

УДК 519.6

## ПРИМЕНЕНИЕ НРС-ТЕХНОЛОГИЙ ДЛЯ РЕШЕНИЯ ПРОСТРАНСТВЕННЫХ ЗАДАЧ МУЛЬТИФИЗИКИ

В. А. Васильев<sup>1</sup>, М. В. Крапошин<sup>2</sup>, А. Ю. Ницкий<sup>1</sup>, А. В. Юскин<sup>2</sup>

Приводится описание программного комплекса MCF для решения сопряженных задач гидроупругости. Рассматриваются способы решения слабосвязанных и сильносвязанных задач. Из возможных методов сопряжения предлагаются итерационные методы как наиболее простые для реализации и предоставляющие широкие возможности масштабирования программного обеспечения. Обсуждается связывание гидродинамического модуля OpenFOAM (движение турбулентной несжимаемой, слабосжимаемой и сжимаемой жидкостей) и двух моделей динамики конструкции: метод конечных объемов (OpenFOAM) и метод разложения по собственным формам и частотам (UZOR). Проведен анализ эффективности разработанного программного обеспечения с использованием кластеров Таганрогского технологического института и Челябинского государственного университета. Статья рекомендована к публикации Программным комитетом Международной научной конференции “Параллельные вычислительные технологии” (ПАВТ-2011; <http://agora.guru.ru/pavt2011>).

**Ключевые слова:** вычислительная гидродинамика, параллельные вычисления, сопряженные задачи, турбулентные течения, гидро- и аэроупругость, энергетические установки.

**Введение.** В последнее время все большую популярность приобретают численные методы решения задач мультифизики, позволяющие исследовать взаимосвязанное влияние двух или более феноменов в рамках единой модели (например, задачи гидро- и аэроупругости, магнитогидродинамики, сопряженного теплообмена (в том числе многофазные с фазовыми превращениями и с реагирующими потоками), связанные задачи теплогидродинамики и пространственной нейтронной кинетики).

В настоящей статье рассматривается разработанное авторами программное обеспечение для решения задач гидроупругости несколькими способами. Обсуждаются методы решения таких задач и приводится их классификация. Задачи делятся на сильносвязанные и слабосвязанные. Первые отличаются от вторых значительным влиянием одной области на другую и интенсивным обменом импульсов. Из возможных методов сопряжения слабосвязанных и сильносвязанных задач в работе выбраны итерационные методы как наиболее простые для реализации и предоставляющие широкие возможности масштабирования программного обеспечения. В качестве основных модулей было выбрано программное обеспечение, описанное в [2].

**1. Разработанная численная модель.** Рассматривалось связывание моделей гидродинамического пакета прикладных программ OpenFOAM (Open Field Operation and Manipulation) [3, 4] (турбулентные модели RAS (Reynolds Averaged Stress) и LES (Large Eddy Simulation) для движения несжимаемой, слабосжимаемой и сжимаемой жидкостей) и двух моделей динамики конструкции: реализованной в коде OpenFOAM на основе метода конечных объемов [5] и реализованной в коде UZOR разложением по собственным формам и частотам [6]. В результате был разработан программный комплекс MCF для решения связанных задач. Среди рассмотренных схем связывания были реализованы следующие:

- итерационная для слабосвязанных задач;
- итерационная с релаксацией решения динамики конструкции;
- итерационная с релаксацией решения динамики конструкции и адаптивным коэффициентом релаксации.

Для решения были отобраны следующие задачи: течение в каверне с эластичным дном и подвижной крышкой [7]; колебания жгута в спутном следе за цилиндром [8]; колебания диска на тонкой ножке в радиальном зазоре 230 мкм [1]; автоколебания в поворотном-золотниковом клапане [9].

<sup>1</sup> Челябинский государственный университет, ООО “СуперКомпьютерные Технологии и СПО”, ул. Братьев Кашириных, 129, 454021, г. Челябинск; В. А. Васильев, ген. директор, e-mail: vasilyev\_va@list.ru; А. Ю. Ницкий, техн. директор, e-mail: nitskiy@list.ru

<sup>2</sup> НИЦ “Курчатовский Институт”, пл. академ. Курчатова, д. 1, 123182, Москва; М. В. Крапошин, науч. сотр., e-mail: os-cfd@yandex.ru; А. В. Юскин, зам. нач. отдела, e-mail: os-cfd@yandex.ru

Математическая модель гидродинамики включала в себя уравнения неразрывности (1), сохранения количества движения (2) и сохранения энергии (3). Тензор напряжений представлен в линейной форме (4), (5) с учетом использования модели широкомасштабных вихрей. Для разрешения подсеточного масштаба использовалось уравнение транспорта кинетической энергии (6) и соотношение для вычисления подсеточной вязкости (7). Указанные соотношения имеют вид

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho \mathbf{U}) = 0, \tag{1}$$

$$\frac{\partial \rho \mathbf{U}}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho \mathbf{U} \mathbf{U} - \boldsymbol{\sigma}) = -\nabla p, \tag{2}$$

$$\frac{\partial \rho h}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho \mathbf{U} h - \alpha^{\text{Eff}} \nabla h) = \frac{Dp}{Dt}, \tag{3}$$

$$\boldsymbol{\sigma} = \mu^{\text{Eff}} [\nabla \mathbf{U} + (\nabla \mathbf{U})^T] - \frac{2}{3} \mu^{\text{Eff}} \nabla \cdot \mathbf{U}, \tag{4}$$

$$\mu^{\text{Eff}} = \mu^{\text{SGS}} + \mu^{\text{lam}}, \tag{5}$$

$$\frac{\partial \rho k}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho \mathbf{U} k - D_k^{\text{Eff}} \nabla k) = G - \frac{2}{3} \rho \nabla \cdot \mathbf{U} k - \frac{c_e \rho k^{3/2}}{\Delta}, \tag{6}$$

$$\mu^{\text{SGS}} = c_k \rho \sqrt{k} \Delta, \tag{7}$$

где  $t$  — время моделируемой задачи, с;  $\rho$  — плотность среды, кг/м<sup>3</sup>;  $\mathbf{U}$  — скорость среды, м/с;  $p$  — давление среды, Па;  $\boldsymbol{\sigma}$  — тензор вязких напряжений, Па;  $h$  — удельная энтальпия среды, Дж/кг;  $\alpha^{\text{Eff}} = \mu^{\text{SGS}} + \lambda/c_p$  — эффективный коэффициент диффузии энтальпии, кг/(м·с);  $\lambda$  — коэффициент теплопроводности среды, Вт/(м·К);  $c_p$  — удельная изобарная теплоемкость, Дж/(кг·К);  $\mu^{\text{SGS}}$  — подсеточная динамическая вязкость, кг/(м·с);  $\frac{Dp}{Dt} = \frac{\partial p}{\partial t} + \nabla \cdot (p \mathbf{U})$  — полная производная по давлению, учитывающая работу сжатия/расширения среды;  $\mu^{\text{Eff}}$  — эффективная вязкость, вычисляемая как сумма ламинарной  $\mu^{\text{lam}}$  и подсеточной вязкости, кг/(м·с);  $k$  — удельная кинетическая энергия турбулентности, Дж/кг;  $G$  — источник член;  $D_k^{\text{Eff}}$  — коэффициент диффузии;  $c_e$  и  $c_k$  — константы модели;  $\Delta$  — масштаб сетки;  $\nabla = \left( \frac{\partial}{\partial x}, \frac{\partial}{\partial y}, \frac{\partial}{\partial z} \right)$  — оператор набла. Сокращение SGS означает SubGrid Scale.

Механическая модель представлена в конечно-объемном виде (8) и конечно-элементном виде (9) с использованием разложения по собственным формам и частотам:

$$\frac{\partial^2(\rho \mathbf{D})}{\partial t^2} - \nabla \cdot (\mu \nabla \mathbf{D} + \mu (\nabla \mathbf{D})^T + \lambda \text{tr}(\varepsilon) \mathbf{I}) = \mathbf{f}, \tag{8}$$

$$M \ddot{\mathbf{q}} + C \dot{\mathbf{q}} + K \mathbf{q} = \mathbf{f}. \tag{9}$$

Здесь  $\rho$  — плотность материала, кг/м<sup>3</sup>;  $\mathbf{D}$  и  $\mathbf{q}$  — векторы смещений в теле, м/с;  $\mu$  — модуль сдвига (второй параметр Ламе), кг/(м·с<sup>2</sup>);  $\lambda$  — первый параметр Ламе, кг/(м·с<sup>2</sup>);  $\varepsilon = \frac{1}{2} (\nabla \mathbf{D} + (\nabla \mathbf{D})^T)$  — тензор деформаций;  $\text{tr}$  — след матрицы;  $\mathbf{I}$  — единичная матрица;  $\mathbf{f}$  — вектор внешних сил;  $M$  — матрица масс;  $C$  — матрица демпфирования;  $K$  — матрица жесткости.

В общем случае систему уравнений, описывающую взаимодействие структуры и жидкости, можно представить в виде

$$\mathbf{Y} = F(\mathbf{X}), \quad \mathbf{X} = S(\mathbf{Y}), \tag{10}$$

где  $F$  и  $S$  условно обозначают систему уравнений для жидкости и структуры соответственно,  $\mathbf{Y}$  — вектор нагрузки на общей поверхности взаимодействия (также называется смоченной), а  $\mathbf{X}$  — вектор ее перемещений. Систему уравнений (10) необходимо дополнить соотношениями баланса на границе взаимодействия жидкость–структура:

$$\mathbf{D}_{\Gamma_F} = \mathbf{D}_{\Gamma_S}, \quad t_{\Gamma_S} = \left( p \mathbf{n} - 2\mu^{\text{Eff}} \nabla \cdot \frac{1}{2} (\nabla \mathbf{U} + (\nabla \mathbf{U})^T) \right)_{\Gamma_F}. \tag{11}$$

Здесь  $\Gamma_F$  — граница области, занимаемой жидкостью, и  $\Gamma_S$  — граница структуры.

Кроме того, систему (10) представляют в виде, удобном для поиска решения:

$$\mathbf{r}_F(\mathbf{X}, \mathbf{Y}) = \mathbf{Y} - F(\mathbf{X}) = 0, \quad \mathbf{r}_S(\mathbf{X}, \mathbf{Y}) = \mathbf{X} - S(\mathbf{Y}) = 0. \tag{12}$$

Способ решения такой системы зависит от класса задачи (сильно или слабо связанная) и выбранного метода связывания. Условно сильносвязанная задача отличается от слабосвязанной тем, насколько велико взаимодействие (обмен импульсом) между жидкостью и потоком. Обычно сильносвязанные задачи характеризуются малой жесткостью конструкции, плотностью жидкости, близкой или большей, чем плотность структуры, несжимаемым поведением самой жидкости (бесконечная скорость звука) и, как следствие, необходимостью строгого соблюдения условия (11).

Для связывания в слабосопряженных задачах использовалась смещенная схема интегрирования, при которой обмен данными (полем давления в жидкости и перемещениями в структуре) происходит на каждом шаге по времени один раз. Для сильносвязанных задач использовалась сильносвязанная схема с постоянным и адаптивным коэффициентами релаксации — в этом случае в пределах одного шага по времени реализуется дополнительный цикл совместного решения уравнений с последовательной передачей нагрузок и перемещений. Выход из вложенного цикла осуществлялся по достижении некоторого заданного критерия — например, малости изменения давления. В обеих схемах задачи интегрирования уравнения гидродинамики и механики тела решались отдельно.

Для сильносвязанных и слабосвязанных задач необходимо было организовывать сбор данных при передаче поля давлений от жидкости конструкции и перемещений границы проточной части от структуры. Для этого использовалась иерархическая модель обмена данными — один вычислительный узел (с номером 0) выбирается ведущим (или управляющим), а все остальные — ведомыми. Ведущий узел играет активную роль, опрашивая ведомые, последние являются пассивными и выполняют команды управляющего процессора. Сбор данных с процессоров (полей давления, площадей и нормалей граней) осуществлялся по схеме, представленной на рис. 1 (при взаимодействии OpenFOAM и UZOR), и включал в себя следующие этапы.

*Подготовительный этап.* Выполняется один раз при инициализации программы — производится сбор информации о топологии вычислительной сети и разбиении “смоченной” поверхности по узлам кластера (количество граней поверхности, приходящееся на каждый вычислительный узел), аккумуляция информации на ведущем узле (с номером 0) и последующая раздача всех собранных данных остальным узлам.

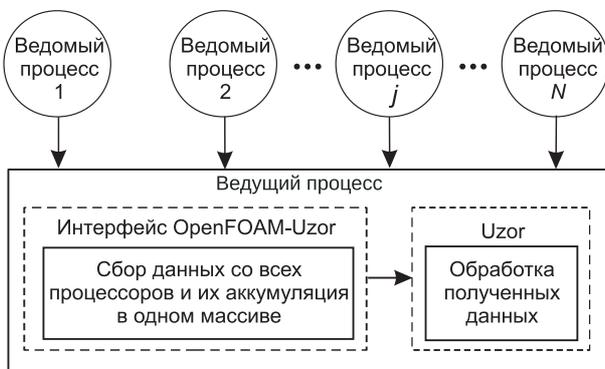


Рис. 1. Схема сбора данных гидродинамической модели с вычислительных узлов

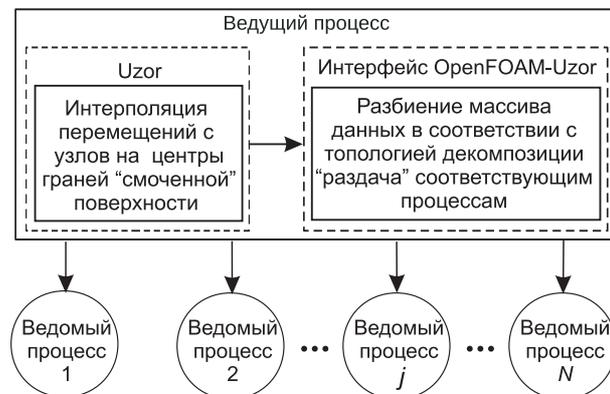


Рис. 2. Схема "раздачи" информации о перемещениях граней "смоченной" поверхности по вычислительным узлам

*Регулярный этап* (получение поля нагрузок на грани поверхности взаимодействия). На каждом процессоре, включая ведущий, вычисляются давления, площади и нормали смоченной границы и сохраняются в специальный массив. На всех процессорах, исключая главный и те, которые не содержат в памяти ни одной грани смоченной поверхности, выполняется команда отправки данных ведущему узлу. Ведущий узел производит опрос всех остальных (исключая те, которые не содержат данных о поверхности обмена взаимодействия), собранные данные добавляются в конец единого массива, вычисляются усилия и передаются в модуль расчета структуры.

Раздача данных (передача перемещений границы проточной части от UZOR к OpenFOAM) осуществлялась схожим образом (рис. 2).

Расчеты проводились на следующих кластерах:

— кластер Челябинского государственного университета (ЧелГУ): 12×12 ядер Intel(R) Xeon(R) CPU X5650 @2.67GHz;

— кластер Таганрогского технологического института (ТТИ ЮФО): 128×16 ядер AMD Opteron™ 8356 @2.67GHz.

На первом кластере выполнялись расчеты только на 12 ядрах одного узла (по причине невозможности настроить OpenMPI для работы с OpenFOAM). На втором — количество ядер варьировалось от 32 до 256. При расчетах на кластере ТТИ ЮФО на 256 ядрах было получено, что коэффициент масштабирования не опускался ниже 30%, для расчетов использовались как HP-MPI, так и OpenMPI реализации MPI.

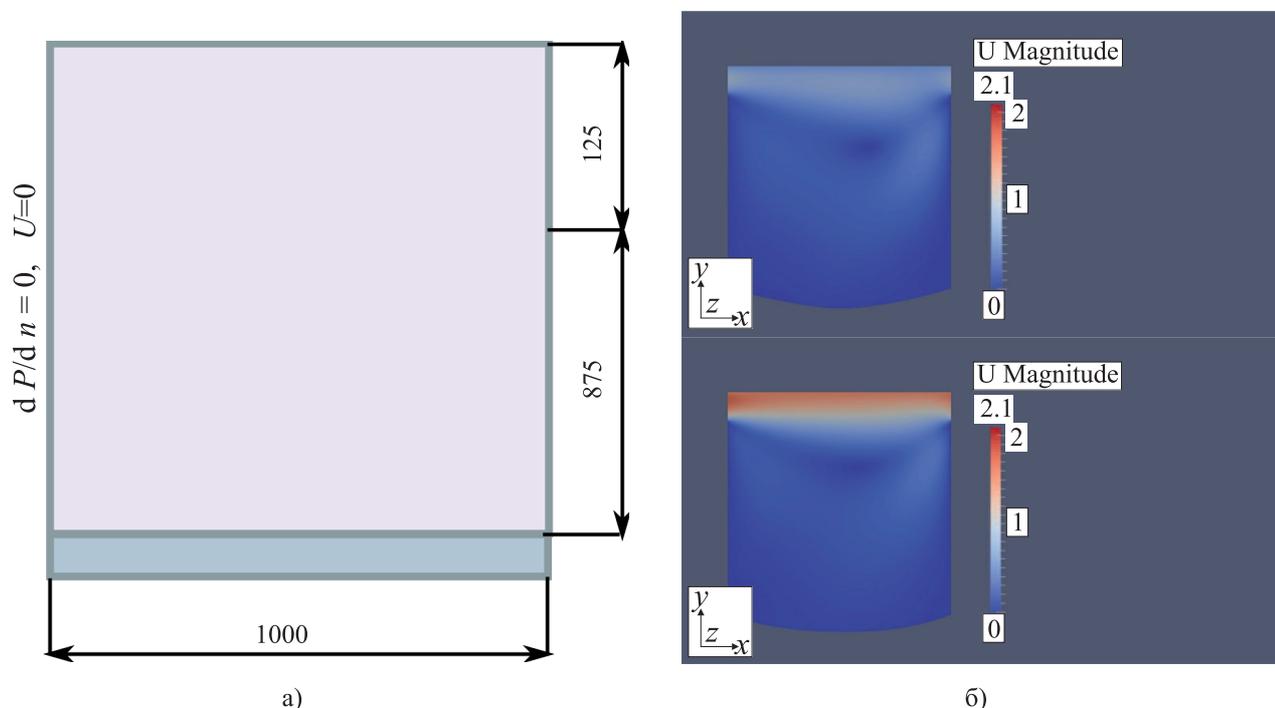


Рис. 3. Принципиальная схема задачи (а) и поле модуля скорости в различные моменты времени (б)

**2. Результаты моделирования бенчмарк-тестов.** Рассмотрение задач подобного рода позволяет оценить на относительно простых примерах степень пригодности предложенной методики для моделирования мультифизики. Всего рассматривалось две тестовых задачи — течение в каверне с эластичным дном и колебания эластичного жгута в спутном следе за плохо обтекаемым телом.

**2.1. Каверна с эластичным дном.** Эта задача рассматривается как базовая во многих работах по взаимосвязанным задачам (например, [7]) и является модификацией широко известного теста “каверна”, предназначенного для изучения адекватности моделирования кодом течений, вызванных движением стенки. В данном случае отличия от стандартной постановки заключаются в следующем (рис. 3а):

1) скорость движущейся верхней стенки не постоянная, а меняется по периодическому закону от 0 до  $2\bar{U} = 1 - \cos\left(\frac{2\pi}{t}\right)$ ;

2) для того чтобы объем мог изменяться, вблизи верхней стенки жидкость может покидать расчетную область и входить в нее;

3) нижняя стенка представляет собой гибкую мембрану, которая может двигаться под действием потока и сопротивляться ему.

Толщина эластичной стенки — 2 мм. Параметры сред следующие: плотность среды — 1 кг/м<sup>3</sup>; вязкость — 0.01 м<sup>2</sup>/с; плотность структуры — 500 кг/м<sup>3</sup>, модуль Юнга — 250 Па, коэффициент Пуассона — 0.0. Моделируемое время — 70 секунд. Расчетное поле модуля скорости и перемещений нижней стенки приведены на рис. 3б.

**2.2. Колебания эластичного бруса в спутном следе за цилиндром.** На рис. 4а представлено схематическое изображение расчетной области в виде прямоугольного канала (задача двумерная), на входе которого задается некоторый профиль скорости.

Геометрические характеристики расчетной области: длина  $L$  равна 2.5 м, высота  $H$  — 0.41 м; центр круга (ось цилиндра) расположен в точке  $C$  с координатами (0.2, 0.2), радиус  $R$  — 0.05 м; эластичная балка длиной  $l = 0.35$  м и высотой  $h = 0.02$  м жестко закреплена на цилиндре, а правый нижний угол имеет

координаты (0.6, 0.19); контрольная точка, в которой производилось сравнение перемещений, расположена на правом конце балки и по середине ее высоты — координаты (0.6, 0.2). Поле модуля и смещение балки представлены на рис. 4б.

Всего рассматривалось два стационарных варианта: при числах Рейнольдса  $Re = 20$  (FSI1) и  $Re = 200$  (FSI3). Физические параметры жидкой и эластичной сред для этих вариантов следующие.

Для режима FSI1:  $Re = \frac{\bar{U}r}{\nu^F} = 20$ ;  $\bar{U}$  — скорость жидкости на входе в расчетную область;  $r$  — радиус цилиндра;  $\nu^F$  — кинематическая вязкость жидкости; плотность структуры  $\rho^S = 1000$  кг/м<sup>3</sup>; коэффициент Пуассона структуры  $\nu^S = 0.4$ ; модуль сдвига структуры  $\mu^S = 0.5 \times 10^6$  кг/(м с<sup>2</sup>); плотность жидкости  $\rho^F = 1000$  кг/м<sup>3</sup>; кинематическая вязкость жидкости  $\nu^F = 0.001$  м<sup>2</sup>/с; скорость жидкости на входе в расчетную область  $\bar{U} = 0.2$  м/с.

Для режима FSI3:  $Re = \frac{\bar{U}r}{\nu^F} = 200$ ;  $\bar{U}$  — скорость жидкости на входе в расчетную область;  $r$  — радиус цилиндра;  $\nu^F$  — кинематическая вязкость жидкости; плотность структуры  $\rho^S = 1000$  кг/м<sup>3</sup>; коэффициент Пуассона структуры  $\nu^S = 0.4$ ; модуль сдвига структуры  $\mu^S = 2 \times 10^6$  кг/(м с<sup>2</sup>); плотность жидкости  $\rho^F = 1000$  кг/м<sup>3</sup>; кинематическая вязкость жидкости  $\nu^F = 0.001$  м<sup>2</sup>/с; скорость жидкости на входе в расчетную область  $\bar{U} = 0.2$  м/с.

В первом случае возникновение автоколебаний не наблюдалось и смещения носили стационарный характер, определяемый величиной статичной нагрузки от поля давления. Во втором случае происходило периодическое движение эластичной балки за счет нестационарного поля давления, обусловленного срывом вихрей за обтекаемым цилиндром. Результаты расчетов сравнивались с данными работы [8]. Получено хорошее качественное и количественное совпадение.

**3. Результаты моделирования реальных геометрий.** После тестирования было выполнено моделирование двух реальных геометрий — моделирование течения в радиальном зазоре питательного насоса [1] и течения перегретого пара в поворотно-золотниковом клапане по радиальной щели [9]. Эти расчеты позволяют продемонстрировать применимость программного комплекса при решении задач оптимизации конструкций промышленного класса.

**3.1. Моделирование течения воды в тонкой щели разгрузочного устройства питательного насоса.**

Геометрия и расчетная область задачи представлены на рис. 5. Слабосжимаемая среда (вода при комнатной температуре) поступает по кольцевому каналу 1 снизу (течет вдоль направления 0Z, рис. 5а), затем поворачивает на 90° (под диском, рис. 5а) и попадает в кольцевой зазор толщиной 0.23 мм, по которому течет в радиальном направлении. На выходе из зазора поток расширяется, дважды поворачивает и следует к выходу из расчетной области вдоль оси 0Z (цилиндрический канал над диском).

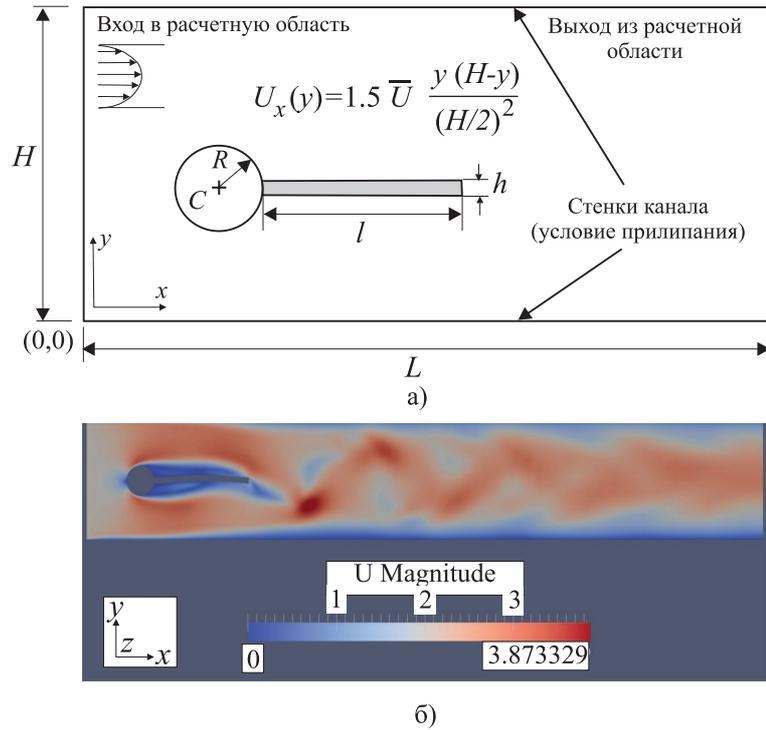


Рис. 4. Принципиальная схема тестовой задачи (а) и поле модуля скорости в режиме развитого течения (б)

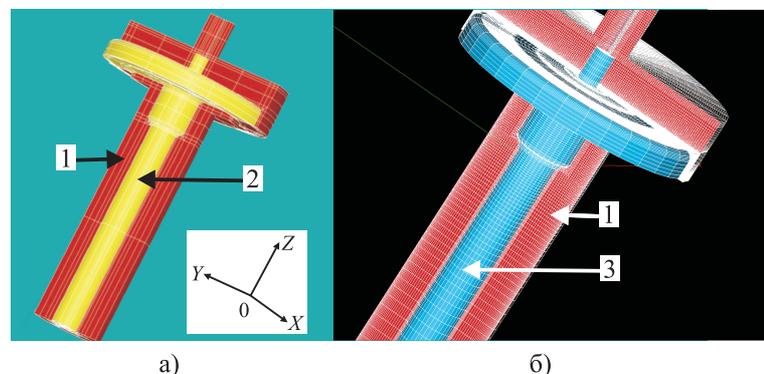


Рис. 5. Геометрия (а) и расчетная сетка (б) моделируемого стенда: 1 — проточная часть, 2 и 3 — конструкция

Расчет велся по двум моделям: в одном случае для дискретизации уравнений как гидродинамики, так и механики конструкции использовался метод конечных объемов (OpenFOAM). В другом случае для получения решения задачи нестационарных колебаний механической системы использовался метод разложения по собственным формам (программный комплекс UZOR [6]). Полный список исследовавшихся режимов представлен в таблице. В каждом режиме расчет велся для, по крайней мере, 1 секунды физического времени либо до получения условно стационарного состояния. Стационарным предполагалось состояние, при котором амплитуда колебаний равна нулю либо асимптотически приближается к нулю или же постоянна и не меняется во времени. Амплитуда вычислялась как корень из суммы квадратов смещений по каждому из направлений  $X$ ,  $Y$  и  $Z$ . При решении задачи на входе и выходе расчетной области проточной части задавалось статическое давление (например, 6 атм и 0.1 атм), скорость среды рассчитывалась из решения уравнения для давления. Для конструкции граничные условия на поверхности задавались согласно (11), нижний торец считался консольно закрепленным.

На расчет одного режима уходило (в зависимости от перепада) от 3 до 9 суток (на 12 ядрах). Анализ производительности вычислительной системы дан в разделе 4.

В результате в режимах 1–3 (см. таблицу) были получены затухающие колебания конструкции с частотой порядка 150 Гц, вызванные движением упругого стержня в осевом направлении. По прохождении определенного количества времени колебания пропадали, а поле смещений в конструкции полностью определялось полем давлений в жидкости. Предположительно причинами затухания являются:

- принципиальная невозможность использования метода конечных объемов для решения задач динамики конструкции; метод расщепления переменных, предложенный в [5], вносит слишком сильное демпфирование в решение, что делает его непригодным для расчета динамики, хотя в статике решение будет стремиться к аналитическому по мере сгущения сетки;

- некорректность задания граничных условий — в такого рода задачах обычно предполагается, что в момент времени  $t = 0$  конструкция находится в уже предварительно напряженном состоянии, а течение соответствует развитому.

По результатам расчетов в режимах 4–13 (связка OpenFOAM–UZOR) можно сделать вывод, что получено качественно хорошее совпадение с экспериментом:

- с повышением перепада давления на щели наблюдается переход от затухающих колебаний к установившимся автоколебаниям (рис. 6–8);

- увеличение перепада давления на тонкой щели приводит к росту собственной частоты на 30%, как и в эксперименте (рис. 9);

- амплитуда колебаний меняется вместе с перепадом (чем больше перепад, тем выше амплитуда).

Были обнаружены и существенные количественные отличия от эксперимента:

- расчетная амплитуда в режиме с перепадом 6 атм в два раза меньше экспериментальной;

- в предложенной постановке оказалось невозможным учесть эффект виртуальной массы.

**3.2. Моделирование течения перегретого пара в поворотном-золотниковом клапане.** В этой задаче рассматривается течение в регулирующем клапане [9], при котором возможно возникновение автоколебаний в определенных режимах. Конструкция и проточная часть представлены на рис. 10. Конструктивно клапан такого типа состоит из обязательных трех частей:

- 1) корпуса, включающего в себя входную и выходные камеры, в которых собирается дросселируемый поток до и после клапана;

- 2) статичной гильзы — со входными и выходными отверстиями;

- 3) вращающегося золотника, вставленного в гильзу, с окнами для регулирования расхода.

В золотнике сделаны отверстия, находящиеся на одной высотной отметке со входными окнами гильзы. Между гильзой и золотником — кольцевой зазор малой толщины (порядка 150 мкм), обеспечивающий протечки теплоносителя при нулевом открытии клапана. Поток, поступающий из входной камеры в окна гильзы, разбивается на три части: идущую напрямую к выходным отверстиям гильзы по зазору; идущую к окнам золотника по кольцевому зазору; и наконец, в случае положительного перекрытия между окнами золотника и гильзы, идущую по золотнику к выходным окнам гильзы.

В определенном смысле эта конструкция напоминает уже рассмотренную в разделе 3.1, но при этом есть и принципиальные отличия: “мягкая” часть — золотник закреплен жестко с двух сторон, а среда может течь как вверх по цилиндрическому зазору, так и вдоль штока золотника. При такой организации течения потоком в окнах золотника создается гидродинамическая сила, действующая на закрытие клапана и потенциально могущая привести к возникновению автоколебательных процессов.

Проведенные расчеты позволили выявить не только возникновение крутящих и поступательных усилий, вызываемых гидродинамикой потока, но и ряд других эффектов, приводящих к неудовлетворитель-

## Описание списка исследуемых режимов

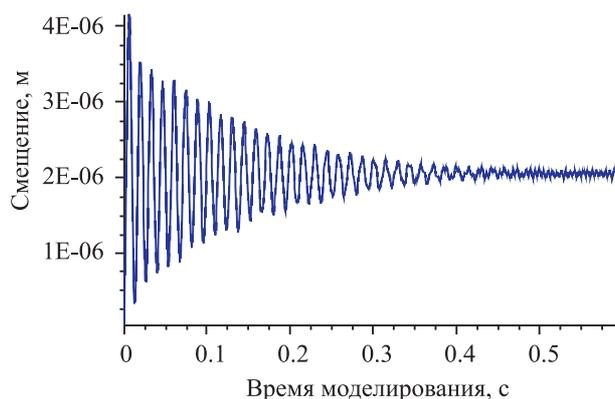
№№ режима	Описание
Расчеты по модели OpenFOAM–OpenFOAM	
1	Базовая тестовая задача. Выбраны три точки для отбора полей давления и перемещений: а) на нижней плоскости диска до зазора; б) на нижней плоскости диска и на максимальном радиусе; в) на ножке стенда. Грубая расчетная сетка включала в себя 90 тысяч контрольных объемов для проточной части и 150 тысяч контрольных объемов для механической части. Использовалась RAS-модель турбулентности, были получены затухающие продольные колебания с частотой 120–140 Гц. Давление перед зазором 6.1 атм, после — 0.1 атм.
2	Аналог режима 1, но с оптимизированной (сгущенной) сеткой проточной части (300 тысяч контрольных объемов), для дискретизации адвективных слагаемых использовалась смешанная схема. Результаты по сравнению с режимом 1 не изменились.
3	Аналогично режиму 2, но с использованием LES-модели турбулентности в проточной части задачи. Результаты по сравнению с режимом 2 не изменились.
Расчеты по модели OpenFOAM–UZOR	
4	Как и в режиме 3, но с моделью UZOR в механической части. По техническим причинам (из-за завышенного критерия интерполяции) необходимо было не полное соответствие между точками проточной и механической частей. Были получены автоколебания с частотой 100 Гц, перемещениями, соответствующими собственной форме режима 1, и амплитудой порядка 50 мкм.
5	Аналогично режиму 4, но с давлением перед зазором 1.5 атм. Получены затухающие колебания конструкции по первой собственной форме с частотой 75 Гц.
6	Аналогично режиму 4, но с давлением на входе в щель 20 атм. Обнаружены автоколебания конструкции по первой собственной форме с частотой 134 Гц и амплитудой 415 мкм.
7	Как и в режиме 4, но с заниженным критерием поиска соответствий между узлами гидродинамической и механической частей на смоченной границе (для установления полной связи). Результат количественно и качественно полностью идентичен режиму 4.
8	Как и в режиме 5, но с заниженным критерием поиска соответствий между узлами гидродинамической и механической частей на смоченной границе (для установления полной связи). Результат количественно и качественно полностью идентичен режиму 5.
9	Как и в режиме 7, но с $k-\omega$ SST (Shear Stress Transport) моделью турбулентности (вместо LES-модели). В результате получены слабозатухающие колебания с амплитудой, меньшей в два раза, чем при режиме 7.
10	Как и в режиме 9, но с $k-\varepsilon$ моделью турбулентности. Для данной расчетной сетки не удалось получить устойчивого решения — численная схема после нескольких десятков итераций расходилась.
11	Аналогично режиму 7, но с частотой вывода проб поля в 4 раза выше для более точной оценки частоты колебаний. Результаты полностью идентичны режиму 7.
12	Как и в режиме 10, но с “realizable $k-\varepsilon$ ” моделью турбулентности. Получены слабозатухающие колебания с хаотичным изменением амплитуды.
13	Как и в режиме 9, но без моделирования турбулентности (ламинарная модель). Возникают незатухающие колебания с амплитудой порядка 20 мкм.

ному виброакустическому состоянию при эксплуатации арматуры данного типа. Это позволило выявить и указать шесть возможных причин возникновения автоколебаний:

1) в золотнике действительно обнаружены сложные вихревые течения, которые вместе с высокими скоростями потока могут приводить к возникновению автоколебаний;

2) возникновение крутящего момента, обусловленного гидродинамической силой, выявлено во всех расчетах; при определенных условиях (эксцентриситет в зазоре, неравномерность или скошенность конструкции) именно вращательные колебания могут быть спусковым крючком для автоколебательного процесса;

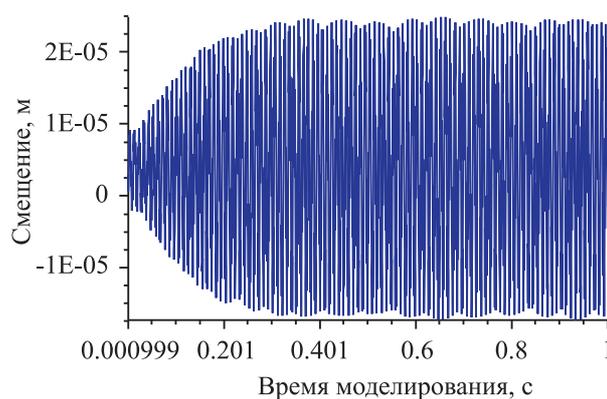
Рабочая область



Вск Мар 13 18:57:12 2011

Рис. 6. История перемещений диска при перепаде 1.5 атм (вариант режима 5)

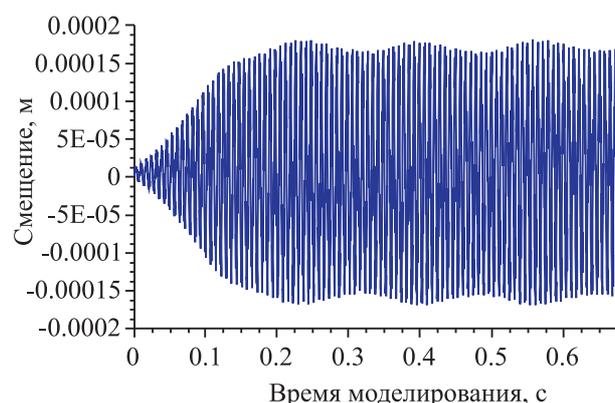
Рабочая область 3



Вск Мар 13 19:02:25 2011

Рис. 7. История перемещений диска при перепаде 6 атм (вариант режима 4)

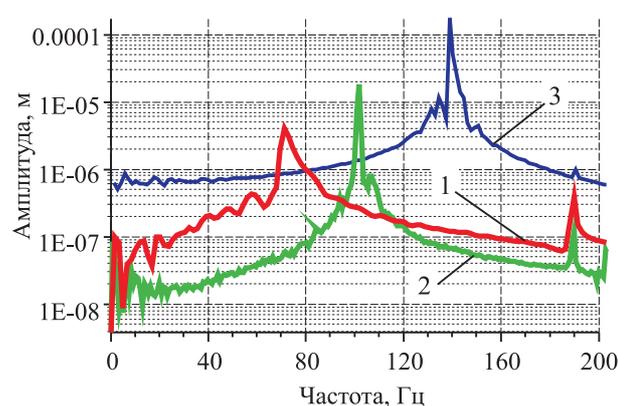
Рабочая область 5



Вск Мар 13 19:06:22 2011

Рис. 8. История перемещений диска при перепаде 20 атм (вариант режима 6)

Рабочая область 8



Вск Мар 13 19:06:22 2011

Рис. 9. Спектры частот колебаний диска при перепадах 1) 1.5 атм, 2) 6 атм и 3) 20 атм

3) наложение на турбулентное течение сверхзвуковых эффектов и взаимодействия распространяющихся волн давления вполне может являться причиной возникновения автоколебаний;

4) в случае нарушения симметричности конструкции (а это всегда присутствует в реальных изделиях) азимутальные формы колебаний могут приводить к другим формам, вызывающим дальнейшее смещение центра тяжести конструкции и способствующим развитию автоколебательного процесса;

5) контактное взаимодействие элементов конструкции часто приводит к возникновению дискретных составляющих в спектре шума с частотами, кратными некоторому базовому значению; косвенно это предположение может быть подтверждено высокочастотными продольными колебаниями штока золотника (1 кГц), которые могут приводить к его биению о втулку гильзы;

6) во всех расчетах было получено существенное снижение температуры теплоносителя в зазоре и золотнике, а поскольку модель среды однофазная, то эффект конденсации не может быть учтен в расчетах явно, однако о его наличии можно судить по локальным температурам в проточной части.

**4. Результаты оценки производительности вычислительных ресурсов.** Анализ производительности выполнялся как для тестовых задач, так и для реальных геометрий (рис. 11 и 12). В последнем случае внимание уделялось влиянию затрат на вычисления отдельных блоков программы (рис. 12).

Анализ масштабируемости, выполненный для кластера ЧелГУ (рис. 11), показал, что коэффициент

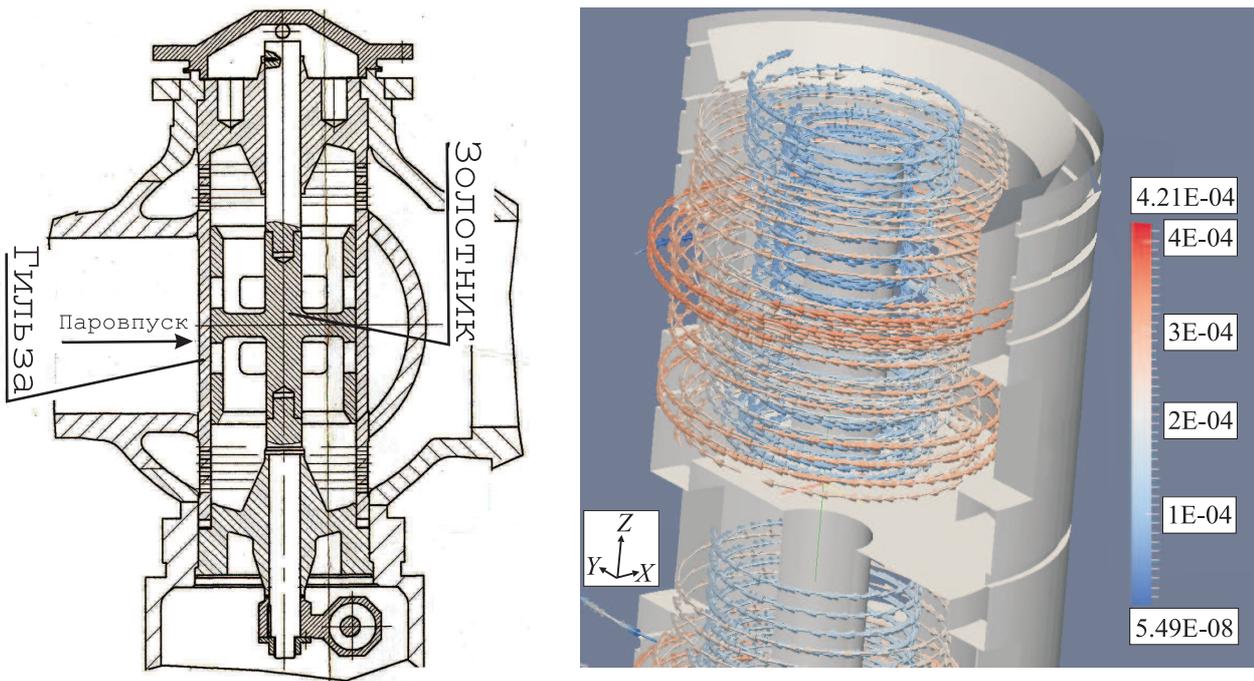


Рис. 10. Принципиальная схема конструкции регулирующего клапана (слева) и разрез его проточной части с траекториями движения поверхности золотника (справа)

масштабирования  $M = \frac{T_{\text{послед}}}{NT_{\text{парал}}}$  (где  $T_{\text{послед}}$  — время счета в последовательном режиме,  $T_{\text{парал}}$  — время счета в параллельном режиме и  $N$  — число процессоров) составляет порядка 50%, что является хорошим результатом, поскольку на каждое ядро приходилось по 25 000 контрольных объемов (300 000 контрольных объемов на всю расчетную область), а эта величина (соотношение числа неизвестных на вычислительную единицу) является пороговой при параллельных вычислениях.

На кластере ТТИ ЮФО было получено, что даже при использовании свыше 128 вычислительных процессоров (для разрешения проточной части использовалось более 2 миллионов контрольных объемов) коэффициент масштабируемости не падал ниже 0.3, что является хорошим показателем. Основные затраты на расчет в пределах одной итерации (рис. 12) складываются из:

- 1) сбора локальных давлений, распределенных по ядрам ЭВМ, на границе сшивки областей гильза–проточная часть;
- 2) сбора локальных давлений, распределенных по ядрам ЭВМ, на границе сшивки областей золотник–проточная часть;
- 3) решения уравнений движения для гильзы методом конечных элементов;
- 4) решения уравнений движения для золотника методом конечных элементов;
- 5) передачи перемещений, полученных в результате движения гильзы в расчетную область проточной части;
- 6) передачи перемещений, полученных в результате движения золотника в расчетную область проточной части;
- 7) решения уравнений движения расчетной области проточной части;
- 8) решения уравнений Навье–Стокса;
- 9) сохранения промежуточных анализов (перемещения в отдельных точках).

Как следует из приведенного графика, основные затраты уходят на решение уравнений движения, уравнения смещения точек расчетной области и уравнений Навье–Стокса (уравнение для давления). Если в первом случае существует достаточное пространство для тактической оптимизации (распараллеливания), то в последних двух необходимы оптимизация процессов выделения и очистки памяти под массивы данных и минимизация межпроцессорного обмена данными при решении линейных систем.

В численном эксперименте движение жидкой среды считалось установившимся, если поток прошел через расчетную область хотя бы один раз (а лучше — несколько, например 10) со скоростью, равной скорости жидкости на входе. Для характерного тестового режима физическое время, за которое поток

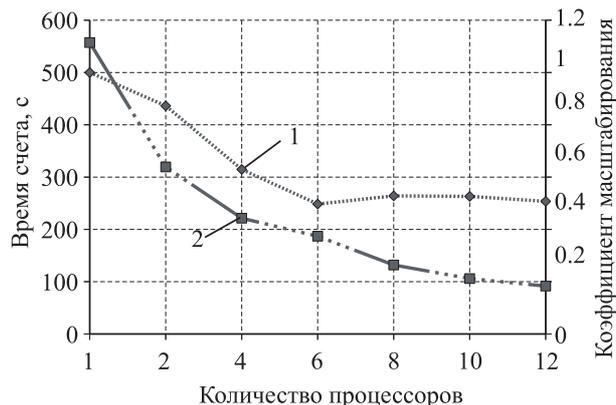


Рис. 11. Анализ масштабируемости кластера ЧелГУ: 1) коэффициент масштабирования, 2) время счета

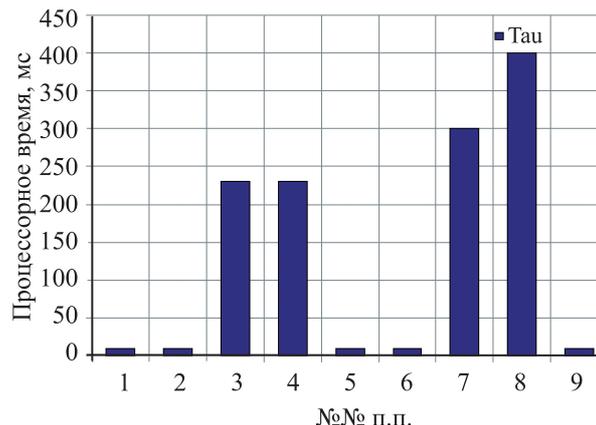


Рис. 12. Затраты процессорного времени на выполнение одного шага интегрирования связанной задачи с одной проточной частью и двумя механическими: 128 вычислительных ядер, 2 миллиона контрольных объемов в проточной части

полностью проходит один раз через расчетную область, составляет 0.8–0.9 с. При шаге физического времени  $10^{-6}$  с требуется 800 000–900 000 итераций, на каждую из которых затрачивается 1210 мс процессорного времени. Получаем, что для набора удовлетворительной статистики необходимо считать как минимум 10 дней. То же самое можно сказать и относительно других режимов, отметив лишь, что в некоторых из них масштаб времени меньше в 10 раз (поскольку скорости выше в 10 раз) по сравнению с базовым вариантом.

На расчеты 20 режимов регулирующего клапана ушло примерно 3 месяца процессорного времени. Оценочные подсчеты показывают, что при выполнении этих же расчетов на обыкновенных ПЭВМ с четырьмя процессорами потребовалось бы более 8 лет.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Васильев В.А., Ницкий А.Ю., Крапошин М.В., Юскин А.В. Исследование возможности параллельных вычислений задач гидроаэродинамики с использованием открытого пакета программ OpenFOAM на кластере “СКИФ Урал” ЮУрГУ // Тр. Междунар. конф. “Параллельные вычислительные технологии ” (ПаВТ-2010). Уфа, 29 марта–2 апреля 2010 г. Челябинск: Издательский центр ЮУрГУ, 2010. 422–430.
2. Крапошин М.В., Самоваров О.И., Стрижак С.В. Опыт использования СПО для проведения расчетов пространственной гидродинамики промышленного масштаба // Тр. конф. “Свободное программное обеспечение”. СПб: Изд-во СПбГПУ, 2010. 44–46.
3. OpenFOAM (version 1.6). The Open Source CFD Toolbox. User Guide. London: OpenCFD Ltd. 2009 (<http://www.openfoam.com/docs/>).
4. OpenFOAM (version 1.6). The Open Source CFD Toolbox. Programmer Guide. London: OpenCFD Ltd, 2009 (<http://www.openfoam.com/docs/>).
5. Jasak H., Weller H.G. Application of the finite volume method and unstructured meshes to linear elasticity // Comp. Meth. Appl. Mech. Engin. 2000. 48. 267–287.
6. Киселев А.С., Киселев А.С., Даничев В.В. Аннотация программы UZOR\_1 // Вопросы атомной науки и техники. Сер.: Физика ядерных реакторов. 1999. Вып. 1. 109–113.
7. Vázquez J.G.V. Nonlinear analysis of orthotropic membrane and shell structures including fluid-structure interaction. PhD Thesis. Universidad politecnica de Cataluña, Barcelona, 2007.
8. Turek S., Hron J., Razzaq M., Wobker H., Schaefer M. Numerical benchmarking of fluid-structure interaction: a comparison of different discretization and solution approaches ([http://www.os-cfd.ru/UserFiles/File/e-library/FSI/027\\_TurekHronRazzaqWobkerSchaefer2010.pdf](http://www.os-cfd.ru/UserFiles/File/e-library/FSI/027_TurekHronRazzaqWobkerSchaefer2010.pdf)).
9. Киселев А.С., Киселев А.С., Крапошин М.В., Таршилов С.Е. Взаимосвязанные гидравлические и прочностные расчетные исследования конструкции БПК, направленные на улучшение его вибрационных характеристик // Отчет РИЦ “Курчатовский Институт” № 31-36/18 от 13.11.2010. М., 2010.

Поступила в редакцию 09.03.2011