

УДК 519.63, 533.697.6

© *И. М. Кузьмин, Л. Е. Тонков*

РАСПРЕДЕЛЕННЫЕ ВЫЧИСЛЕНИЯ В СОПРЯЖЕННЫХ ЗАДАЧАХ ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ ТЕЧЕНИЙ ГАЗА И МНОГИХ ДЕФОРМИРУЕМЫХ ТЕЛ

При численном решении сопряженных задач газодинамики и механики деформируемого твердого тела в рамках разделенного подхода каждая из физических подзадач решается независимо с использованием соответствующих программных модулей. Рассматривается модель распределенного программного обеспечения, основанная на компонентном подходе, позволяющем связывать между собой произвольное число программных компонент, соответствующих физическими подзадачам. Приводится общая математическая постановка сопряженной задачи, включающая уравнения газодинамики, механики деформируемого твердого тела, а также граничные условия сопряжения. Реализация программной модели основана на применении промежуточного программного обеспечения ZeroC Ice и выполнена в соответствии с архитектурой «клиент–сервер». В качестве примера рассмотрены задача о взаимодействии ударной волны с упруго-деформируемым обтюратором, состоящим из двух тонких пластин, а также задача обтекания полого деформируемого цилиндра потоком газа. Приведены результаты численного решения.

Ключевые слова: сопряженная задача, двухстороннее связывание, распределенные вычисления, численное моделирование.

DOI: 10.35634/2226-3594-2020-56-03

Введение

Одним из бурно развивающихся направлений в вычислительной механике сплошных сред на протяжении последнего десятилетия является разработка и развитие вычислительных методов и средств решения сопряженных задач взаимодействия потоков газа с деформируемыми конструкциями (FSI — Fluid-Structure Interaction). Это обусловлено постоянно возрастающей ролью численного моделирования при решении как чисто инженерных задач проектирования новых сложных изделий и систем, так и дальнейшей оптимизации таких систем, что в свою очередь привело к появлению нового направления, получившего название мультидисциплинарной оптимизации конструкций.

Можно выделить два основных подхода к решению рассматриваемых сопряженных задач: монолитный и разделенный [1]. Монолитный подход подразумевает построение единой математической модели и дальнейшую дискретизацию, результатом которой является формирование общей системы алгебраических уравнений. Разделенный основан на независимом решении систем уравнений каждой подзадачи, что приводит к необходимости реализации какой-либо дополнительной процедуры, обеспечивающей выполнение условий согласования решений подзадач на границах сопряжения.

Согласование требует, как правило, многократного решения каждой из физических подзадач. Однако, с точки зрения организации вычислений, такой подход весьма эффективен, так как позволяет применять для решения каждой из подзадач свое независимое приложение и, как следствие, свою модель параллелизма. Помимо этого, в рамках разделенного подхода очевидным образом выделяются приложения, решающие такие вспомогательные задачи как интерполяция значений на границе сопряжения, деформирование расчетных сеток, итерационное согласование решений.

Таким образом, естественным решением является построение мультидисциплинарного программного комплекса с архитектурой клиент–сервер, где каждое приложение–сервер эффективным образом распараллелено, решает свою узкоспециальную прикладную задачу и обменивается расчетными данными через клиента с другими серверами. Это обеспечивает значительную универсальность и гибкость, благодаря возможности объединять независимые приложения, от которых требуется лишь использование соответствующего прикладного программного интерфейса синхронизации и обмена данными. На текущий момент можно выделить несколько распространенных реализаций: MrCCI [2], CoMA [3], preCICE [4], реализующих технологию двухсторонних коммуникаций и обеспечивающих программную поддержку разделенного подхода решения сопряженных задач FSI.

В работе рассмотрена компонентная модель программного обеспечения распределенного решения сопряженных задач, построенная авторами на основе промежуточного программного обеспечения ZeroC Ice [5], приведены примеры численного решения модельных задач.

§ 1. Математическая модель

Рассматривается сопряженная задача взаимодействия потока вязкого сжимаемого газа с деформируемым твердым телом. Во всех рассматриваемых далее примерах полагается, что газ вязкий и подчиняется уравнению состояния идеального газа $p = \rho RT$ и справедлива следующая система уравнений сохранения:

$$\begin{aligned} \partial \rho_g / \partial t + \nabla \cdot (\rho_g \mathbf{v}) &= 0, \\ \partial \rho_g \mathbf{v} / \partial t + \nabla \cdot (\rho_g \mathbf{v} \mathbf{v}) &= -\nabla p_g - \nabla \cdot \sigma_g, \\ \partial \rho E_g / \partial t + \nabla \cdot (\rho E_g \mathbf{v}) &= -p_g (\nabla \cdot \mathbf{v}) - \nabla \cdot q - \nabla \cdot (\sigma_g \cdot \nabla \mathbf{v}), \end{aligned} \quad (1.1)$$

где ρ_g — плотность газа, p_g — давление, T — температура, \mathbf{v} — вектор скорости, $\sigma_g = -\mu(\nabla \mathbf{v} + \nabla \mathbf{v}^T) + \frac{2}{3}\mu(\nabla \mathbf{v})I$ — тензор вязких напряжений, $E_g = \frac{1}{2}\mathbf{v}^2 + c_v T$ — полная энергия, q — тепловой поток.

Динамика напряженно-деформированного состояния тела описывалась системой уравнений

$$\nabla \cdot \sigma_s + \rho_s \mathbf{b} = \rho_s \ddot{\mathbf{u}}, \quad (1.2)$$

где $\sigma_s = \lambda \text{Tr} \varepsilon(\mathbf{u})I + 2\mu \varepsilon(\mathbf{u})$ — тензор напряжений Коши; $\varepsilon(\mathbf{u}) = 1/2(\nabla \mathbf{u} + \nabla \mathbf{u}^T)$ — тензор малых деформаций; ρ_s — плотность твердого тела.

Соответствующая конечно-элементная аппроксимация системы (1.2) движения панели имела вид

$$M \ddot{\mathbf{u}} + K \mathbf{u} = f(t),$$

где M — матрица масс; K — матрица жесткости. Численное интегрирование данной системы по времени выполнялось по схеме Ньюмарка, аппроксимация перемещений строилась на линейных четырехугольных элементах.

На каждой из границ сопряжения Γ для произвольного момента времени должны выполняться условия сопряжения:

$$\dot{\mathbf{u}}_\Gamma(t) = \mathbf{v}_\Gamma(t), \quad \ddot{\mathbf{u}}_\Gamma(t) = \dot{\mathbf{v}}_\Gamma(t), \quad p_s \mathbf{n}_s = p_g \mathbf{n}_g,$$

где p_s, p_g — давление на границе Γ ; $\mathbf{n}_g = -\mathbf{n}_s$ — внешние к Γ нормали соответствующие областям, занятым газом и телом соответственно.

Представим решение задач газодинамики и механики деформирования в следующем символическом виде

$$\begin{aligned} p_\Gamma &= F(\mathbf{u}_\Gamma), \\ \mathbf{u}_\Gamma &= S(p_\Gamma). \end{aligned}$$

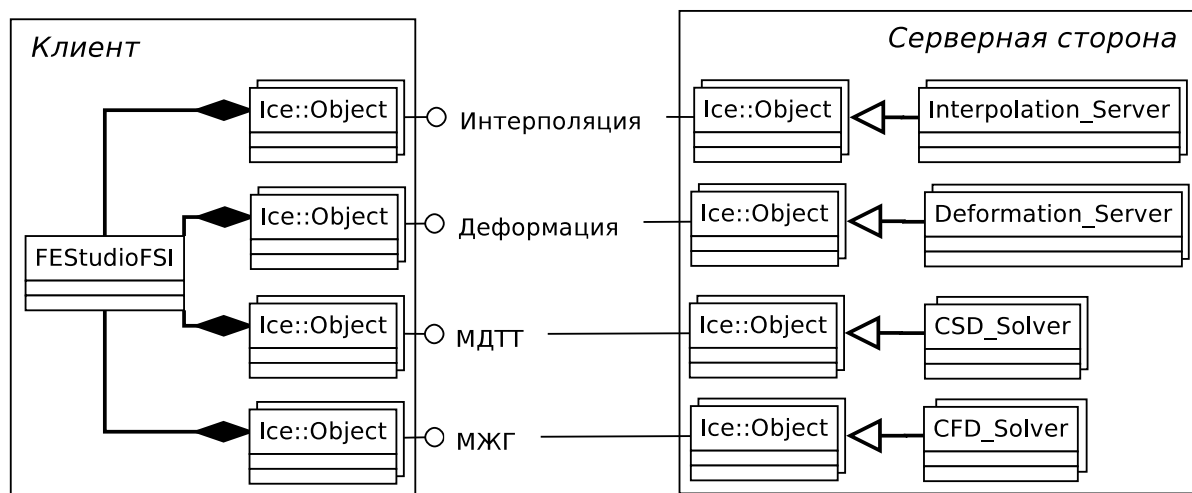


Рис. 1. Распределенная программная модель связывания отдельных приложений

То есть с точки зрения решения сопряженной задачи оператор F строит по перемещениям границы \mathbf{u}_Γ распределение давления p_Γ на ней, а оператор S по значениям p_Γ определяет перемещения этой границы \mathbf{u}_Γ .

Решение сопряженной задачи теперь можно представить как задачу (итерационного) определения неподвижной точки некоторого оператора

$$\begin{aligned} \mathbf{u}_\Gamma &= S(F(\mathbf{u}_\Gamma)) = [S \circ F](\mathbf{u}_\Gamma), \\ \mathbf{u}_\Gamma^{k+1} &= H(\mathbf{u}_\Gamma^k), \end{aligned} \quad (1.3)$$

что и соответствует алгоритму сильного связывания в рамках разделенного подхода решения задач FSI.

§ 2. Программная модель вычислений

Распределенная программная модель построена на основе промежуточного программного обеспечения ZeorC Ice [5], в рамках парадигмы клиент–сервер. Клиентское приложение FEStudioFSI связано с остальными приложениями и реализует логику работы всей программы. В случае жесткого связывания, при решении сопряженной задачи, клиент синхронизирует передачу данных, выполняет корректировку параметров и проверку сходимости итерационного процесса (1.3), то есть управляет согласованием решений физических подзадач на интерфейсной границе Γ .

В рассматриваемой программной модели серверами являются приложения, осуществляющие решение отдельных задач. Для обеспечения вычислительного процесса клиент хранит информацию о прокси-объектах серверов (рис. 1), каждый из которых, являясь Ice-объектом, предоставляет уникальное имя и скрывает все низкоуровневые детали при обмене данными с соответствующим сервером. Экземпляры сервера CFD_Solver, отвечающие за решение задачи газодинамики, реализованы средствами библиотеки OpenFOAM. Решение динамической задачи деформируемого твердого тела осуществляется сервером CSD_Solver, реализованного в рамках пакета FEStudio [6].

Отдельный сервер Interpolation_Solver отвечает за интерполяцию данных и их передачу между серверами, обеспечивающими решение физических подзадач. Сервер Deformation_Solver осуществляет деформирование сетки, необходимое для решения задачи газодинамики.

Описанный механизм построения приложения на инфраструктуре Ice позволяет, путем замены объектов, получить распределенную объектно-ориентированную программу, соответствующую конкретной сопряженной задаче FSI. Такой подход обеспечивает наибольшую

универсальность и позволяет объединять независимые приложения, от которых требуется лишь использование соответствующего прикладного программного интерфейса.

ZeroC Ice является объектно-ориентированным ППО, то есть предоставляет средства для разработки объектно-ориентированных распределенных приложений. Клиентами называются активные сущности, запрашивающие определенные сервисы у сервера. Серверами называются пассивные сущности, предоставляющие сервисы в ответ на запросы клиентов. Модель программирования Ice основана на понятии Ice-объекта. Это абстракция, которая может отвечать на запросы клиентов, функционировать на одном сервере или на нескольких. Каждый Ice-объект имеет уникальный идентификатор и набор интерфейсов – фасетов.

Клиент использует для вызова Ice-объекта так называемый прокси (proxy). Прокси – это представитель Ice-объекта на стороне клиента, в его локальном адресном пространстве. Код прокси для определенного языка программирования генерируется Slice-компилятором. Прокси инкапсулирует в себе информацию, необходимую для вызова Ice-объекта: физический адрес сервера, идентификатор объекта и, дополнительно, идентификатор фасета.

Удаленный вызов методов, реализованных на стороне сервера, осуществляется посредством созданных прокси. Кроме того, клиент хранит и обеспечивает консистентность информации общей для взаимодействующих серверов, например, вектора перемещений u_T и давления p_T на границе сопряжения, для последующего использования в расчете, а также управляет логикой работы всей программы.

Со стороны серверов поведение Ice-объектов реализуется с помощью сервантов. Фактически, сервант – это экземпляр реализованного класса. Базовый код серванта генерируется Slice-компилятором, от разработчика требуется реализовать методы класса, которые соответствуют операциям из интерфейса Ice-объекта. При поступлении вызова среда исполнения Ice на стороне сервера находит соответствующий вызываемому объекту сервант и делегирует ему обработку вызова. Каждый из серверов реализует методы, необходимые для распределенного решения задачи: вычисление перемещений (сервант CSD_Server), определение поля давления (сервант CFD_Server), передача полученных решений клиенту, получение новых данных о перемещении и давлении, необходимых для следующего шага решения и так далее.

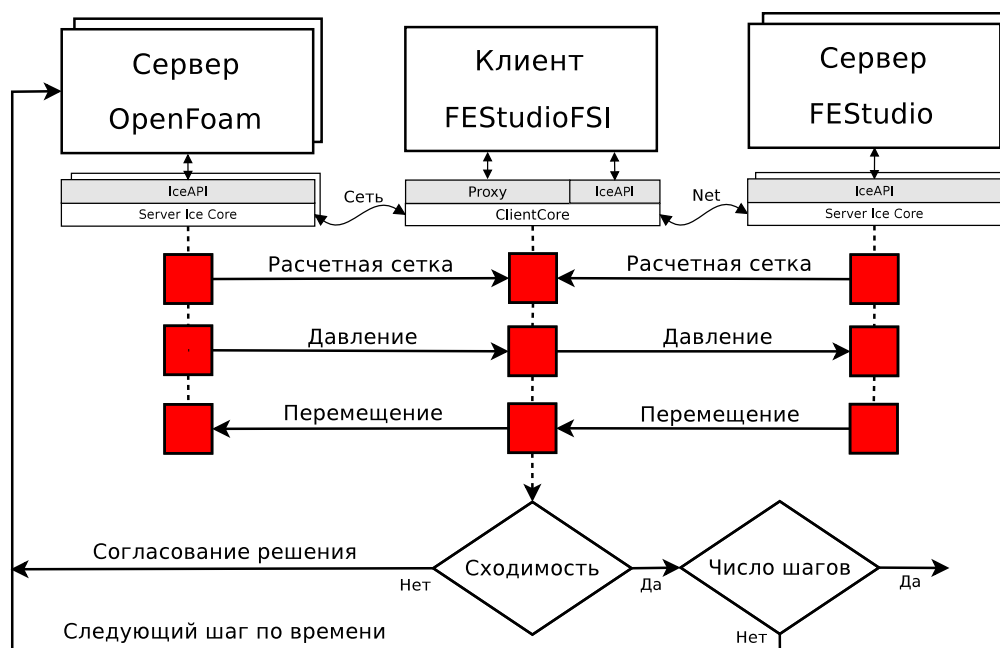


Рис. 2. Распределенная модель решения задачи FSI

На рис. 2 показана распределенная модель приложения FESudioFSI. Она представляет

собой объединение нескольких Ice-объектов, соответствующих приложениям, написанным с применением библиотек OpenFOAM, FESstudio и клиенту FESstudioFSI.

Ice поддерживает модели синхронных и асинхронных вызовов. В последнем случае клиент, вызывая объект при помощи прокси, наряду с обычными параметрами операции, передает прокси специальный callback-объект. После вызова прокси управление сразу возвращается клиенту. При завершении вызова объекта, среда выполнения Ice на клиентской стороне вызывает метод callback-объекта, передавая ему результаты вызова или исключения. С точки зрения сервера, обработка синхронных и асинхронных вызовов выглядит абсолютно одинаково, что обеспечивает дополнительную гибкость при организации вычислений.

§ 3. Тестовые примеры и результаты численного решения

Для целей тестирования и иллюстрации функциональных возможностей разработанного ПО FESstudioFSI рассмотрим две сопряженных задачи взаимодействия вязкого газа и деформируемого твердого тела.

Несмотря на значительный прогресс в области численных исследований задач FSI, на данный момент неизвестны достаточно общие примеры, имеющие аналитические решения, которые могли бы использоваться в качестве модельных для целей тестирования. Круг тестовых задач, имеющих экспериментальное описание и решаемых численно для сравнительного анализа методов, алгоритмов и их программных реализаций, также весьма узок.

Характерной чертой представленных далее задач является наличие многих взаимодействующих тел, что позволяет проиллюстрировать преимущества компонентной модели.

Реализация решения каждой из физических подзадач основывалась на максимально полном использовании ранее созданного кода, при этом каждое отдельное приложение использовало свою модель параллелизма, независимую параллельную реализацию специфических численных методов и алгоритмов со своими требованиями к среде параллельного выполнения. Разработанное промежуточное программное обеспечение FESstudioFSI позволяет решать задачи FSI с учетом указанных особенностей и с минимальными изменениями исходного кода имеющихся приложений.

В рассматриваемых далее задачах система уравнений газовой динамики решается лагранжево-эйлеровым конечно-объемным методом, реализованным средствами библиотеки OpenFOAM, а на этапе решения задач деформирования применяется конечно-элементный пакет FESstudio [6].

§ 3.1. Взаимодействие набегающей ударной волны с деформируемым обтюратором

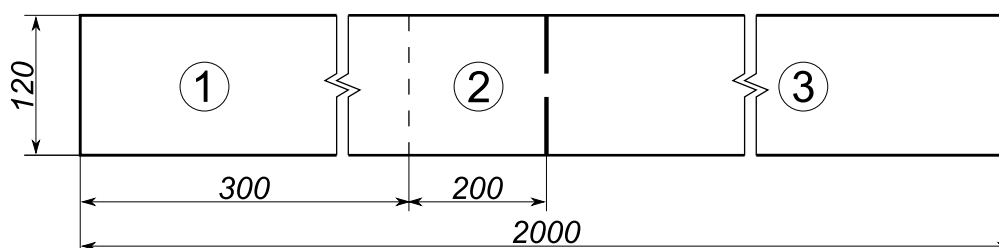


Рис. 3. Схема расчетной области: пунктиром показано положение разрушаемой перегородки

Первый тест представляет собой решение задачи о взаимодействии плоской ударной волны с упруго-деформируемым обтюратором в двумерной постановке. Расчетная область (рис. 3) представляет собой модель закрытой ударной трубы, где в объеме 1, отделенном перегородкой, находится неподвижный, сжатый до давления $p_1 = 2.45 \cdot 10^5$ Па, идеальный газ с показателем адиабаты $\gamma = 1.4$ и температурой $T_1 = 293$ К. Остальной объем

заполнен тем же газом с параметрами $p_2 = 1 \cdot 10^5$ Па, $T_2 = T_1$. В момент времени $t = 0$ перегородка разрушается и в области 2 формируется плоская ударная волна, которая далее, взаимодействуя с деформируемым obtюратором, формирует в области 3 вихревое течение со сверхзвуковым ядром. Obtюратор выполнен в виде двух расположенных симметрично упругих пластин высотой 50 мм и толщиной 1 мм. Модуль Юнга $E = 210$ ГПа, коэффициент Пуассона $\nu = 0.3$. Общая картина течения показана на рис. 4.

Задача аналогична рассмотренной в [7, 8] и в силу симметрии расчетной области развитие процесса деформирования верхней и нижней пластин obtюратора должно быть одинаковым и, кроме того, совпадать с наблюдаемым в эксперименте [7].

Решение задачи деформирования для каждой из пластин obtюратора осуществляется независимо и реализуется отдельным собственным приложением CSD_Solver. Для задачи газодинамики выделяется единственный CFD_Solver. Помимо этого с помощью двух отдельных серверов осуществляется согласование решений и интерполяция данных на двух границах сопряжения.

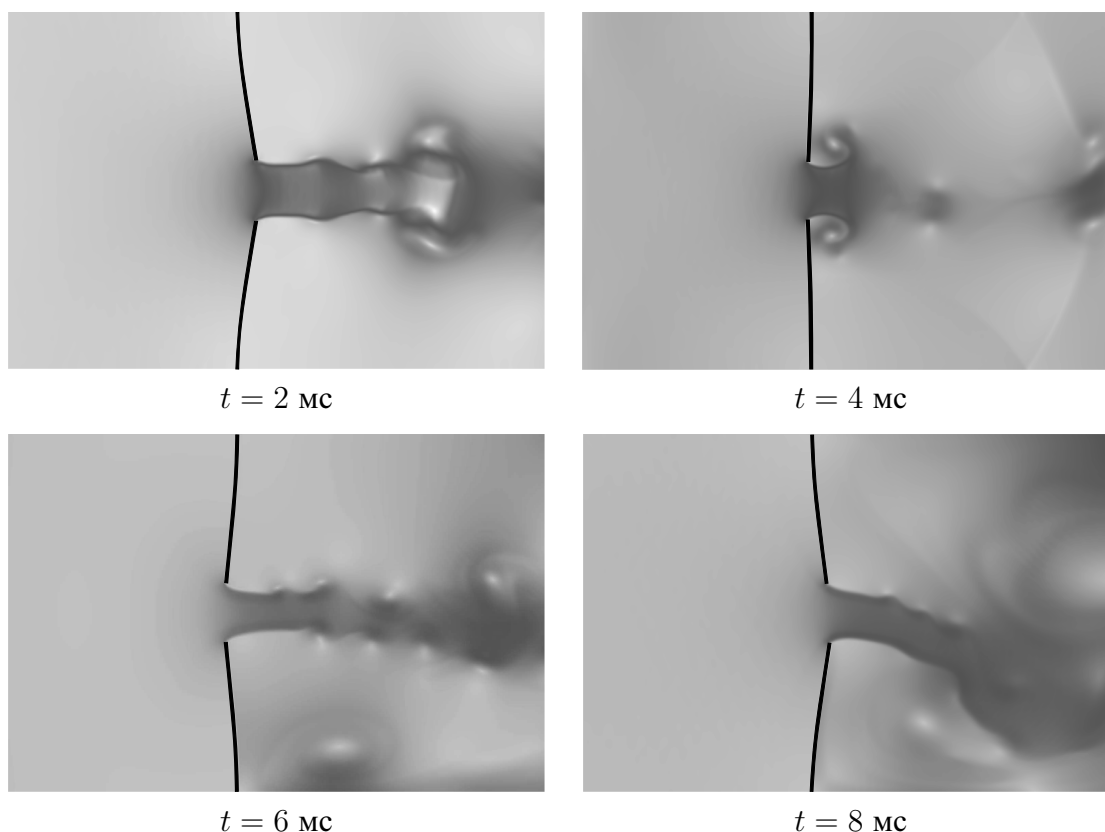


Рис. 4. Поле модуля скорости течения, индуцированного взаимодействием ударной волны с упруго-деформируемым obtюратором в разные моменты времени

На рис. 5 представлены графики перемещений свободного края для каждой пластины obtюратора в сравнении с экспериментальными и расчетными данными [7].

Следует отметить, что нарушение симметрии течения газа и движения пластин неизбежно возникает через определенный промежуток времени, что обусловлено физической природой моделируемого течения и происходит вне зависимости от последовательного, параллельного или распределенного варианта реализации приложения.

§ 3.2. Взаимодействие потока газа с полым деформируемым цилиндром

Следующий тест моделирует взаимодействие набегающего потока газа и цилиндра, разделенного внутренней перегородкой на две полости, каждая из которых заполнена газом

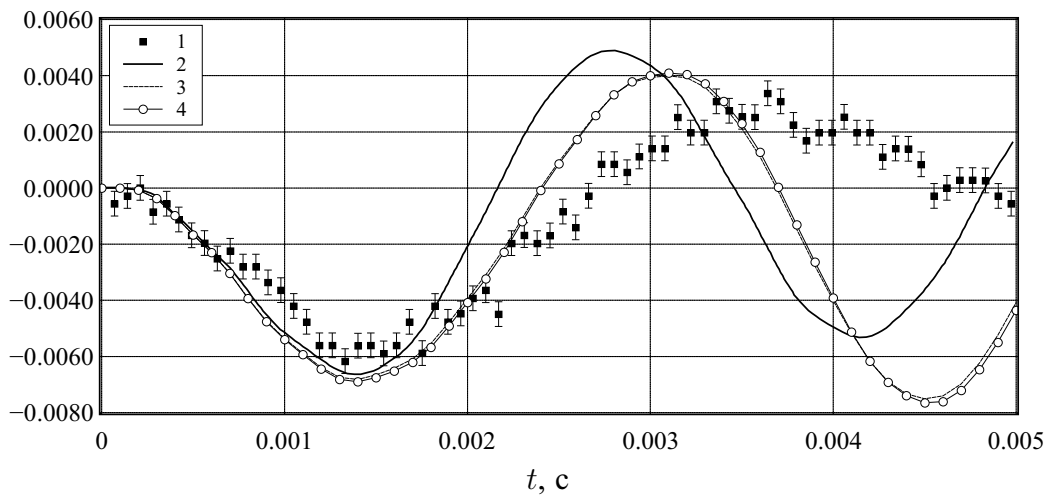


Рис. 5. Зависимость от времени перемещений свободного края пластины: 1 — эксперимент [7]; 2 — расчет [7]; 3, 4 — расчет для нижней и верхней пластины соответственно

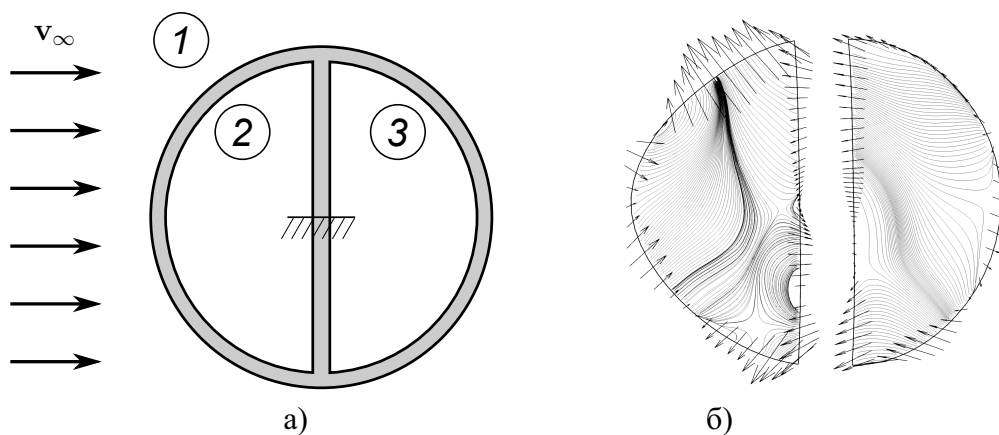


Рис. 6. Схема области (а) и мгновенные линии тока внутреннего течения (б); векторы показывают текущую скорость деформирования границ

(рис. 6, *a*). Рассматриваемая задача не имеет ни соответствующего экспериментального описания, ни прямого прикладного значения и рассматривается только как тестовый пример, иллюстрирующий применение компонентной модели разработанного ПО FESudioFSI.

Набегающий поток газа имеет следующие параметры: $v_\infty = 120$ м/с, $T_\infty = 300$ К, что соответствует числу Маха $M = 0.34$. Число Рейнольдса, построенное по диаметру цилиндра, $Re = 1000$. В обеих полостях находится тот же газ, с начальным давлением $p = 10^5$ Па и $T_0 = 300$ К.

Цилиндр с внешним диаметром $D = 100$ мм, внутренним диаметром $d = 90$ мм, с толщиной стенки $h = 5$ мм жестко закреплен в средней части. Модуль Юнга $E = 50$ МПа, коэффициент Пуассона $\nu = 0.3$. В начальный момент времени деформации отсутствуют, течение — установившееся, периодическое, с образованием вихревой дорожки.

В этом примере, в рамках решения сопряженной задачи, выделялись несколько серверов: три независимых CFD_Solver — по одному для решения каждой из задач газодинамики в соответствующей области; один CSD_Solver, решающий задачи механики деформируемого твердого тела, а также дополнительные два сервера, выполняющие согласование решения и интерполяцию данных на границе, соответственно.

Следует отметить, что течение газа во внутренних полостях цилиндра (2 и 3, рис. 6, *a*) полностью определяется скоростью деформирования границ области (рис. 6, *b*) и в силу малости абсолютных значений (не более 1.5 м/с) никакого заметного влияния на динамику деформирования цилиндра не оказывает. Однако, с целью тестирования здесь также решалась полная система уравнений газодинамики (1.1) методом на основе PISO с учетом малости скорости течения, в отличие от расчета внешнего скоростного обтекания в области 1 (рис. 6, *a*), где применялся метод на основе расщепления потоков [9].

На рис. 7 показаны зависимости от времени аэродинамических коэффициентов цилиндра, полученные с учетом деформаций под действием набегающего потока, в сравнении с коэффициентами для недеформируемого цилиндра. Наибольшее влияние деформации оказывают на коэффициент лобового сопротивления C_x , добавляя низкочастотную пульсационную составляющую значительной амплитуды.

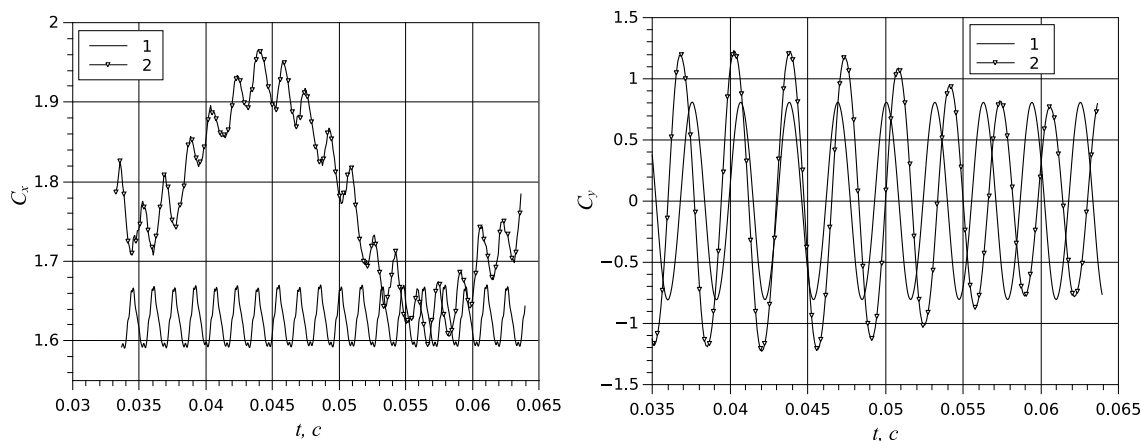


Рис. 7. Зависимость коэффициентов лобового сопротивления (C_x) и подъемной силы (C_y) от времени: 1 — недеформируемый цилиндр, 2 — деформируемый цилиндр

Все расчеты были выполнены с использованием вычислительных ресурсов суперкомпьютера «УРАН» Центра коллективного пользования СКЦ ИММ УрО РАН г. Екатеринбург.

Финансирование. Исследования первого автора выполнены при финансовой поддержке Удмуртского государственного университета в рамках работ по гранту конкурса «Научный потенциал» № 2020–04–16. Исследования второго автора выполнены при финансовой поддержке Министерства науки и высшего образования РФ в рамках выполнения работ по

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Farhat C., Lesoinne M. Two efficient staggered algorithms for the serial and parallel solution of three-dimensional nonlinear transient aeroelastic problems // *Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering*. 2000. Vol. 182. Issues 3–4. P. 499–515. [https://doi.org/10.1016/S0045-7825\(99\)00206-6](https://doi.org/10.1016/S0045-7825(99)00206-6)
2. Ahrem R. Multidisciplinary simulations with the coupling library MpCCI // *Proceedings in Applied Mathematics and Mechanics*. 2002. Vol. 1. Issue 1. P. 39–42. [https://doi.org/10.1002/1617-7061\(200203\)1:1<39::AID-PAMM39>3.0.CO;2-0](https://doi.org/10.1002/1617-7061(200203)1:1<39::AID-PAMM39>3.0.CO;2-0)
3. Breuer M., De Nayer G., Münsch M., Gallinger T., Wüchner R. Fluid-structure interaction using a partitioned semi-implicit predictor-corrector coupling scheme for the application of large-eddy simulation // *Journal of Fluids and Structures*. 2012. Vol. 29. P. 107–130. <https://doi.org/10.1016/j.jfluidstructs.2011.09.003>
4. Bungartz H.-J., Benk J., Gatzhammer B., Mehl M., Neckel T. Partitioned simulation of fluid-structure interaction on Cartesian grids // *Fluid Structure Interaction II*. Berlin: Springer, 2010. P. 255–284. https://doi.org/10.1007/978-3-642-14206-2_10
5. Henning M. A new approach to object-oriented middleware // *IEEE Internet Computing*. 2004. Vol. 8. Issue 1. P. 66–75. <https://doi.org/10.1109/MIC.2004.1260706>
6. Копысов С. П., Кузьмин И. М., Недожогин Н. С., Новиков А. К., Рычков В. Н., Сагдеева Ю. А., Тонков Л. Е. Параллельная реализация конечно-элементных алгоритмов на графических ускорителях в программном комплексе FESstudio // *Компьютерные исследования и моделирование*. 2014. Т. 6. Вып. 1. С. 79–97. <https://doi.org/10.20537/2076-7633-2014-6-1-79-97>
7. Giordano J., Jourdan G., Burtshell Y., Medale M., Zeitoun D. E., Houas L. Shock wave impacts on deforming panel, an application of fluid-structure interaction // *Shock Waves*. 2005. Vol. 14. Issue 1–2. P. 103–110. <https://doi.org/10.1007/s00193-005-0246-9>
8. Копысов С. П., Кузьмин И. М., Тонков Л. Е. Моделирование взаимодействия сверхзвукового потока и деформируемой панели в ударной трубе // *Вестник Удмуртского университета. Математика. Механика. Компьютерные науки*. 2012. Вып. 2. С. 156–165. <https://doi.org/10.20537/vm120214>
9. Greenshields C. J., Weller H. G., Gasparini L., Reese J. M. Implementation of semi-discrete, non-staggered central schemes in a colocated, polyhedral, finite volume framework, for high-speed viscous flows // *International Journal for Numerical Methods in Fluids*. 2010. Vol. 63. Issue 1. P. 1–21. <https://doi.org/10.1002/flid.2069>

Поступила в редакцию 01.10.2020

Кузьмин Игорь Михайлович, старший преподаватель, кафедра вычислительной механики, Удмуртский государственный университет, 426034, Россия, г. Ижевск, ул. Университетская, 1.

E-mail: imkuzmin@gmail.com

Тонков Леонид Евгеньевич, к. ф.-м. н., доцент, кафедра вычислительной механики, Удмуртский государственный университет, 426034, Россия, г. Ижевск, ул. Университетская, 1.

E-mail: letonkov@mail.ru

Цитирование: И. М. Кузьмин, Л. Е. Тонков. Распределенные вычисления в сопряженных задачах взаимодействия течений газа и многих деформируемых тел // *Известия Института математики и информатики Удмуртского государственного университета*. 2020. Т. 56. С. 30–40.

Keywords: conjugate problem, two-sided coupling, distributed calculations, numerical modeling.

MSC2010: 74F10, 65Y05

DOI: 10.35634/2226-3594-2020-56-03

In the mathematical modeling of conjugated problems of gas dynamics and mechanics of a deformable solid body within the partitioned approach, each of the physical problems is solved independently using the appropriate software. In the article, we consider a distributed software model built on the basis of components approach that makes it possible to connect an arbitrary number of components related to physical problems. The mathematical formulation of the problems of gas dynamics, mechanics of a deformable rigid body, as well as the boundary conditions for the conjugation of physical regions are given. The programming model is based on the ZeroC Ice middleware, which implements a distributed client–server model. As an example, we consider the problems of interaction of a shock wave with an elastically deformable obturator, consisting of two thin plates, as well as the interaction of a hollow deformable cylinder with a flow of gas. The results of numerical solution are given.

The research was performed using computing resources of the collective use center of IMM UB RAS “Supercomputer center of IMM UB RAS”.

Funding. The study of the first author was funded by the Udmurt State University, project no. 2020–04–16. The study of the second author was funded by the Ministry of Science and Higher Education of the Russian Federation in the framework of state assignment No. 075-00232-20-01, project 0827-2020-0010.

REFERENCES

1. Farhat C., Lesoinne M. Two efficient staggered algorithms for the serial and parallel solution of three-dimensional nonlinear transient aeroelastic problems, *Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering*, 2000, vol. 182, issues 3–4, pp. 499–515.
[https://doi.org/10.1016/S0045-7825\(99\)00206-6](https://doi.org/10.1016/S0045-7825(99)00206-6)
2. Ahrem R. Multidisciplinary simulations with the coupling library MpCCI, *Proceedings in Applied Mathematics and Mechanics*, 2002, vol. 1, issue 1, pp. 39–42.
[https://doi.org/10.1002/1617-7061\(200203\)1:1<39::AID-PAMM39>3.0.CO;2-0](https://doi.org/10.1002/1617-7061(200203)1:1<39::AID-PAMM39>3.0.CO;2-0)
3. Breuer M., De Nayer G., Münsch M., Gallinger T., Wüchner R. Fluid-structure interaction using a partitioned semi-implicit predictor-corrector coupling scheme for the application of large-eddy simulation, *Journal of Fluids and Structures*, 2012, vol. 29, pp. 107–130.
<https://doi.org/10.1016/j.jfluidstructs.2011.09.003>
4. Bungartz H.-J., Benk J., Gatzhammer B., Mehl M., Neckel T. Partitioned simulation of fluid-structure interaction on Cartesian grids, *Fluid Structure Interaction II*, Berlin: Springer, 2010. P. 255–284.
https://doi.org/10.1007/978-3-642-14206-2_10
5. Henning M. A new approach to object-oriented middleware, *IEEE Internet Computing*, 2004, vol. 8, issue 1, pp. 66–75. <https://doi.org/10.1109/MIC.2004.1260706>
6. Kopysov S. P., Kuz'min I. M., Nedozhogin N. S., Novikov A. K., Rychkov V. N., Sagdeeva Yu. A., Tonkov L. E. Parallel implementation of a finite-element algorithms on a graphics accelerator in the software package FEStudio, *Computer Research and Modeling*, 2014, vol. 6, issue 1, pp. 79–97.
<https://doi.org/10.20537/2076-7633-2014-6-1-79-97>
7. Giordano J., Jourdan G., Burtshell Y., Medale M., Zeitoun D. E., Houas L. Shock wave impacts on deforming panel, an application of fluid-structure interaction, *Shock Waves*, 2005, vol. 14, issue 1–2, pp. 103–110. <https://doi.org/10.1007/s00193-005-0246-9>

8. Kopysov S.P., Kuz'min I.M., Tonkov L.E. Modeling of interaction of a supersonic stream and the deformable panel in a shock tube, *Vestnik Udmurtskogo Universiteta. Matematika. Mekhanika. Komp'yuternye Nauki*, 2012, issue 2, pp. 156–165. <https://doi.org/10.20537/vm120214>
9. Greenshields C.J., Weller H.G., Gasparini L., Reese J.M. Implementation of semi-discrete, non-staggered central schemes in a colocated, polyhedral, finite volume framework, for high-speed viscous flows, *International Journal for Numerical Methods in Fluids*, 2010, vol. 63, issue 1, pp. 1–21. <https://doi.org/10.1002/flid.2069>

Received 01.10.2020

Kuz'min Igor' Mikhailovich, Senior Lecturer, Udmurt State University, ul. Universitetskaya, 1, Izhevsk, 426034, Russia.

E-mail: imkuzmin@gmail.com

Tonkov Leonid Evgen'evich, Candidate of Physics and Mathematics, Associate Professor, Udmurt State University, ul. Universitetskaya, 1, Izhevsk, 426034, Russia.

E-mail: letonkov@mail.ru

Citation: I.M. Kuz'min, L.E. Tonkov. Distributed calculations in conjugated problems of interaction between gas flows and deformable bodies, *Izvestiya Instituta Matematiki i Informatiki Udmurtskogo Gosudarstvennogo Universiteta*, 2020, vol. 56, pp. 30–40.