

УДК: 519:63; 532:5; 533:6

## FlowVision: индустриальная вычислительная гидродинамика

**А. А. Аксёнов**

Объединенный институт высоких температур РАН,  
Россия, 125412, г. Москва, ул. Ижорская, д. 13

E-mail: andrey@tesis.com.ru

*Получено 01.11.2016, после доработки — 21.12.2016.*

*Принято к публикации 30.12.2016.*

В работе представлена новая версия программного комплекса FlowVision, предназначенного для автоматизации инженерных расчетов в области вычислительной гидродинамики: FlowVision 3.09.05. Программный комплекс (ПК) FlowVision используется для решения различных прикладных задач в различных областях промышленности. Его популярность основана на том, что он позволяет решать сложные нетрадиционные задачи, находящиеся на стыке различных дисциплин, с одной стороны, и, с другой стороны, на парадигме полной автоматизации таких трудоемких для инженера процессов, как построение расчетной сетки. FlowVision — это программный комплекс, полностью отчуждаемый от разработчиков. Он имеет развитый графический интерфейс, систему задания расчетного проекта и систему визуализации течений различными методами — от построения контуров (для скалярных переменных) и векторов (для векторных переменных) на плоскостях и поверхностях до объемной визуализации расчетных данных. Кроме этого, ПК FlowVision предоставляет пользователю возможность вычислять интегральные характеристики на поверхностях и в ограниченных объемах.

ПК основан на конечно-объемном подходе к аппроксимации основных уравнений движения жидкости. В нем реализованы явный и неявный методы решения этих уравнений. ПК имеет автоматический построитель неструктурированной сетки с возможностью ее локальной динамической адаптации. В ПК реализован двухуровневый параллелизм, позволяющий эффективно проводить расчеты на компьютерах, имеющих распределенную и общую память одновременно. FlowVision обладает широким спектром физико-математических моделей: турбулентности (URANS, LES, ILES), горения, массопереноса с учетом химических превращений и радиоактивного распада, электрогидродинамики. FlowVision позволяет решать задачи движения жидкостей со скоростями, соответствующими несжимаемому или гиперзвуковому режимам за счет использования все-скоростного метода расщепления по физическим переменным для решения уравнений Навье–Стокса.

FlowVision позволяет решать междисциплинарные задачи с использованием различных средств моделирования, например: моделировать многофазные течения методом VOF, обтекание подвижных тел с помощью эйлера подхода при неподвижной расчетной сетке, моделировать вращающиеся машины с использованием метода скользящей сетки, решать задачи взаимодействия жидкости и конструкций методом двухстороннего сопряжения FlowVision с конечно-элементными кодами. В данной работе показаны примеры решения задач-вызовов: а) посадка космического корабля на воду при торможении ракетными двигателями, где есть граница раздела «воздух–вода», подвижные тела и взаимодействие сверхзвуковой струи газа с границей раздела «вода–воздух»; б) моделирование работы человеческого сердца с искусственными и живыми клапанами, спроектированными на базе томографических исследований, с использованием двухстороннего сопряжения «жидкостной» расчетной области с конечно-элементной моделью мышц сердца.

Ключевые слова: индустриальная вычислительная гидродинамика, газодинамика, конечно-объемный метод, уравнения Навье–Стокса, расчет взаимодействия жидкости и конструкции.

Работа выполнена при поддержке Российского научного фонда, грант № 14-50-00124.

© 2017 Андрей Александрович Аксёнов

UDC: 519:63; 532:5; 533:6

## FlowVision: Industrial computational fluid dynamics

A. A. Aksenov

Joint Institute for High Temperatures RAS,  
13 Izhorskaya st., Moscow, 125412, Russia

E-mail: andrey@tesis.com.ru

*Received 01.11.2016, after completion — 21.12.2016.*

*Accepted for publication 30.12.2016.*

The work submits new release of the FlowVision software designed for automation of engineering calculations in computational fluid dynamics: FlowVision 3.09.05. The FlowVision software is used for solving different industrial problems. Its popularity is based on the capability to solve complex non-tradition problems involving different physical processes. The paradigm of complete automation of labor-intensive and time-taking processes like grid generation makes FlowVision attractive for many engineers. FlowVision is completely developer-independent software. It includes an advanced graphical interface, the system for specifying a computational project as well as the system for flow visualization on planes, on curvilinear surfaces and in volume by means of different methods: plots, color contours, iso-lines, iso-surfaces, vector fields. Besides that, FlowVision provides tools for calculation of integral characteristics on surfaces and in volumetric regions.

The software is based on the finite-volume approach to approximation of the partial differential equations describing fluid motion and accompanying physical processes. It provides explicit and implicit methods for time integration of these equations. The software includes automated generator of unstructured grid with capability of its local dynamic adaptation. The solver involves two-level parallelism which allows calculations on computers with distributed and shared memory (coexisting in the same hardware). FlowVision incorporates a wide spectrum of physical models: different turbulence models, models for mass transfer accounting for chemical reactions and radioactive decay, several combustion models, a dispersed phase model, an electro-hydrodynamic model, an original VOF model for tracking moving interfaces. It should be noted that turbulence can be simulated within URANS, LES, and ILES approaches. FlowVision simulates fluid motion with velocities corresponding to all possible flow regimes: from incompressible to hypersonic. This is achieved by using an original all-speed velocity-pressure split algorithm for integration of the Navier-Stokes equations.

FlowVision enables solving multi-physic problems with use of different modeling tools. For instance, one can simulate multi-phase flows with use of the VOF method, flows past bodies moving across a stationary grid (within Euler approach), flows in rotary machines with use of the technology of sliding grid. Besides that, the software solves fluid-structure interaction problems using the technology of two-way coupling of FlowVision with finite-element codes. Two examples of solving challenging problems in the FlowVision software are demonstrated in the given article. The first one is splashdown of a spacecraft after deceleration by means of jet engines. This problem is characterized by presence of moving bodies and contact surface between the air and the water in the computational domain. The supersonic jets interact with the air-water interphase. The second problem is simulation of the work of a human heart with artificial and natural valves designed on the basis of tomographic investigations with use of a finite-element model of the heart. This problem is characterized by two-way coupling between the “liquid” computational domain and the finite-element model of the hart muscles.

Keywords: industrial computational fluid dynamics, gas dynamics, finite-volume method, Navier–Stokes equations, fluid-structure interaction.

Citation: *Computer Research and Modeling*, 2017, vol. 9, no. 1, pp. 5–20 (Russian).

This work was supported by the Russian Science Foundation (project no. 14-50-00124).

## Введение

Программный комплекс FlowVision [Аксенов и др., 1996; Aksenov et al., 1998] предназначен для моделирования трехмерных течений жидкости и газа в технических и природных объектах, а также для визуализации этих течений методами компьютерной графики. FlowVision создавался командой энтузиастов в стенах Российской академии наук, далее был доведен до степени промышленного кода компанией «ТЕСИС». В настоящее время FlowVision развивается в тесном сотрудничестве с ведущими институтами РАН, отраслевыми научно-исследовательскими институтами, российскими и зарубежными промышленными предприятиями и университетами.

В настоящее время FlowVision используется в различных российских и зарубежных организациях [Аксенов, Коньшин, 2002; Аксенов, Коньшин, 2004], составляя конкуренцию западным аналогам. Охват задач, решаемых FlowVision, достаточно широк. Это задачи внешней аэродинамики, внутренних течений, сильного взаимодействия жидкости и конструкций (совместно с прочностными кодами: Abaqus, Nastran, АПН WinMachine, Fidesys) [Aksenov et al., 2004; Aksenov et al., 2007; Aksenov, Iliine, Schelayev et al., 2007; Аксенов, Коньшин, 2006; Аксенов, Шишаева, 2010], движения контактных (свободных) границ между несмешивающимися жидкостями [Аксенов и др., 2006; Гарипов и др., 2008], задачи с химическими и ядерными реакциями [Пугач, 2014; Фирсов и др., 2014], с теплообменом [Евграфова и др., 2016; Аксенов и др., 2013; Aksenov et al., 2014], с излучением, абляцией, конденсацией [Timouchev et al., 2005], с неньютоновской реологией вязкой жидкости, задачи акустики вентиляторов [Timouchev et al., 2003; Timouchev et al., 2006], задачи движения газа в областях с крайне малыми зазорами [Aksenov et al., 2005; Aksenov et al., 2006], задачи движения жидкости и газа во вращающихся машинах (компрессорах, турбинах) [Жестков и др., 2015], задачи обтекания тел газом со сверхзвуковыми и гиперзвуковыми скоростями [Аксенов и др., 2011; Aksenov et al., 2015; Markova et al., 2016] и другие междисциплинарные задачи, включая задачи из области добычи полезных ископаемых [Лукьянова, Шмелев, 2006; Рафиков, Аллаяров, 2009]. Для получения результатов численного моделирования, адекватных реальности, особенно в такой сфере деятельности, как атомная промышленность, необходимы верификация и валидация программы. Большая работа в этом направлении была проведена совместно с ОКБМ им. Африкантова [Аксенов и др., 2006; Осипов и др., 2012; Рогожкин и др., 2013; Шепелев и др., 2012; Rogozhkin, 2013].

Современное проектирование сложных изделий, таких как самолеты, космические ракеты, ядерные реакторы, а также исследование процессов, происходящих в живых организмах, немислимы без использования суперкомпьютеров. Программный комплекс FlowVision имеет двухуровневый параллелизм, предполагающий одновременное использование общей и распределенной памяти компьютера [Аксенов и др., 2009; Aksenov et al., 2003]. Это позволяет достаточно эффективно использовать архитектуру современного суперкомпьютера. В России имеются доступные для пользователей суперкомпьютерные центры, в которых установлен FlowVision: это самые мощные российские суперкомпьютеры «Ломоносов» и «Ломоносов-2» Московского государственного университета, суперкомпьютеры Южно-Уральского государственного университета, НИЦ «Курчатовский институт», Московского авиационного института и Московского физико-технического института (университета).

Применение суперкомпьютеров позволяет также решить задачи о нахождении наилучшего конструкторского решения (задачи оптимизации конструкции). Программный комплекс FlowVision, совместно с многокритериальным многопараметрическим оптимизатором IOSO, позволил решить ряд задач оптимизации аэродинамических форм [Шишаева и др., 2010; Vucinic et al., 2008].

В настоящей работе проводится краткий обзор технологий FlowVision и представляется решение двух сложных междисциплинарных задач: моделирование посадки космического корабля на воду и моделирование движения крови в конечно-элементной модели сердца, создаваемой в рамках проекта Living Heart Project (Проект «Живое сердце» компании Simulia Dassault).

## Обзор технологий FlowVision

Программный комплекс FlowVision [Aksenov et al., 1998] основан на конечно-объемном подходе к аппроксимации уравнений движения жидкости и газа. Используется автоматическое построение расчетной сетки, которое основано на методе подсеточного разрешения геометрии, являющегося более совершенным аналогом метода cut-cell. Расчетная сетка вдали от границ является декартовой, однако около границ она превращается в неструктурированную сетку, имеющую в качестве ячеек произвольные многогранники. Для разрешения пограничных слоев в программном комплексе FlowVision используется призматическая сетка типа «химера». Данный подход отличается от известного подхода тем, что основная сетка и призматическая сетка, построенная около тела, сшиваются друг с другом на поверхности тела и на внешней границе призматической сетки. Это позволяет существенно уменьшить количество расчетных ячеек при исследовании аэродинамики самолетов, гидродинамики судов, где важно добиться малых значений  $y^+$  на поверхности.

Для решения системы уравнений Навье–Стокса используется новый метод расщепления, который позволяет проводить расчеты движения жидкости и газа в широких пределах вариации числа Маха: в одной области расчета может присутствовать как гиперзвуковое течение, так и практически несжимаемое течение газа. Особенностью этого метода, примененного для совмещенной расчетной сетки (скорость и давление определены в центрах ячеек), является то, что перед началом расчета всех уравнений определяются скорости, удовлетворяющие закону сохранения массы на гранях ячеек (переносные скорости), а затем решаются все остальные уравнения, включая уравнения Навье–Стокса, с использованием этих переносных скоростей. В результате метод оказался совместим с методологией FlowVision расчета подвижных тел, контактных границ, скользящих поверхностей. Данная методология предполагает, что на каждом шаге по времени меняется конфигурация расчетной сетки, и скорости на гранях ячеек невозможно перенести с предыдущего шага. При этом неявная формулировка нового метода расщепления является устойчивой при расчете гиперзвуковых течений с шагами по времени, превышающими явный шаг в десятки раз. Для дозвуковых течений шаг по времени не зависит от локальной скорости звука.

Практически все течения жидкости и газа, реализующиеся в природе, в различных устройствах и около различных объектов, являются турбулентными. В ПК FlowVision имеется два подхода к моделированию турбулентности: URANS и прямое численное моделирование. Второй подход является крайне ресурсоемким и годится только для научных исследований. Подход URANS основан на использовании моделей турбулентности, рассчитывающих «дополнительную» турбулентную вязкость среды. В ПК FlowVision реализованы известные из литературы модели турбулентности:  $k-\varepsilon$  [Wilcox, 1994],  $k-\varepsilon$  [Abe, Kondoh, Nagano, 1994], SST  $k-\omega$  [Menter et al., 2003], модель Спаларта–Аллмараса [Wilcox, 1994], алгебраическая модель Смагоринского (см. [Гарбарук, Стрелец, Шур, 2012]). Помимо этого, реализована модель турбулентности собственной разработки:  $k-\varepsilon$  FlowVision [Аксенов, Жлуктов, Платов, 2013; Жлуктов, Аксенов, Карасёв, 2014; Жлуктов, Аксенов, Карасёв, 2016]. Данная модель позволяет моделировать байпасный ламинарно-турбулентный переход. Она может использоваться как в низкорейнольдсовых, так и в высокорейнольдсовых расчетах. Напомним, что низкорейнольдсовыми называются расчеты на подробных сетках (разрешающих ламинарный подслой) без использования пристеночных функций. Высокорейнольдсовыми называются расчеты на относительно грубых сетках (не разрешающих ламинарный подслой) с использованием пристеночных функций. Пристеночные функции — это предопределенные профили касательной составляющей скорости, коэффициента турбулентной вязкости и турбулентных характеристик течения, например турбулентной энергии  $k$  и скорости ее диссипации  $\varepsilon$ . Высокорейнольдсовые расчеты в ПК FlowVision можно проводить с использованием стандартных пристеночных функций (см. [Гарбарук, Стрелец, Шур, 2012]) и пристеночных функций FlowVision собственной разработки [Жлуктов и др., 2010; Жлуктов, Аксенов, 2015]. Турбулентный теплоперенос можно мо-

делировать, полагая турбулентное число Прандтля ( $Pr_t$ ) постоянным или переменным. В первом случае значение  $Pr_t$  задается в интерфейсе FlowVision. Во втором случае в интерфейсе выбирается  $k_\theta - \varepsilon_\theta$  модель [Abe, Kondoh, Nagano, 1995] или  $k_\theta - \varepsilon_\theta$  модель [Sommer, So, Zhang, 1993]. Помимо этого, в ПК FlowVision реализована  $k_\theta - \varepsilon_\theta$  модель собственной разработки [Осипов и др., 2012; Рогожкин, 2014 (1); Рогожкин, 2014 (2)], предназначенная для моделирования турбулентного переноса тепла в металлических теплоносителях.

Для решения систем линейных алгебраических уравнений (СЛАУ) применяется решатель TParFBSS типа GMRES, использующий предобуславливатель собственной разработки [Харченко, 2011; Аксенов и др., 2009; Сушко, Харченко, 2009; Якушев и др., 2012]. Этот решатель достаточно универсален и мощен, чтобы решать задачи для плохо обусловленных матриц. Для расчета нестационарных задач, где на каждом шаге по времени есть хорошее приближение с предыдущего шага, такой метод не всегда оптимален с точки зрения затрат ресурсов компьютера. При решении подобных задач с целью сокращения времени расчета в ПК FlowVision используется решатель типа AMG (алгебраический многосеточный) в двух версиях — агрегативный и селективный [Силаев и др., 2016]. Причем все реализованные решатели применяются последовательно. Сначала — агрегативный AMG. Если он не смог довести невязку решения до нужного уровня, применяется селективный AMG, а после него уже TParFBSS. Такой подход позволяет не заботиться о переключении между решателями для гарантированного получения решения матричных уравнений.

Для отслеживания перемещения контактных границ, разделяющих несмешиваемые жидкости, применяется усовершенствованный метод VOF, в котором используется подсеточное разрешение объемов жидкости, размер которых меньше размеров расчетных ячеек. Это позволяет добиться консервативности метода VOF. В методе VOF, реализованном в ПК FlowVision, ячейки сетки, через которые проходит контактная поверхность, являются расчетными (в отличие от оригинального метода VOF, в котором в эти ячейки данные экстраполируются из «жидких» ячеек). Контактная поверхность, восстановленная на базе функции VOF, разрезает поверхностные ячейки на 2 (для области расчета, содержащей две фазы). Далее на контактной границе между двумя фазами вводятся граничные условия: кинематическое условие (нормальная скорость обеих фаз на границе совпадает) и динамическое граничное условие (равенство давления и силы трения на границе). Для остальных переменных ставятся граничные условия равенства потоков этих величин. Континуальные фазы, рассчитываемые таким способом, имеют разные уравнения состояния и разный набор уравнений, описывающих их динамику. Более того, характерные числа Маха также могут быть разными для обеих фаз. Ниже будет продемонстрировано решение задачи о посадке спускаемого космического аппарата на воду. В этой задаче сверхзвуковые струи газа взаимодействуют с водой, которая течет при существенно малых числах Маха и имеет плотность на 3 порядка превышающую плотность газа. Такой подход отслеживания движения контактной или свободной поверхности дает очень хорошие результаты при численном исследовании ходкости судов. В этих задачах точность определения положения свободной поверхности, особенно при больших числах Фруда, решающим образом влияет на точность расчета ходовых характеристик судна [Аксенов и др., 2013; Печенюк, 2014; Aksenov et al., 2016].

Для моделирования многофазных течений с частицами (твердыми, жидкими, газообразными) в ПК FlowVision реализован оригинальный дисперсный солвер. В основе алгоритма — модель взаимопроникающих континуумов (подход «Эйлер–Эйлер»). В то же время данный инструмент позволяет решать задачи, в которых частицы присутствуют только в некоторой части расчетной области. С его помощью были успешно решены задачи струйного напыления порошка на металлическую поверхность, движения облака капель в газовой среде, всплытия пузырьковой колонны в жидкой среде. В подобных задачах всегда учитывается взаимное влияние сплошной и дисперсной фаз: обмен импульсом (силовое взаимодействие), энергией (теплообмен) и массой (испарение капель, сублимация твердых частиц). Дисперсный солвер FlowVision «стыкуется» со всеми пятью реализованными в ПК FlowVision моделями горения и, таким об-

разом, предоставляет пользователю возможность моделировать испарение и горение дисперсного топлива.

Есть ряд задач, в которых требуется моделирование физических процессов, не реализованных в ПК FlowVision. Примером является задача о взаимодействии жидкости и конструкции. Для решения подобных задач во FlowVision предусмотрена возможность подключения внешних конечно-элементных решателей. В настоящий момент реализовано подключение к FlowVision следующих конечно-элементных программ, рассчитывающих напряженно-деформируемое состояние конструкций: SIMULIA Abaqus, MSC Nastran, Fidesys, АПН WinMachine. В настоящей работе приведено моделирование движения крови в сердце с учетом работы клапанов. Сердечная мышца моделировалась в SIMULIA Abaqus.

## Решение некоторых практических задач

### *Моделирование приводнения возвращаемого космического аппарата*

В настоящее время в РКК «Энергия» разрабатывается новый космический корабль «Федерация» [Антонова и др., 2014]. Возвращаемый аппарат (ВА) корабля «Федерация» в штатном случае осуществляет мягкую посадку на земную поверхность с использованием парашютно-реактивной системы и посадочных устройств [Аксенов и др., 2015]. В нештатных ситуациях возможна посадка ВА на водную поверхность. В этом случае возникает необходимость определения гидродинамических воздействий на ВА при его касании водной поверхности и в процессе погружения в водную среду, а также исследования динамики поведения аппарата в последующие моменты времени.

При создании пилотируемых кораблей «Союз» и Apollo проблемы приводнения решались экспериментальным способом. Корабль Apollo приводнялся в штатном режиме, поэтому для него проводился большой объем экспериментальных исследований, а также было проведено (но уже недавно) численное моделирование [Wang et al., 2007].

Возвращаемый аппарат корабля «Федерация» показан на рис. 1. Схематично он представляет собой усеченный конус со сферическим дном. Аппарат снабжен твердотопливным двигателем тяги с восемью косо срезанными соплами вертикального торможения и четырьмя соплами горизонтального торможения, расположенными на боковой конической поверхности ВА.



Рис. 1. Общий вид возвращаемого аппарата космического корабля «Федерация» (фото с сайта РКК «Энергия»)

При моделировании посадки ВА на воду возникает задача о движении двух фаз — жидкости и газа, причем обе фазы существенно отличаются по плотности (примерно в 1000 раз) и течение в этих фазах происходит при различных числах Маха. Истечение продуктов сгорания топлива из сопел происходит при высокой температуре и при высоком давлении. Это усложняет задачу по сравнению с задачей свободного падения ВА в воду. При расчетах в ПК FlowVision производится некоторое упрощение постановки задачи: считается, что при контакте горячего газа с водой вода не кипит и не испаряется, а только нагревается.

В результате численного моделирования получены нагрузки, действующие на ВА, угловые и линейные скорости ВА, положение ВА в пространстве, конфигурация волн, окружающих ВА. При движении аппарата к поверхности воды струи двигателя формируют каверны в воде. При этом возникают как крупные волны, так и достаточно мелкая рябь, связанная с неустойчивостью поверхности раздела «вода–воздух» (рис. 2). На рис. 2 показана поверхность воды, векторами скорости показаны струи горячего газа, идущие от двигателей торможения ВА. При достижении поверхности воды (отметки нулевого уровня водораздела) двигатель отключается, и аппарат начинает двигаться под действием собственного веса и выталкивающей силы воды. В момент выключения ДУ при определенных углах наклона аппарата к горизонту под ним может образоваться достаточно значительная каверна высотой в несколько метров, в которую аппарат «сваливается». Также может возникнуть волна, созданная струями ДУ. После выключения ДУ аппарат начинает пассивно двигаться в водной среде (рис. 2, в, г).

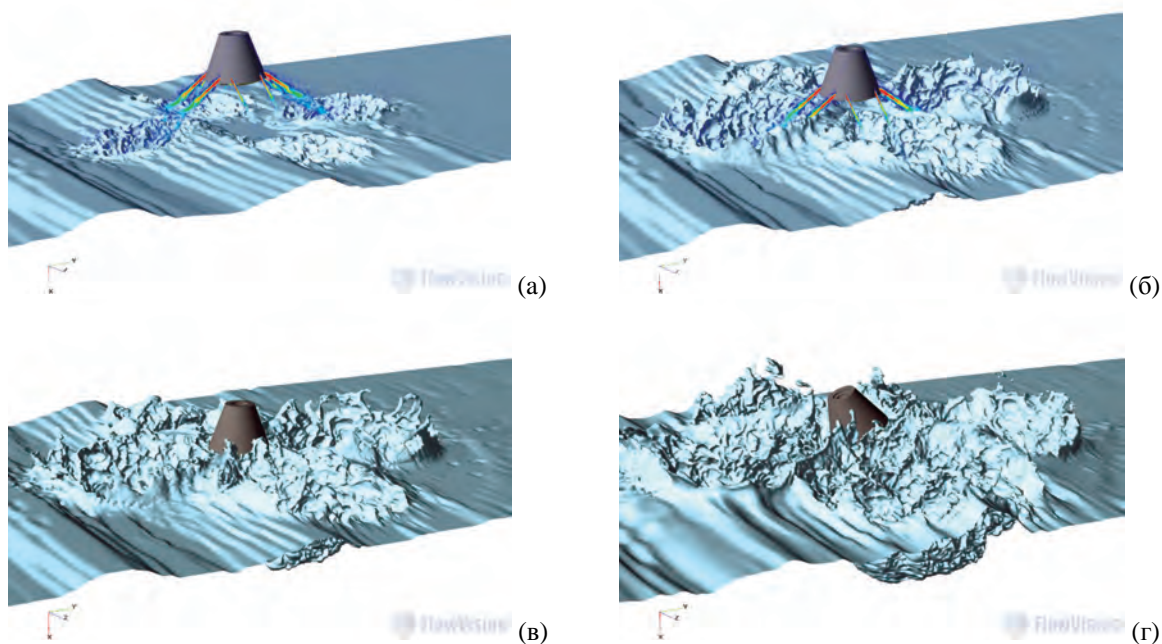


Рис. 2. Приводнение возвращаемого аппарата корабля «Федерация»: а) формирование струями каверн в начале торможения; б) формирование струями каверн перед выключением ДУ; в, г) положение ВА в разные моменты времени после выключения ДУ и погружения ВА в воду

Решение такой сложной задачи позволяет определить характеристики движения ВА при штатном приводнении, определить, как должна работать ДУ при приводнении, ее моменты включения-выключения, темп изменения тяги и другие характеристики.

### *Моделирование работы живого сердца*

Сегодня кардиососудистые заболевания являются первой причиной смерти человека. К 2030 году число случаев смерти, связанных с сердечно-сосудистыми заболеваниями, достигнет 23,3 млн чел. в год [Noutchie, 2005]. Отсутствие реалистичных моделей человеческих орга-

нов, в частности человеческого сердца, не позволяет предсказывать поведение органов при врожденной или приобретенной патологии или после хирургического вмешательства. Применение численных методов моделирования движения крови в человеческом сердце делает возможным разработать или испытать искусственные клапаны или методы хирургического лечения до реальной операции, тем самым провести операцию наиболее оптимальным способом и избежать ошибок. Кроме того, применение численного моделирования позволит проанализировать работу сердца в экстремальных условиях, определив резервы человеческого организма.

Один цикл работы сердца включает 2 фазы: (1) диастолу (наполнение желудочка) и (2) систолу (сжатие желудочка). Во время диастолы сердце расслабляется и наполняется кровью. Далее сердце сокращается и толкает кровь в аорты. Сердцебиение может показаться простым периодическим событием. Тем не менее это сложный ряд очень точных и согласованных событий, происходящих внутри и вокруг самого сердца.

В последние годы моделирование течения крови в сердце сделало большой шаг вперед и играет важную роль в исследовании функции сердца. Основная проблема моделирования гидродинамики сердца — это подвижные, сильно деформируемые стенки желудочков сердца. Для решения этой проблемы требуются особые методы моделирования. В настоящее время известно два подхода к моделированию сердца: на основе данных сканирования МРТ сердца и с помощью модели сокращения мышц сердца. Первый способ позволяет провести моделирование тока крови у реального пациента, второй же позволяет (по крайней мере, пока) моделировать процессы в модели человеческого сердца. Оба способа моделирования можно провести с использованием ПК FlowVision. Подробное описание технологии расчета потока крови сердца реального пациента в ПК FlowVision на базе сканирования МРТ представлено в [Vucinic et al., 2016]. В настоящей работе более подробно показано моделирование движения крови в сердце на основе конечно-элементной модели сердца, разрабатываемой компанией Dassault в рамках большого международного консорциума, поддержанного американской ассоциацией FDA.

Общий вид конечно-элементной модели живого сердца показан на рис. 3. Эта модель создана в программном комплексе Abaqus и состоит из электрической модели сердца (моделирование распространения электрических импульсов) и механической части, моделирующей сокращение и расслабление мышц, а также движение искусственных или «реальных» клапанов. Для моделирования течения крови необходима проточная часть сердца, то есть поверхность, омываемая кровью. Получить эту поверхность непросто, так как конечно-элементная модель состоит из набора конечно-элементных сеток, иногда пересекающихся друг с другом, а иногда имеющих зазоры. Для моделирования мышц это не представляет трудности, но для решателя CFD такая «дырявая» поверхность не подходит. Для решения проблемы в ПК FlowVision используется так называемая поверхность-партнер, или CFD-поверхность. Эта поверхность выделяется из конечно-элементной сетки как поверхность, омываемая кровью; она не имеет самопересечений и является замкнутой. Поверхность охватывает внутреннюю полость всего сердца, включая часть аорт и вен. CFD-поверхность отображается на конечно-элементную сетку таким образом, что рассчитанные силы, действующие на узлы CFD-поверхности, консервативно интерполируются на КЭ-сетку, а перемещения КЭ-сетки передаются на CFD-поверхность, ограничивающую область расчета FlowVision. Далее происходит расчет с двухсторонним сопряжением. CFD-поверхность деформируется сообразно сокращению сердца, что приводит к возникновению течения крови и изменению давления. Одновременно через CFD-поверхность на КЭ-сетку передаются силы.

На рис. 4 показано распределение скоростей в сердце в два различных момента времени. Видна деформация сердца. Видно, что модель сердца является достаточно подробной: в желудочках видны так называемые трабекулы, которые возникают на стенках желудочка во время систолы (сокращения).

Также видно, что кровь в сердце (рисунок с линиями тока крови) закручивается. Закрутка крови в желудочке играет чрезвычайно важную роль, так как позволяет эффективно вентилировать кровь в желудочках, избавляясь от застоя крови и, как следствие, атеросклероза сердца. Данное исследование вполне согласуется с данными работы [Bockeria et al., 2012].



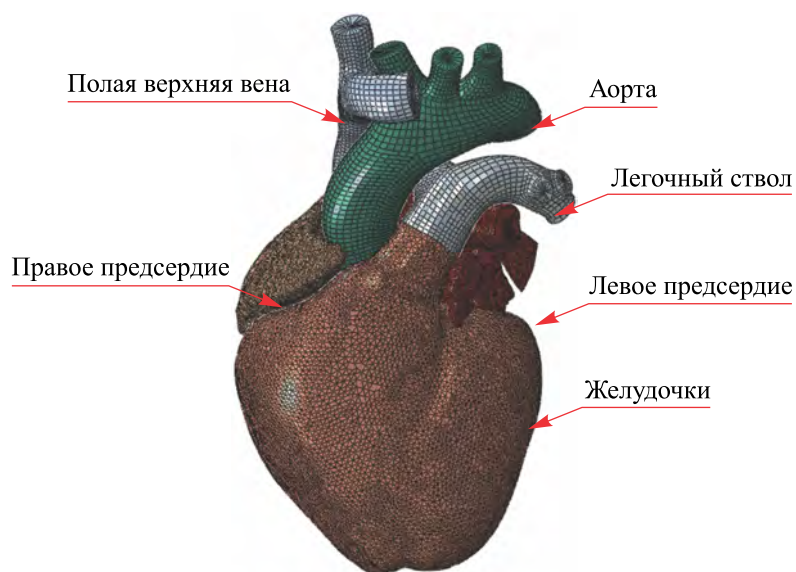


Рис. 3. Общий вид конечно-элементной модели живого сердца, включающей модель желудочков, предсердий и основных крупных сосудов, входящих и выходящих из сердца

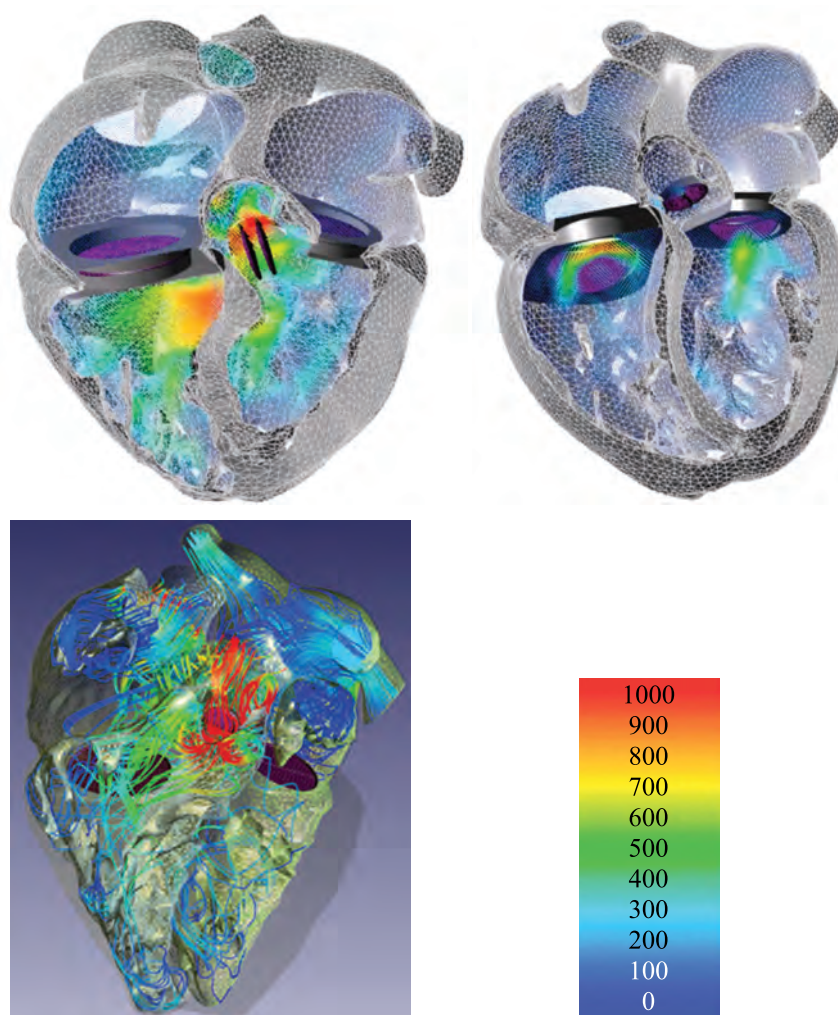


Рис. 4. Распределение скоростей и деформация сердца в различные моменты времени сердечного цикла, скорость в мм/с

## Заключение

В настоящей работе приведен общий обзор технологий, заложенных в программном комплексе FlowVision. Дан краткий обзор решаемых в ПК FlowVision задач. Представлено решение двух сложных актуальных задач: задачи посадки космического корабля на водную поверхность и задачи течения крови в модели живого человеческого сердца. В обеих задачах используются хорошо отработанные технологии ПК FlowVision, отличающие его от других промышленных и авторских программ вычислительной гидромеханики: метод расщепления по физическим процессам, позволяющий моделировать сжимаемые и несжимаемые течения; модифицированный метод VOF, позволяющий моделировать движение свободных (контактных) границ; технология подвижных тел, перемещающихся по неподвижной расчетной сетке; технология сопряжения с внешними конечно-элементными программами, позволяющая учитывать взаимодействие жидкости (газа) с моделями деформируемых технических конструкций и живых структур.

Автор благодарит Жлуктова С. В., Жаркову В. В. (ООО «ТЕСИС») и В. Зиебак (Ltd. CAPVIDIA) за помощь в написании статьи, а также РКК «Энергия» и Ан. А. Дядькина за обсуждение статьи и за возможность публикации некоторых результатов работ по моделированию посадки ВА на воду.

## Список литературы (References)

- Аксенов А. А.* Моделирование сильного взаимодействия жидкости и конструкции программным комплексом FlowVision-Abaqus // Труды конференции ПАВТ-2008, 28 января – 1 февраля 2008, СПб., Россия. — 2008.
- Aksenov A.* Modelirovanije sil'nogo vzaimodejstvija zhidkosti i konstruksii programmnyim kompleksom FlowVision-Abaqus [Simulating strong fluid-structure interaction by FlowVision-ABAQUS codes] // Trudy konferentsii PAVT-2008 [Proceedings of PAVT-2008 conference], 28 January – 1 February 2008, St.-Petersburg, Russia. — 2008 (in Russian).
- Аксенов А. А., Гудзовский А. В., Дядькин А. А., Тишин А. П.* Смешение газов при вдуве низконапорной струи в поперечный поток // Известия Российской академии наук. Сер. Механика жидкости и газа. — 1996. — № 3. — С. 67–74.
- Aksenov A. A., Gudzovskiy A. V., Dyadkin A. A., Tishin A. P.* Smesheniye gazov pri vduve nizko-napornoj strui v poperechnyj potok [Gas mixing in injection of low-pressure jet into transversal flow] // Izvestiya Rossijskoj akademii nauk. Ser. Mekhanika zhidkosti i gaza [Proceedings of Russian Academy of Science. Mechanics of fluid and gas]. — 1996. — No. 3. — P. 67–74 (in Russian).
- Аксенов А. А., Дерюгин Ю. Н., Дядькин А. А., Жлуктов С. В., Козелков А. С., Сушко Г. Н., Шишаева А. С.* Численное моделирование до- и сверхзвукового обтекания тел, произвольно движущихся друг относительно друга // Материалы XIII международного семинара «Супервычисления и математическое моделирование», ИПК ФГУП «РФЯЦ-ВНИИЭФ», 3–7 октября 2011, Саров, Россия. — 2011. — С. 26–39.
- Aksenov A. A., Deryugin Yu. N., Dyadkin A. A., Zhluktov S. V., Kozelkov A. S., Sushko G. N., Shishaeva A. S.* Chislennoje modelirovanije do- i sverkhzvukovogo obtekanija tel, proizvol'no dvizhuschihsja drug otnositel'no druga // Materialy XIII mezhdunarodnogo seminar "Supervychislenija i matematicheskoje modelirovanije" [Proceedings of XIII international seminar "Super-computations and mathematical modeling"], FSUE RFNC – VNIIEF, 3–7 October 2011, Sarov, Russia. — 2011. — P. 26–39 (in Russian).
- Аксенов А. А., Дядькин А. А., Москалев И. В., Петров Н. К., Симакова Т. В.* Компьютерное моделирование течения и относительного движения возвращаемого аппарата и крышки люка парашютного контейнера в процессе их разделения на участке спуска // Космическая техника и технологии. — 2015. — Т. 9, № 2. — С. 39–50.
- Aksenov A. A., Dyadkin A. A., Moskalev I. V., Petrov N. K., Simakova T. V.* Kompyuternoje modelirovanije techenija i otnositel'nogo dvizhenija vozvrashaemogo apparata i kryshki lyuka parashutnogo kontejnera v processe ih razdelenija na uchastke spуска [Computer simulation of flow and relative motion of reentry vehicle and hatch cover in the course of their separation at the descent phase] // Kosmicheskaja tehnika i tehnologii [Space hardware and technologies]. — 2015. — Vol. 9, no. 2. — P. 39–50 (in Russian).

- Аксенов А. А., Дядькин А. А., Харченко С. А.* Исследование эффективности распараллеливания расчета движения подвижных тел и свободных поверхностей в FlowVision на компьютерах с распределенной памятью // Вычислительные методы и программирование. — 2009. — Т. 10, № 1.  
*Aksenov A. A., Dyadkin A. A., Kharchenko S. A.* // Issledovanie effektivnosti rasparallelevaniia rascheta dvizheniia podvizhnykh tel i svobodnykh poverkhnostei v FlowVision na kompiuterakh s raspredelennoi pamiatiu [Investigation of parallelization effectiveness for calculation of motion of moving bodies and free surfaces in FlowVision on computers with shared memory] // Vychislitel'nyje metody i programmirovaniye [Numerical methods and programming]. — 2009. — Vol. 10, no. 1 (in Russian).
- Аксенов А. А., Коньшин В. Н.* Новые возможности САЕ-системы FlowVision // САПР и графика. — 2002. — № 11 (ноябрь).  
*Aksenov A. A., Konshin V. N.* New capabilities of CAE-system FlowVision // J. SAPR and grafika [J. CAD systems and graphics]. — 2002. — No. 11 (in Russian).
- Аксенов А. А., Коньшин В. Н.* Применение программного комплекса FlowVision для проектирования авиакосмических конструкций // САПР и графика. — 2004. — № 11 (ноябрь).  
*Aksenov A. A., Konshin V. N.* Applying CFD code FlowVision for aerospace design // J. SAPR and grafika [J. CAD systems and graphics]. — 2004. — No. 11 (in Russian).
- Аксенов А. А., Коньшин В. Н.* Анализ задач взаимодействия «жидкость – конструкция» с использованием программных комплексов ABAQUS и FlowVision // САПР и графика. — 2006. — № 9 (сентябрь).  
*Aksenov A. A., Konshin V. N.* Modeling fluid-structure interaction problems with using codes ABAQUS and FlowVision // J. SAPR and grafika [J. CAD systems and graphics]. — 2006. — No. 9 (in Russian).
- Аксенов А. А., Жлуктов С. В., Петров А. С., Печенюк А. В., Станков Б. Н.* Программный комплекс FlowVision как современный инструмент проектирования судовых обводов // Ж. Судостроение. — 2013. — № 4.  
*Aksenov A. A., Zhluktov S. V., Petrov A. S., Pechenyuk A. V., Stankov B. N.* Programmnyj kompleks FlowVision kak sovremennyy instrument proektirovaniya sudovykh obvodov [Software FlowVision as modern instrument for engineering design of ship outlines] // J. Sudostroeniye [J. Ship-building]. — 2013. — No. 4 (in Russian).
- Аксенов А. А., Жлуктов С. В., Платов С. А.* Численное моделирование ламинарно-турбулентного перехода на корпусе судна в программном комплексе FlowVision // Ж. Судостроение. — 2013. — № 4.  
*Aksenov A. A., Zhluktov S. V., Platov S. A.* Chislennoye modelirovaniye laminarno-turbulentnogo perekhoda na korpuse sudna v programmnom komplekse FlowVision [Numerical simulation of laminar-turbulent transition on ship hull in software FlowVision] // J. Sudostroeniye [J. Ship-building]. — 2013. — No. 4 (in Russian).
- Аксенов А. А., Жлуктов С. В., Кудимов Н. Ф., Сон Э. Е., Таран М. Д., Третьякова О. Н., Шишаева А. С.* О моделировании сложного теплообмена в силовых трансформаторах большой мощности // Известия Российской академии наук. Сер. Энергетика. — 2013. — № 2. — С. 131–140.  
*Aksenov A. A., Zhluktov S. V., Kudimov N. F., Son E. E., Taran M. D., Tret'yakova O. N., Shishaeva A. S.* O modelirovanii slozhnogo teploobmena v silovykh transformatorah bol'shoj moschnosti [About modeling complex heat exchange in main transformers of high power] // Izvestiya Rossijskoj akademii nauk. Ser. Mekhanika zhidkosti i gaza. [Proceedings of Russian Academy of Science. Power Industry]. — 2013. — No. 2. — P. 131–140 (in Russian).
- Аксенов А. А., Шишаева А. С.* Моделирование взаимодействия деформируемой конструкции с потоком жидкости с использованием пристенных демпфирующих коэффициентов // Вычислительные методы и программирование. — 2010. — Т. 11. — С. 366–372.  
*Aksenov A. A., Shishaeva A. S.* Modelirovaniye vzaimodejstvija deformiruemoj konstruksii s potokom zhidkosti s ispol'zovaniem pristennykh dempfiruyuschih koeffitsientov [Modeling interaction between deformable structure and fluid flow with use of near-wall damping coefficients] // Vychislitel'nyje metody i programmirovaniye [Numerical methods and programming]. — 2010. — Vol. 11. — P. 366–372 (in Russian).
- Аксенов А. А., Шмелев В. В., Сафронов П. В., Ледовских Ю. П.* Применение программного комплекса FlowVision для моделирования режимов глиссирования самолета-амфибии // Ж. САПР и графика. — 2007. — № 3. — С. 93–96.  
*Aksenov A. A., Shmelev V. V., Safronov P. V., Ledovskih Yu. P.* Primeneniye programmnogo kompleksa FlowVision dlja modelirovaniya rezhimov glissirovaniya samoleta-amphibii [Implementation of FlowVision software for simulation of hydroplaning regimes for amphibian airplane] // J. SAPR and grafika [J. CAD systems and graphics]. — 2007. — No. 3. — P. 93–96 (in Russian).

- Аксенов А. А., Шмелев В. В., Смирнова М. Л., Банкрутенко В. В., Нетронин И. В., Будников А. В., Рогожкин С. А. Сертификация системы моделирования движения жидкости и газа FlowVision // САПР и графика. — 2006. — № 4.  
*Aksenov A. A., Shmelev V. V., Smirnova M. L., Bankrutenko V. V., Netronin I. V., Budnikov A. V., Rogozhkin S. A. Serifikatsija sistemy modelirovanija dvizhenija zhidkosti i gaza FlowVision [Certificating system for modeling gas and fluid motion FlowVision] // SAPR and grafika [CAD systems and graphics]. — 2006. — No. 4 (in Russian).*
- Антонова Н. П., Брюханов Н. А., Четкин С. В. Средства посадки пилотируемого транспортного корабля нового поколения // Космическая техника и технологии. — 2014. — Т. 7, № 4. — С. 21–30.  
*Antonova N. P., Bryukhanov N. A., Chetkin S. V. Sredstva posadki pilotiruемого transportnogo korablja novogo pokolenija [Landing facilities of manual transport spacecraft of new generation] // Kosmicheskaja tehnika i tehnologii [Space hardware and technologies]. — 2014. — Vol. 7, no. 4. — P. 21–30 (in Russian).*
- Гарбарук А. В., Стрелец М. Х., Шур М. Л. Моделирование турбулентности в расчетах сложных течений: учеб. пособие. — СПб.: Издательство Политехнического университета. — 2012. — 88 с.  
*Garbaruk A. V., Strelets M. Kh., Shur M. L. Modelirovanie turbulentnosti v raschetah slozhnyh techenij: Text-book. — St.-Petersburg: Publishing house of Polytechnic University. — 2012. — 88 p. (in Russian).*
- Гарипов А. О., Аксёнов А. А., Шмелев В. В. Аварийное приводнение можно моделировать // Российский информационный технический журнал «Вертолет». — 2008. — № 1. — С. 14–17.  
*Garipov A. O., Aksenov A. A., Schmelev V. V. Avarijnoe privodnenije možno modelirovat' [Emergency splash-down can be simulated] // Rossiiskij informatsionnyi technicheskij zhurnal "Vertolet" [Russian information technical journal "Helicopter"]. — 2008. — No. 1. — P. 14–17 (in Russian).*
- Евграфова А. В., Попова Е. Н., Сухановский А. Н. Поток углового момента во вращающемся слое с локализованным нагревом // Вычислительная механика сплошных сред. — 2016. — Т. 9, № 4. — С. 498–508.  
*Evgrafova A. V., Popova E. N., Sukhanovskii A. N. Fluxes of angular momentum in a rotating layer with localized heat source // Computational continuum mechanics. — 2016. — Vol. 9, no 4. — P. 498–508 (in Russian).*
- Жестков М. Н., Похилко В. И., Шмелев В. В. Моделирование работы и определение эксплуатационных характеристик компрессоров, турбин, вентиляторов с помощью программного комплекса FlowVision // САПР и графика. — 2015. — № 1 (январь). — С. 21–24.  
*Zhestkov M. N., Pokhilko V. I., Shmelev V. V. Modelirovanije raboty i opredelenije ekspluatatsionnyh characteristic kompressorov, turbin, ventiljatorov s pomosh'ju programmnogo kompleksa FlowVision [Simulation of operation of compressors, turbines, fans and definition of their performance characteristics with use of FlowVision software] // SAPR and grafika [CAD systems and graphics]. — 2015. — No. 1. — P. 21–24 (in Russian).*
- Жлуктов С. В., Аксёнов А. А., Карасёв П. И. Моделирование байпасного ламинарно-турбулентного перехода в рамках  $k$ - $\epsilon$  подхода // Компьютерные исследования и моделирование. — 2014. — Т. 6, № 6. — С. 879–888.  
*Zhluktov S. V., Aksenov A. A., Karasev P. I. Modelirovanije baipasnogo laminarno-turbulentnogo perekhoda v ramkah  $k$ - $\epsilon$  podkhoda [Simulation of bypass laminar-turbulent transition within  $k$ - $\epsilon$  approach] // Kompjuternye Issledovanija i Modelirovanije [Computer Research and Modeling]. — 2014. — Vol. 6, no. 6. — P. 879–888 (in Russian).*
- Жлуктов С. В., Аксёнов А. А. Пристеночные функции для высокорейнольдсовых расчетов в программном комплексе FlowVision // Компьютерные исследования и моделирование. — 2015. — Т. 7, № 6. — С. 1221–1239.  
*Zhluktov S. V., Aksenov A. A. Pristenochnye funkicii dlja vysoko-reynoldsovyh raschetov v programmnom komplekse FlowVision [Wall functions for high-Reynolds calculations in FlowVision software] // Kompjuternye Issledovanija i Modelirovanije [Computer Research and Modeling]. — 2015. — Vol. 7, no. 6. — P. 1221–1239 (in Russian).*
- Жлуктов С. В., Аксёнов А. А., Карасёв П. И. Моделирование отрывного течения с использованием двухпараметрической модели турбулентности // Компьютерные исследования и моделирование. — 2016. — Т. 8, № 1. — С. 79–88.  
*Zhluktov S. V., Aksenov A. A., Karasev P. I. Modelirovanije otryvnogo techenija s ispol'zovaniem dvuhparametricheskoj modeli turbulentnosti [Simulation of separation flow using two-parametric turbulence model] // Kompjuternye Issledovanija i Modelirovanije [Computer Research and Modeling]. — 2016. — Vol. 8, no. 1. — P. 79–88 (in Russian).*
- Жлуктов С. В., Аксёнов А. А., Харченко С. А., Москалёв И. В., Сушко Г. Б., Шишаева А. С. Моделирование отрывных течений в программном комплексе FlowVision-HPC // Вычислительные методы и программирование. — 2010. — Т. 11. — С. 234–245.

- Zhlyuktov S. V., Aksenov A. A., Kharchenko S. A., Moskalev I. V., Sushko G. B., Shishaeva A. S.* Modelirovanije otrvnyh techenij v programmnom komplekse FlowVision-HPC [Simulation of separating flows in software FlowVision-HPC] // Vychislitel'nyje metody i programmirovanije [Numerical methods and programming]. — 2010. — Vol. 11. — P. 234–245 (in Russian).
- Лукьянова И. Э., Шмелев В. В.* Возможности FlowVision в построении моделей для исследования процессов удаления отложений в нефтяных резервуарах // САПР и ГРАФИКА. — 2006. — № 3 (март). — С. 90–94.
- Lukjanova I. E., Shmelev V. V.* Vozmozhnosti FlowVision v postrojenii modelej dlja issledovanija processov udaleniya otlozhenij v nefjnyh rezervuarah [Simulation of operation of compressors, turbines, fans and definition of their performance characteristics with use of FlowVision software] // SAPR and grafika [CAD systems and graphics]. — 2006. — No. 3. — P. 90–94 (in Russian).
- Осипов С. Л., Рогожкин С. А., Фадеев И. Д., Шепелев С. Ф., Жлуктов С. В., Сазонова М. Л.* Разработка и реализация в ПК FlowVision модели турбулентного теплопереноса // Сборник докладов научно-технического семинара «Проблемы верификации и применения CFD кодов в атомной энергетике». — Н. Новгород: ОАО «ОКБМ Африкантов», 2012. — С. 874–882.
- Osipov S. L., Rogozhkin S. A., Fadeev I. D., Shepelev S. F., Zhlyuktov S. V., Sazonova M. L.* Razrabotka i realizatsija v PK FlowVision modeli turbulentnogo teploperenosa [Development and implementation of model for turbulent heat transfer in FlowVision software] // Sbornik dokladov nauchno-tehnicheskogo seminar "Problemy verifikatsii i primeneniya SFD kodov v atomnoj energetike [Proceedings of scientific and technical seminar "Problems of verification and using CFD codes in nuclear power generation"]. — N. Novgorod: JSC "OKBM Afrikantov", 2012. — P. 874–882 (in Russian).
- Осипов С. Л., Рогожкин С. А., Шепелев С. Ф., Сазонова М. Л., Шмелев В. В.* Опыт применения и проблемы верификации CFD-кодов в проектах реакторов БН // Сборник докладов научно-технического семинара «Проблемы верификации и применения CFD-кодов в атомной энергетике». — Н. Новгород: ОАО «ОКБМ Африкантов», 2012. — С. 373–382.
- Osipov S. L., Rogozhkin S. A., Shepelev S. F., Sazonova M. L., Shmelev V. V.* Opyt primeneniya i problemy verifikatsii CFD-kodov v proektah reaktorov BN [Experience of use and problems of verifying CFD-codes in fast reactor projects] // Sbornik dokladov nauchno-tehnicheskogo seminar "Problemy verifikatsii i primeneniya CFD kodov v atomnoj energetike [Proceedings of scientific and technical seminar "Problems of verification and using CFD codes in nuclear power generation"]. — N. Novgorod: JSC "OKBM Afrikantov", 2012. — P. 373–382 (in Russian).
- Печенюк А. В.* Эталонное тестирование ПК FlowVision в задаче моделирования обтекания судна // Компьютерные исследования и моделирование. — 2014. — Т. 6, № 6. — С. 890–899.
- Pechenyuk A. V.* Etalonnoje testirovanije PK FlowVision v zadache modelirovanija obtokanija sudna [Benchmarking of FlowVision software in ship flow simulation] // Kompjuternye issledovanija i modelirovanije [Computer Research and Simulation]. — 2014. — Vol. 6, no. 6. — P. 890–899 (in Russian).
- Пугач К. С.* Доводка поля температур на выходе из малоэмиссионной камеры сгорания методами трехмерного моделирования // Компьютерные исследования и моделирование. — 2014. — Т. 6, № 6. — С. 901–909.
- Pugach K. S.* Dovodka polja temperature na vyhode iz maloemissionnoj kamery sgoranija metodami triohmernogo modelirovanija [Engineering follow-up of temperature distribution at the exit from low emission combustor using methods of 3D simulation] // Kompjuternye issledovanija i modelirovanije [Computer Research and Modeling]. — 2014. — Vol. 6, no. 6. — P. 901–909 (in Russian).
- Рафиков С. К., Аллаяргов У. Э.* Особенности использования программного продукта FlowVision для исследования гидродинамических параметров трубопроводов систем налива нефтепродуктов // 60-я научно-техническая конференция студентов, аспирантов и молодых ученых: материалы конференции. — Уфа: Изд-во УГНТУ, 2009. — С. 81–82.
- Rafikov S. K., Allajarov U. E.* Osobennosti ispol'zovanija programmnogo produkta FlowVision dlja issledovanija gidrodinamicheskikh parametrov truboprovodov system naliva nefteproduktov [Peculiarities of using software product FlowVision for investigation of hydrodynamic parameters of pipelines in oil-loading systems] // Proceedings of 60-th sci-tech conference of students, graduate students and young scientists. — Ufa: Publishing house of Ufa State Oil Technical University, 2009. — P. 81–82 (in Russian).
- Рогожкин С. А., Аksenov А. А., Жлуктов С. В., Осипов С. Л., Фадеев И. Д., Шапоренко Е. В., Шепелев С. Ф., Шмелев В. В.* Использование URANS подхода для определения пульсаций температуры при перемешивании трех разнотемпературных струй натрия // Компьютерные исследования и моделирование. — 2014. — Т. 6, № 6. — С. 923–936.
- Rogozhkin S. A., Aksenov A. A., Zhlyuktov S. V., Osipov S. L., Fadeev I. D., Shaporenko E. V., Shepelev S. F., Shmelev V. V.* Ispol'zovanije URANS podhoda dlja opredelenija pul'satsij temperatury pri peremeshivanii treh raznotem-

- peraturnykh struj natrija [Using URANS approach for calculation of temperature pulsations in mixing three sodium streams of different temperatures] // *Kompyuternye issledovaniya i modelirovaniye* [Computer Research and Modeling]. — 2014. — Vol. 6, no. 6. — P. 879–888 (in Russian).
- Рогожкин С. А., Аксенов А. А., Жлуктов С. В., Осипов С. Л., Сазонова М. Л., Фадеев И. Д., Шепелев С. Ф., Шмелев В. В.* Разработка модели турбулентного теплопереноса для жидкометаллического натриевого теплоносителя и ее верификация // *Вычислительная механика сплошных сред*. — 2014. — Т. 7, № 3. — С. 306–316.
- Rogozhkin S. A., Aksenov A. A., Zhluktov S. V., Osipov S. L., Sazonova M. L., Fadeev I. D., Shepelev S. F., Shmelev V. V.* Razrabotka modeli turbulentnogo teploperenosa dlja zhidkometallicheskogo natrievogo teplonositelja i ejo verifikatsija [Development of model for turbulent heat transfer in liquid sodium coolant and its verification] // *Computational mechanics of continuous media*. — 2014. — Vol. 7, no. 3. — P. 306–316 (in Russian).
- Рогожкин С. А., Осипов С. Л., Фадеев И. Д., Шепелев С. Ф., Аксенов А. А., Жлуктов С. В., Сазонова М. Л., Шмелев В. В.* Численное моделирование теплогидравлических процессов в верхней камере быстрого реактора // *Атомная энергия*. — 2013. — Т. 115, вып. 5. — С. 295–298.
- Rogozhkin S. A., Osipov S. L., Fadeev I. D., Shepelev S. F., Aksenov A. A., Zhluktov S. V., Sazonova M. L., Shmelev V. V.* Chislennoje modelirovanie teplogidravlicheskih processov v verhney kamere bystrogo reaktora [Numerical simulation of thermo-hydraulic processes in upper chamber of fast reactor] // *Atomnaja energija* [Atomic energy]. — 2013. — Vol. 115, issue 5. — P. 295–298 (in Russian).
- Силаев Д. П., Харченко С. А., Ющенко А. А.* Параллельная реализация алгебраического многосеточного метода с адаптивным выбором алгоритма огрубления для решения разреженных СЛАУ в программном комплексе FlowVision // XVI Международная конференция «Супервычисления и математическое моделирование»: тезисы. — Саров, 2016. — С. 109–110.
- Silaev D. P., Kharchenko S. A., Yuschenko A. A.* Parallel'naja realizatsija algebraicheskogo mnogosetochnoho metoda s adaptivnym vyborom algoritma ogrublenija dlja reshenija razrezhennykh SLAU v programmnom komplekse FlowVision [Parallel implementation of algebraic multi-grid method including adaptive selection of coarsening algorithm for solving sparse linear algebraic equations in software FlowVision] // XVI Mezhdunarodnaja konferentsija: "Supervychislenija i matematicheskoje modelirovaniye": tezisy [XVI International conference "Super-computations and mathematical modeling": abstracts]. — Sarov, 2016. — P. 109–110 (in Russian).
- Сушко Г. Б., Харченко С. А.* Экспериментальное исследование на СКИФ МГУ «Чебышев» комбинированной MPI+threads реализации алгоритма решения систем линейных уравнений, возникающих во FlowVision при моделировании задач вычислительной гидродинамики // Труды конференции ПАВТ-2008, Н. Новгород, Россия, 30 марта – 3 апреля 2009. — Челябинск: Изд. УрГУ, 2009. — С. 316–324.
- Sushko G. B., Kharchenko S. A.* Experimental investigation of MPI+threads implementation of algorithm for solving systems of linear equations, occurring in solving CFD problems, performed on super-computer SKIF MSU // *Trudy konferentsii PAVT-2008* [Proceedings of PAVT-2008 conference], N. Novgorod, Russia, 30 March – 3 April 2009. — Chelyabinsk: Publishing house of South-Ural State University, 2009. — P. 316–324 (in Russian).
- Фирсов А. А., Исаенков Ю. И., Крупский М. Г., Рудаков В. Ю., Филимонова Е. А., Яранцев Д. А., Леонов С. Б.* Неравновесная инициализация объемного горения в двигателе внутреннего сгорания: моделирование и постановка эксперимента // *Компьютерные исследования и моделирование*. — 2014. — Т. 6, № 6. — С. 911–922.
- Firsov A. A., Isaenkov Yu. I., Krupskiy M. G., Rudakov V. Yu., Filimonova E. A., Yarantsev D. A., Leonov S. B.* Neravnovesnaya inicializaciya ob'emnogo gorenija v dvigatele vnutrennego sgoraniya: modelirovanie i postanovka ehksperimenta [Nonequilibrium initiation of volumetric combustion in combustion engine: modeling and experimental setup] // *Kompyuternye issledovaniya i modelirovaniye* [Computer Research and Modeling]. — 2014. — Vol. 6, no. 6. — P. 911–922 (in Russian).
- Харченко С. А.* Высокоточный двухуровневый параллельный итерационный алгоритм решения плохообусловленных СЛАУ // Труды Международной суперкомпьютерной конференции «Научный сервис в сети Интернет: эксафлопное будущее», г. Новороссийск, Россия, 19–24 сентября 2011. — М.: Издательство МГУ, 2011. — С. 50–55.
- Kharchenko S. A.* Vysokotochnyj dvuhurovnevuyj parallel'nyj iteratsionnyj algoritm reshenija plohoobuslovlennykh SLAU [High-accuracy two-level parallel iterative algorithm for solving ill-conditioned systems of linear algebraic equations] // *Proceedings of International super-computer conference "Scientific service in Internet: exaflops future"*, Novorossiysk, Russia, 19–24 September 2011. — Moscow: MSU publishing house, 2011. — P. 50–55 (in Russian).

- Шепелев С. Ф., Осипов С. Л., Рогожкин С. А., Аксенов А. А., Сазонова М. Л., Ткаченко С. А., Шмелев В. В.* Численное моделирование движения теплоносителя в перспективном ядерном реакторе // Суперкомпьютерные технологии в науке, образовании и промышленности / Под ред. акад. В. А. Садовниченко, акад. Г. И. Савина, чл.-корр. РАН Вл. В. Воеводина. — М.: Издательство МГУ, 2012. — 232 с.
- Shepelev S. F., Osipov S. L., Rogozhkin S. A., Aksenov A. A., Sazonova M. L., Tkachenko S. A., Shmelev V. V.* Chislennoe modelirovaniye dvizheniya teplonositelja v perspektivnom jadernom reaktore [Numerical simulation of coolant motion in prospective nuclear reactor] // Superkompyuternyye tehnologii v nauke, obrazovanii i promyshlennosti [Super-computer technologies in science, education and industry] / Ed.: academician V. A. Sadovnichiy, academician G. I. Savin, RAS corresponding member Vl. V. Voevodin. — Moscow: Publishing house of Moscow university, 2012. — 232 p. (in Russian).
- Шишаева А. С., Москалёв И. В., Жлуктов С. В., Аксёнов А. А., Бабий Ю. И., Егоров И. Н., Судачков В. Г.* Оптимизация положения элементов механизированного крыла с использованием программных комплексов FlowVision-НРС и IOSO // САПР и графика. — 2010. — № 9 (сентябрь). — С. 97–101.
- Shishaeva A. S., Moskalev I. V., Zhluktov S. V., Aksenov A. A., Babiy Yu. I., Egorov I. N., Sudakov V. G.* Optimizatsiya polozheniya elementov mekhanizirovannogo kryla s ispol'zovaniem programmykh kompleksov FlowVision-НРС i IOSO [Optimization of positions for the elements of mechanized wing using software FlowVision-НРС and IOSO] // SAPR and grafika [CAD systems and graphics]. — 2010. — No. 9 (September). — P. 97–101 (in Russian).
- Якушев В. Л., Симбиркин В. Н., Филимонов А. В., Новиков П. А., Коншин И. Н., Сушко Г. Б., Харченко С. А.* Решение плохообусловленных симметричных СЛАУ для задач строительной механики параллельными итерационными методами // Вестник Нижегородского университета им. Н. И. Лобачевского. — 2012. — Т. 1, № 4. — С. 238–246.
- Yakushev V. L., Simbirkin V. N., Filimonov A. V., Novikov P. A., Kon'shin I. N., Sushko G. B., Kharchenko S. A.* Reshenije plohoobuslovlennykh simmetrichnykh SLAU dlja zadach stroitel'noj mekhaniki parallel'nymi iteratsionnymi metodami [Solving ill-conditioned symmetric systems of linear algebraic equations for problems of construction mechanics with use of parallel iterative methods] // Vestnik Nizhegorodskogo universiteta N. I. Lobachevskogo [Herald of N. I. Lobachevskiy university in N. Novgorod]. — 2012. — Vol. 1, no. 4. — P. 238–246 (in Russian).
- Abe K., Kondoh T., Nagano Y.* A New Turbulence Model for Predicting Fluid Flow and Heat Transfer in Separating and Reattaching flows-I. Flow Field Calculation // Int. Journal of Heat and Mass Transfer. — 1994. — Vol. 37, no. 1. — P. 139–151.
- Abe K., Kondoh T., Nagano Y.* A New Turbulence Model for Predicting Fluid Flow and Heat Transfer in Separating and Reattaching flows-II. Thermal Field Calculation // Int. Journal of Heat and Mass Transfer. — 1995. — Vol. 38, no. 8. — P. 1467–1481.
- Aksenov A., Dyadkin A., Pokhilko V.* Overcoming of Barrier between CAD and CFD by Modified Finite Volume Method // Proc. 1998 ASME Pressure Vessels and Piping Division Conference, San Diego, ASME PVP. — 1998. — Vol. 377, no. 2. — P. 79–86.
- Aksenov A., Iliine K., Schelayev A., Garipov A., Luniewsky T., Shmelev V.* Modeling Fluid Structure Interaction for Aerospace Applications // Proceedings of 2007 Abaqus user conference. — France, Paris, 2007.
- Aksenov A., Dyadkin A., Luniewski T., Pokhilko V.* Fluid Structure Interaction analysis using Abaqus and FlowVision // Proceedings of 2004 Abaqus user conference. — USA, Boston, 2004.
- Aksenov A., Iliine K., Luniewski T., McArthy T., Popielas F., Ramkumar R.* Oil Leakage Through a Valve Stem Seal // Proceedings of 2005 Abaqus user conference. — Stockholm, 2005.
- Aksenov A., Iliine K., McArthy T., Popielas F., Ramkumar R.* Influence of Interaction Between Oil and Rubber on Valve Stem Seal Oil Leakage // Proceedings of 2006 Abaqus user conference. — USA, Boston, 2006.
- Aksenov A., Iliin K., Shmelev V.* Modeling fluid structure interaction for aerospace applications // Proceedings of West-east high speed flow field conference, 19–22 November 2007, Moscow, Russia. — 2007.
- Aksenov A. A., Kharchenko S. A., Konshin V. N., Pokhilko V. I.* FlowVision Software: Numerical Simulation of Industrial CFD Applications on Parallel Computer Systems // Proceedings of Parallel CFD conference 2003, May 13–15, Moscow, Russia. — 2003. — P. 280–284.

- Aksenov A., Pechenyuk A., Poyda A., Ryabinkin E., Tkachenko I., Ilyin V., Velikhov V. Virtual Basin for Simulating Ship Sailing Qualities on HPC Resources // *Procedia Computer Science*. — 2015. — Vol. 66. — P. 132–139.
- Aksenov A. A., Zhluktov S. V., Kudimov N. F., Son E. E., Savitskii D. V., Tretyakova O. N., Shishaeva A. S. Investigation of Heat Transfer in High Capacity Power Transformers Having Modifications Preventing explosions // *Thermal Engineering*. — 2014. — Vol. 61, no. 13. — P. 924–930.
- Aksenov A. A., Zhluktov S. V., Savitskiy D. V., Bartenev G. Y., Pokhilko V. I. Simulation of 3D flows past hypersonic vehicles in FlowVision software // *Journal of Physics: Conference Series*. — 2015. — Vol. 653, no. 1 (012072). — 8 p.  
<http://iopscience.iop.org/article/10.1088/1742-6596/653/1/012072>
- Bockeria L. A., Gachechiladze I. A., Gorodkov A. U. Application of Tornado-flow Fundamental Hydrodynamic Theory to the Study of Blood Flow in the Heart — Further Development of Tornado-like Jet Technology // *Proceedings of ASME International Mechanical Engineering Congress and Exposition (IMECE) Congress And Exposition*. — Vol. 2. — 2012.
- Markova T. V., Aksenov A. A., Zhluktov S. V., Savitsky D. V., Gavrilov A. D., Son E. E., Prokhorov A. N. Simulating flow around scaled model of a hypersonic vehicle in wind tunnel // *Journal of Physics: Conference Series*. — Vol. 774, No. 1 (012095). — 2016. — 9 p.  
<http://iopscience.iop.org/article/10.1088/1742-6596/774/1/012095>
- Menter F. R., Kuntz M., Langtry R. Ten Years of Industrial Experience with the SST Turbulence Model // *Turbulence, Heat and Mass Transfer 4* / Eds.: K. Hanjalic, Y. Nagano, and M. Tummers, Begell House, Inc., 2003. — P. 625–632.
- Sommer T. P., So R. M. C., Zhang H. S. Near-wall variable Prandtl turbulence model for compressible flows // *AIAA Journal*. — 1993. — Vol. 31, no. 1. — P. 27–35.
- Rogozhkin S. A., Osipov S. L., Shepelev S. F., Aksenov A. A., Sazonova M. L., Shmelev V. V. Verification calculations as per CFD FlowVision code for sodium-cooled reactor plants // *Proceedings of the International Conference on Fast Reactors and Related Fuel Cycles: Safe Technologies and Sustainable Scenarios (FR13)*. — Paris, France, March 4–7, 2013. — Paper IAEA-CN-199-373. — 2013.
- Timouchev S., Tourret J., Pavic G., Aksenov A. Numerical 2-D and 3-D methods for computation of internal unsteady pressure field and sound near field of fans // *Proceedings of Fannoise 2003*. — Senlis, France.
- Timouchev S., Tourret J., Pavic G., Aksenov A. Numerical 2-D and 3-D Methods for Computation of Internal Unsteady Pressure Field and Near-Field Noise of Fans // *Noise Control Eng. J.* — 2006. — Vol. 54, no. 1.
- Timouchev S., Aksenov A., Bogdanov V. Computational study of ejector-pumps // *Proceedings of FEDSM2005:2005 ASME Fluids Engineering Division Summer Meeting and Exhibition*. — Houston, TX, USA. — 19–23 June 2005.
- Vucinic D., Pesut M., Aksenov A., Mravak Z., Lacor Ch. Towards interoperable x3d models and web-based environments for engineering optimization problems // *Engineering Optimization*. — 2008. — No. 6.
- Nouchie S. C. O. Flow of a Newtonian fluid: The case of blood in large arteries // *Thesis, Master of Science, University of South Africa, November 2005*.
- Vucinic D., Tao Yang, Aksenov A. Human Heart Blood Flow Simulations Based on CFD // *International Journal Of Fluids And Heat Transfer*. — 2016. — Vol. 1, issue 2. — P. 15–34.
- Wang J. T., Lyle K. H. Simulating Space Capsule Water Landing with Explicit Finite Element Method // *NASA Langley Research Center, Hempton, V.A., 23681*. — AIAA-2017-1779. — 2007.
- Wilcox D. C. Turbulence modeling for CFD // *DCW Industries, Inc.* — 1994. — 460 p.