаемых средствами `FunctionObjects`, позволяющих проводить постобработку результатов во время проведения моделирования. Рассмотрены возможности параллельного и распределенного моделирования с помощью `OpenFOAM`, позволяющие за счёт небольшого изменения в настройках эксперимента значительно сократить вычислительную нагрузку на отдельно взятую вычислительную машину и сократить время моделирования. Для этих целей `OpenFOAM` использует средства другого распространённого пакета с открытыми исходными кодами `OpenMPI`.

Морской подводный объект; малошумное маневрирование; `OpenFOAM`; стенд полномасштабного имитационного моделирования; технологии имитационного моделирования; имитационное моделирование.

**B.D. Aminev, S.K. Danilova**

#### **APPLICATION OF OPENFOAM PACKAGE IN RESEARCH OF MARINE UNDERWATER OBJECT NOISE CHARACTERISTICS**

*This paper describes the possibilities of the OpenFOAM open source CFD package and its adaptation to the problem of analysis of noise characteristics of marine underwater objects (ergatic and robotics complexes) in case of spatial maneuvering. This paper concerns with the technique of working with the freeware CFD package OpenFOAM, which provides a powerful set of tools for hydro- and aerodynamic experiments on modeling the interaction of the environment with the object under investigation. A general approach to this kind of experiments and an example of its application to the investigation of marine underwater objects (ergatic and robotics complexes) noise during spatial maneuvering are considered. This investigation is intended to serve as an success estimation of the developed algorithms for object's low noise maneuvering and potentially to become an alternative to expensive sea trails, wind tunnel tests. To achieve this goal we suggest to use rich capabilities of utilities such as `cavitatingFoam`, `cavitatingDyMFoam`, `interPhaseChangeFoam` coupled with the integration of the OpenFOAM library code with marine underwater object movements control algorithms developed by the authors. Few approaches to this integration are suggested, some of which have already been implemented by team. In the article attention is also paid to the rich capabilities of open source package `ParaView`, distributed with the `OpenFOAM`. It helps with the visualization of the simulation results of fluid flow and the influence of the environment on the subject, which include both the creation of three-dimensional visualization of the experimental results, streams and eddies, and of individual slices views and animations generation. The possibilities of the experiment setup for `OpenFOAM` to automatically build visualizations with given structure supported by means of `FunctionObjects`, allowing to carry out post-processing of results during the simulation are considered. The possibilities of parallel and distributed simulation using `OpenFOAM`, allowing, in cost of the small changes in the settings of the experiment, to significantly reduce the computational load to an individual computers and to reduce the simulation time. For these purposes, `OpenFOAM` uses the other common open source package `OpenMPI`.*

*Marine underwater object; muted noise maneuvering; `OpenFOAM`; full-scale imitational modeling stand; imitational modelling technologies; simulation.*

**Цели.** Цель данной работы – исследование возможности применения пакета *OpenFOAM* к задаче оценки шумовых характеристик движения морских подводных объектов (МПО) при малошумном маневрировании (ММ).

Режим ММ применяется для обеспечения скрытности МПО и разработка методов понижения шумности движения МПО при маневрах, безусловно, является важной задачей. Для достижения малошумности движения МПО используются различные методы, в том числе устанавливаются ограничения на работу технических средств управления (ТСУ) и фазовые координаты движения МПО (допустимый угол атаки, дифферента, скорости движения). Мы предлагаем применить средства *OpenFOAM* для оценки эффективности подобных мер для того, чтобы в дальнейшем использовать эти результаты для улучшения существующих алгоритмов движения МПО при ММ и создания новых алгоритмов. В качестве примеров применения *OpenFOAM* в морской тематике можно привести зарубежные работы последних лет [1–4]. О применении средств вычислительной гидродинамики в отечественных морских разработках можно узнать, например, в [5], где говорится о разработке специализированных пакетов на основе *OpenFOAM*.

**Постановка задачи.** Режим ММ выполняется при ограничениях на работу ТСУ, уменьшение углов атаки/дрейфа, дифферента и скорости хода МПО. К этим ограничениям прибавляются требования на уменьшение количества переключений рулей, углов их отклонения и скоростей переключений. Все эти действия в совокупности призваны уменьшить шумность МПО при маневрах.

Разработка наиболее эффективных алгоритмов управления при таких ограничениях затрудняется тем, что трудно оценить эффективность шумоподавления без отработки этого режима в реальных условиях плавания. Для определения шумности движения МПО в режиме ММ необходимо иметь возможность промоделировать движение жидкости вокруг корпуса МПО, рулей и винта, и оценить вероятность появления кавитационных пузырьков.

**Метод решения.** Для решения поставленной задачи предлагается использовать свободно распространяемое программное обеспечение *OpenFOAM*, которое предоставляет ряд возможностей для получения самых разнообразных характеристик среды вокруг моделируемого объекта – давление на корпус, скорости потоков, плотность. Для расчёта кавитации имеются специализированные утилиты (решатели (*solvers*)), такие как *cavitatingFoam*, *cavitatingDyMFoam* или *interPhaseChangeFoam*, *interPhaseChangeDyMFoam*, используемые в работах [2, 3].

**Решение задачи.** *OpenFOAM* (англ. *Open Source Field Operation And Manipulation CFD ToolBox*) – открытая интегрируемая платформа для численного моделирования задач механики сплошных сред. Основным методом вычисления является метод конечных объемов (*finite volume method*) – *FVM*-вычисления.

Код *OpenFOAM*, разработан в Великобритании в компании *OpenCFD Ltd*. Первоначально, программа предназначалась для прочностных расчетов и в результате многолетнего академического и промышленного развития на сегодняшний момент позволяет решать следующие задачи:

- ◆ прочностные расчеты;
- ◆ гидродинамика ньютоновских и неньютоновских вязких жидкостей как в несжимаемом, так и сжимаемом приближении с учётом конвективного теплообмена и действием сил гравитации. Для моделирования турбулентных течений возможно использование *RANS*-моделей, *LES*- и *DNS*-методов. Возможно решение дозвуковых, околозвуковых и сверхзвуковых задач;
- ◆ многофазные задачи, в том числе с описанием химических реакций компонент потока;
- ◆ задачи, связанные с деформацией расчётной сетки;
- ◆ сопряжённые задачи;

- ◆ некоторые другие задачи, при математической постановке которых требуется решение дифференциальных уравнений в частных производных в условиях сложной геометрии среды;
- ◆ распараллеливание расчёта как в кластерных, так и многопроцессорных системах.

В основе кода *OpenFOAM* лежит набор библиотек, предоставляющих инструменты для решения систем дифференциальных уравнений в частных производных как в пространстве, так и во времени. Рабочим языком кода является ООП C++. В терминах данного языка большинство математических дифференциальных и тензорных операторов в программном коде (до трансляции в исполняемый файл) уравнений может быть представлено в удобочитаемой форме, а метод дискретизации и решения для каждого оператора может быть выбран уже пользователем в процессе расчёта. Таким образом, в коде полностью инкапсулируются и разделяются понятия расчетной сетки (метод дискретизации), дискретизации основных уравнений и методов решения алгебраических уравнений.

Пакет *OpenFOAM* имеет множество утилит, которые позволяют конвертировать сторонние форматы в формат *OpenFOAM* (например, *ANSYS*, *Fluent*, *Gambit*, *VTK* или др.) [6–9].

К недостаткам пакета обычно относят скудную документацию и отсутствие графического интерфейса – все утилиты являются консольными приложениями. В сообществе *OpenFOAM* недостаток документации компенсируют открытостью исходных кодов, в которых по сути можно почерпнуть нужную информацию, а отсутствие графического интерфейса не является проблемой для пользователей *Linux*-систем, на которых *OpenFOAM* и поставляется (есть ответвления для работы под *Windows*). Для отображения результатов моделирования процессов обтекания корпуса МПО используется специализированное программное обеспечение – *ParaView*, которое является открытым графическим кросс-платформенным пакетом для интерактивной визуализации в исследовательских целях [10, 11].

Работа с *OpenFOAM* и его адаптация к решаемой задаче строится по следующей схеме:

1. Производится настройка конфигурационных файлов. *OpenFOAM* использует определённую иерархию папок и конфигурационных файлов, местоположение которых заранее известно используемым в рамках пакета утилитам (после импорта соответствующих переменных среды). Существует довольно большое количество файлов, отвечающих за те или иные аспекты моделирования процессов обтекания корпуса МПО жидкостью. В некоторых хранится информация о сетке (*mesh*) – описании геометрии моделируемой ситуации. В некоторых – параметры используемого решателя, применяемых методов интегрирования, решения дифференциальных уравнений движения жидкости, характеристик среды и т.д. Настройка конфигурационных файлов – самая сложная часть работы с *OpenFOAM*.

2. Генерация сетки. С помощью специальных утилит по заданным файлам настройки производится автоматизированное построение сетки. Построение качественной сетки также является важной задачей, влияющей на результат моделирования среды. Как было сказано ранее, *OpenFOAM* использует в своих вычислениях метод конечных объёмов [12, 13] – пространство моделирования сеткой разбивается на множество объёмов и для каждого такого участка производятся расчёты как для части среды однородного состава. Это значит, что если нужно получить точные расчёты сложного процесса (например завихрения потока у рулей), в этой области сетка должна быть мельче. Там же, где поток имеет более однородную структуру – на отдалении от МПО – сетку делают крупнее и результаты получаются грубые. Это необходимо для экономии вычислительных мощностей там, где они не требуются и концентрации их там, где это действительно необходимо.

3. Моделирование движение жидкости. Для этого используются решатели из набора доступных утилит (*cavitatingFOAM*, например). Во время проведения моделирования исходя из предустановленных начальных условий производится решение дифференциальных уравнений, заложенных в решателе, определяются скорости жидкости в каждом конечном объёме, давление жидкости. Собираются все данные о потоке и взаимодействии потока с объектом, которые были заданы на этапе конфигурации — количество информации регулирует проводящий эксперимент. С установленной в конфигурационных файлах периодичностью все необходимые данные о каждом конечном объёме собираются в отдельные файлы.

4. Постобработка. В *OpenFOAM* имеется огромное множество утилит, позволяющих проводить ту или иную постобработку полученных данных – нахождение минимумов, усреднения и т.д. Для просмотра полученных экспериментов используется пакет *ParaView*, с помощью которого можно строить разнообразные графики и визуализировать потоки вокруг объекта, распределения давлений, скоростей и их составляющих. Также есть возможность записи результатов в различных форматах — от сохранения изображений, до записи анимаций. *ParaView* с настройками для *OpenFOAM* можно скачать вместе с *OpenFOAM* на сайте разработчика.

Рассмотрим теперь пример использования *OpenFOAM* (рис. 1).

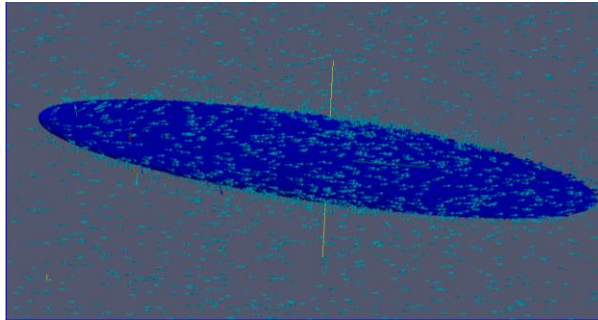


Рис. 1. Результат моделирования на *OpenFOAM*

В качестве начальных условий выбираем движение потока воды с постоянной скоростью слева. В качестве решателя можно выбрать, например, *pimpleDyMFoam* – решатель для нестационарных несжимаемых потоков ньютоновской жидкости и подвижной сетки с использованием *PIMPLE* (объединённого *PISO-SIMPLE*) алгоритма.

Для построения сетки можно пользоваться стандартными средствами *OpenFOAM* – с их помощью можно строить плоскости, параллелепипеды, сферы. Можно растягивать их и вращать. Но этот подход неперспективен для построения подробной сетки реального объекта, поэтому можно воспользоваться возможностью *OpenFOAM* строить сетку по имеющемуся *STL*-файлу [14].

*STL* – формат файла, используемый для хранения трехмерных моделей объектов для использования в технологиях быстрого прототипирования, обычно, методом стереолитографии [15]. Иными словами, можно воспользоваться практически любым средством для построения *3D*-моделей (открытым программным обеспечением *Blender*, например) и построить подробнейшую объёмную модель корпуса МПО, а затем экспортировать эту модель в *STL*-формат, который по сути раскладывает всё объёмную модель объекта на треугольные участки с заданной при экспорте точностью. Далее путь к этому файлу вносится в специальный конфигурационный файл и при помощи утилиты *snappyHexMesh* производится построение сетки с заданными характеристиками.

Одна из выдающихся особенностей *OpenFOAM* заключается в том, что многие решатели и утилиты могут работать в распараллеленно (распределённо). Можно сконфигурировать выполнение задачи как в нескольких процессах одного компьютера, так и на нескольких компьютерах с указанием места сохранения результатов. Это позволяет значительно ускорить расчёты при наличии не только суперкомпьютеров, но и при наличии обычной локальной сети вычислительных устройств.

Например, и *snappyHexMesh* и *pimpleDyMFoam* можно запускать в нескольких потоках. Для этих целей *OpenFOAM* использует возможности другого открытого пакета *OpenMPI* – проекта библиотеки интерфейса передачи сообщений, включающего в себя технологии и ресурсы из нескольких других подобных проектов, и используемого на многих суперкомпьютерах ТОП500 [16–18].

После сравнительно непродолжительной генерации сетки средствами *snappyHexMesh* (в нескольких потоках), и довольно продолжительного процесса моделирования движения потока вокруг неподвижного слегка наклонённого эллипсоида, полученного из *STL*-файла, подготовленного в Blender, можно получить результат, подобный приведённому на рис. 2.

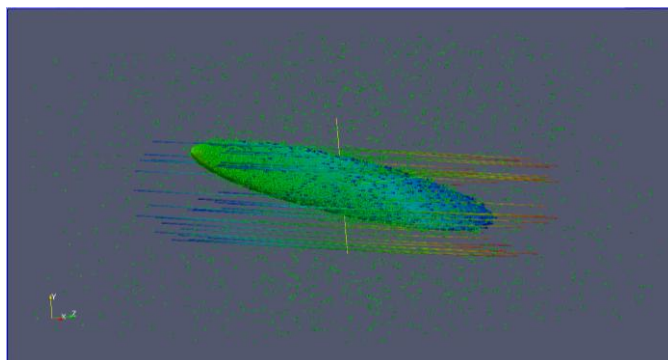


Рис. 2. Визуализация результата моделирования в ParaView

Стоит отметить, что для достижения подобного результата (см. рис. 2) были использованы некоторые весьма удобные технологии *OpenFOAM*. Дело в том, что по умолчанию *OpenFOAM* генерирует только данные – результаты моделирования, никак не настраивая способ их отображения. Но существует возможность внести в конфигурационные файлы настройки так называемых функциональных объектов (*Function Objects*), которые позволяют проводить постобработку результатов во время выполнения моделирования. С их помощью можно задать некоторые настройки отображения (например, визуализацию потоков в *ParaView*), что позволит не задавать нужные настройки вручную каждый раз после проведения моделирования и отображения результатов. Также имеется возможность просмотра результатов моделирования как полностью, так и по частям — можно исследовать лишь часть, просчитанную на отдельном компьютере или процессоре, что может быть весьма удобно, если на машине используется не очень мощная видеокарта.

Одной из важных особенностей, которая до сих пор не упоминалась является работа с подвижной сеткой. Именно для этого у многих решателей есть версии с инфиксом "*DyM*" (сокращение от *Dynamic Mesh*). При проведении моделирования сетка может меняться – объект двигаться, поверхность воды искривляться. Эти возможности активно используются при расчётах гидро- и аэроупругого взаимодействия (*fluid-structure interaction*) [19, 20]. То есть, с помощью *OpenFOAM* можно не только проводить прочностные расчёты, но и следить за тем, как поток жидкости может искривить объект.

Впрочем, для авторов важнее то, что возможность работы с подвижной сеткой позволяет проводить моделирование подвижного объекта, а не только статичного МПО в потоке.

Для этих целей можно пользоваться различными приёмами:

1. Просчитать координаты объекта и угловые скорости исходя из, например, переходного процесса при действии алгоритма ММ, а затем дать эти координаты, собранные в одном файле решателю *OpenFOAM* и он будет двигать сетку в соответствии с заданными параметрами. Таким образом можно оценить возмущение среды от движений МПО.

2. В *OpenFOAM* есть специальные методы для просчёта движения объекта в среде – нужно задать его геометрию (точную 3D-модель) и установить положение центра масс, инерционные характеристики. И тогда, *OpenFOAM* сам просчитает движение объекта под действием потока. То есть при этом подходе мы задаём положение рулей и *OpenFOAM* считает подъёмную силу, воздействует на МПО и заставляет его смещаться. При адаптации *OpenFOAM* к задаче исследования движения МПО в режиме ММ предполагается интегрировать алгоритм управления ММ с кодом пакета – подавать углы отклонения рулей напрямую в решатель и получать от него изменения положения МПО.

Сейчас авторы работают над реализацией первого подхода, хотя в будущем предполагается перейти ко второму, к недостаткам которого следует отнести необходимость в детальной информации о 3D-модели объекта, без которой МПО не сможет маневрировать в моделируемой среде.

Также ведутся работы над тем, чтобы интегрировать алгоритмы управления, разрабатываемые авторами, в процесс моделирования среды *OpenFOAM* без необходимости в последовательном моделировании (сначала алгоритмы управления просчитывают движение модели по заданным формулам, затем координаты объекта подаются в *OpenFOAM*). В будущем моделируемый объект будет получать информацию о среде напрямую из *OpenFOAM*, который будет влиять на объект в зависимости от используемых ТСУ, что в перспективе должно привести к разработке более эффективных алгоритмов управления за счёт проверки их на имитации ходовых испытаний в среде *OpenFOAM* на аппаратно-программном комплексе-стенде. На рис. 3 приведен пример визуализации потока вокруг 3D-модели МПО, разработанной в лаб. 45.1 ИПУ РАН Кусковым И.М. (цвет соответствует распределению давления от большего (красный) к меньшему (синий)).

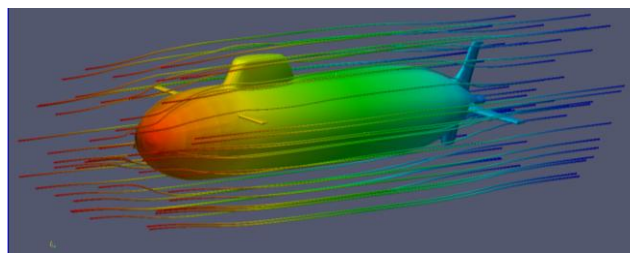


Рис. 3. Визуализация потоков вокруг МПО в ParaView

**Выводы.** *OpenFOAM* является перспективным инструментом для моделирования среды маневрирования МПО и синтеза лучших алгоритмов управления с точки зрения достижения малошумности.

Перспективным направлением применения пакета может стать определение параметров математической модели движения МПО в качестве альтернативы дорогостоящим экспериментам в аэродинамических трубах и опытных бассейнах на ходовых испытаниях.

## БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. *Liefvendahl M., Troëng C.* Computation of Cycle-to-Cycle Variation in Blade Load for a Submarine Propeller, using LES // Second International Symposium on Marine Propulsors – smp'11 (15-17 June 2011, Hamburg, Germany). – Publisher: Institute for Fluid Dynamics and Ship Theory (FDS) – Hamburg University of Technology (TUHH), German Society for Maritime Technology (STG), 2011. – ISBN: 978-3-86342-236-3. – P. 515-521.
2. *Zhi Shang, David R. Emerson, Xiaojun Gu.* Numerical investigations of cavitation around a high speed submarine using OpenFOAM with LES // International Journal of Computational Methods. – 2012. – Vol. 9, No. 3. ISSN: 1793-6969 [14 pages]. – URL: <http://www.worldscientific.com/doi/pdf/10.1142/S0219876212500405> (дата обращения 27.02.2015).
3. *Zhi Shang.* Numerical investigations of supercavitation around blunt bodies of submarine shape // Applied Mathematical Modelling. – 2013. – Vol. 37. – P. 8836-8845.
4. *Hidalgo V. H., Luo X. W., Escaler X., Ji J., Aguinaga A.* Numerical investigation of unsteady cavitation around a NACA 66 hydrofoil using OpenFOAM // 27th IAHR Symposium on Hydraulic Machinery and Systems (IAHR 2014) // IOP Conference Series: Earth and Environmental Science. – 2014. – Vol. 22.
5. *Лобачев М.П.* Возможности импортозамещения ПО для корабельной гидродинамики // Петербургский Международный инновационный форум. – СПб., 2014. – URL: [http://www.csrnw.ru/upload/file\\_content\\_1373.pdf](http://www.csrnw.ru/upload/file_content_1373.pdf) (дата обращения 27.02.2015).
6. OpenFOAM. – URL: <https://ru.wikipedia.org/wiki/OpenFOAM> (дата обращения 27.02.2015).
7. OpenFOAM. – URL: <http://www.openfoam.com> (дата обращения 27.02.2015).
8. Unofficial OpenFOAM wiki. – URL: [https://openfoamwiki.net/index.php/Main\\_Page](https://openfoamwiki.net/index.php/Main_Page) (дата обращения 27.02.2015).
9. The OpenFOAM Extend Project. – URL: <http://www.extend-project.de/>. (дата обращения 27.02.2015).
10. ParaView. – URL: <https://ru.wikipedia.org/wiki/ParaView> (дата обращения 27.02.2015).
11. ParaView. – URL: <http://www.paraview.org/> (дата обращения 27.02.2015).
12. *Смирнов Е.М., Зайцев Д.К.* Метод конечных объемов в приложении к задачам гидродинамики и теплообмена в областях сложной геометрии // Научно-технические ведомости. – 2004. – № 2. – С. 70-81.
13. Finite volume method. – URL: [http://en.wikipedia.org/wiki/Finite\\_volume\\_method](http://en.wikipedia.org/wiki/Finite_volume_method) (дата обращения 27.02.2015).
14. STL (формат файла). – URL: [https://ru.wikipedia.org/wiki/STL\\_\(формат\\_файла\)](https://ru.wikipedia.org/wiki/STL_(формат_файла)) (дата обращения 27.02.2015).
15. Stereolithography. – URL: <https://en.wikipedia.org/wiki/Stereolithography> (дата обращения 27.02.2015).
16. OpenMPI. – URL: [http://en.wikipedia.org/wiki/Open\\_MPI](http://en.wikipedia.org/wiki/Open_MPI) (дата обращения 27.02.2015).
17. Open MPI: Open Source High Performance Computing. – URL: <http://www.open-mpi.org/> (дата обращения 27.02.2015).
18. Message Passing Interface. – URL: [http://en.wikipedia.org/wiki/Message\\_Passing\\_Interface](http://en.wikipedia.org/wiki/Message_Passing_Interface) (дата обращения 27.02.2015).
19. Thomas Ponweiser, Peter Stadelmeyera, Tomáš Karásek. Fluid-Structure Simulations with OpenFOAM for Aircraft Designs // Partnership for Advanced Computing in Europe // URL: <http://www.prace-ri.eu/IMG/pdf/wp172.pdf> (дата обращения 27.02.2015).
20. Fluid-structure interaction. – URL: [http://en.wikipedia.org/wiki/Fluid%E2%80%93structure\\_interaction](http://en.wikipedia.org/wiki/Fluid%E2%80%93structure_interaction) (дата обращения 27.02.2015).

## REFERENCES

1. *Liefvendahl M., Troëng C.* Computation of Cycle-to-Cycle Variation in Blade Load for a Submarine Propeller, using LES, Second International Symposium on Marine Propulsors – smp'11 (15-17 June 2011, Hamburg, Germany). Publisher: Institute for Fluid Dynamics and Ship Theory (FDS) – Hamburg University of Technology (TUHH), German Society for Maritime Technology (STG), 2011. ISBN: 978-3-86342-236-3, pp. 515-521.



2. *Zhi Shang, David R. Emerson, Xiaojun Gu.* Numerical investigations of cavitation around a high speed submarine using OpenFOAM with LES, *International Journal of Computational Methods*, 2012, Vol. 9, No. 3. ISSN: 1793-6969 [14 pages]. Available at: <http://www.worldscientific.com/doi/pdf/10.1142/S0219876212500405> (Accessed 27 February 2015).
3. *Zhi Shang.* Numerical investigations of supercavitation around blunt bodies of submarine shape, *Applied Mathematical Modelling*, 2013, Vol. 37, pp. 8836-8845.
4. *Hidalgo V. H., Luo X. W., Escaler X., Ji J., Aguinaga A.* Numerical investigation of unsteady cavitation around a NACA 66 hydrofoil using OpenFOAM, *27th IAHR Symposium on Hydraulic Machinery and Systems (IAHR 2014), IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, 2014, Vol. 22.
5. *Lobachev M.P.* Vozможности importozameshcheniya PO dlya korabel'noy gidrodinamiki [The possibilities of import substitution for ship hydrodynamics], *Peterburgskiy Mezhdunarodnyy innovatsionnyy forum* [St. Petersburg international innovation forum]. St. Petersburg, 2014. Available at: [http://www.csr-nw.ru/upload/file\\_content\\_1373.pdf](http://www.csr-nw.ru/upload/file_content_1373.pdf) (Accessed 27 February 2015).
6. OpenFOAM. Available at: <https://ru.wikipedia.org/wiki/OpenFOAM> (Accessed 27 February 2015).
7. OpenFOAM. Available at: <http://www.openfoam.com> (Accessed 27 February 2015).
8. Unofficial OpenFOAM wiki. Available at: [https://openfoamwiki.net/index.php/Main\\_Page](https://openfoamwiki.net/index.php/Main_Page) (Accessed 27 February 2015).
9. The OpenFOAM Extend Project. Available at: <http://www.extend-project.de/>. (Accessed 27 February 2015).
10. ParaView. Available at: <https://ru.wikipedia.org/wiki/ParaView> (Accessed 27 February 2015).
11. ParaView. Available at: <http://www.paraview.org/> (Accessed 27 February 2015).
12. *Smirnov E.M., Zaytsev D.K.* Metod konechnykh ob'emov v prilozhenii k zadacham gidrogazodinamiki i teploobmena v oblastiakh slozhnoy geometrii [Finite volume method in application to problems in fluid dynamics and heat transfer in the areas of complex geometry, *Nauchno-tekhnicheskie vedomosti* [Scientific-technical Bulletin], 2004, No. 2, pp. 70-81.
13. Finite volume method. Available at: [http://en.wikipedia.org/wiki/Finite\\_volume\\_method](http://en.wikipedia.org/wiki/Finite_volume_method) (дата обращения 27.02.2015).
14. STL (формат файла). Available at: [https://ru.wikipedia.org/wiki/STL\\_\(формат\\_файла\)](https://ru.wikipedia.org/wiki/STL_(формат_файла)) (дата обращения 27.02.2015).
15. Stereolithography. Available at: <https://en.wikipedia.org/wiki/Stereolithography> (Accessed 27 February 2015).
16. OpenMPI. Available at: [http://en.wikipedia.org/wiki/Open\\_MPI](http://en.wikipedia.org/wiki/Open_MPI) (Accessed 27 February 2015).
17. Open MPI: Open Source High Performance Computing. Available at: <http://www.openmpi.org/> (Accessed 27 February 2015).
18. Message Passing Interface. Available at: [http://en.wikipedia.org/wiki/Message\\_Passing\\_Interface](http://en.wikipedia.org/wiki/Message_Passing_Interface) (Accessed 27 February 2015).
19. Thomas Ponweisera, Peter Stadelmeyera, Tomáš Karásek. Fluid-Structure Simulations with OpenFOAM for Aircraft Designs // Partnership for Advanced Computing in Europe. Available at: <http://www.prace-ri.eu/IMG/pdf/wp172.pdf> (Accessed 27 February 2015).
20. Fluid-structure interaction. Available at: [http://en.wikipedia.org/wiki/Fluid%E2%80%93structure\\_interaction](http://en.wikipedia.org/wiki/Fluid%E2%80%93structure_interaction) (Accessed 27 February 2015).

Статью рекомендовал к опубликованию д.т.н. Г.Г. Гребенюк.

**Аминев Булат Даянович** – Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт проблем управления им. В.А. Трапезникова РАН; e-mail: [daianovich@mail.ru](mailto:daianovich@mail.ru); г. Москва, 117997, ул. Профсоюзная, д. 65, лаб. 45.1; тел.: +79175272957; старший инженер-программист.

**Данилова Светлана Кузьминична** – e-mail: [lab45\\_1@ipu.ru](mailto:lab45_1@ipu.ru); тел.: +74953349240; к.т.н.; ведущий научный сотрудник.

**Aminev Bulat Dayanovich** – V.A. Trapeznikov Institute of Control Sciences of Russian Academy of Sciences; e-mail: [daianovich@mail.ru](mailto:daianovich@mail.ru); Lab 45.1, 65 Profsoyuznaya street, Moscow, 117997, Russia; phone: +79175272957; senior software engineer.

**Danilova Svetlana Kuzminichna** – e-mail: [lab45\\_1@ipu.ru](mailto:lab45_1@ipu.ru); phone: +74953349240; cand. of eng. sc.; leading researcher.