

5. Выводы

В докладе рассмотрены предназначенные для решения нелинейных систем неточные методы Ньютона, соответствующие двум вариантам выбора управляющих параметров.

В результате проведенного численного исследования установлено, что

– по числу линейных итераций расчеты в дельта-форме хорошо согласуются с теорией неточных методов Ньютона, изложенной в работах [2, 3], при этом снижение начальной точности в критерии (8) приводит к уменьшению числа линейных итераций при практически одинаковом числе нелинейных итераций;

– критерий (8) эффективнее критерия (9), в расчетах с критерием (9) число линейных итераций более чем на 30 % превышает общее число внутренних итераций в расчетах с критерием (8);

– по сравнению с записью разностного уравнения в T -форме расчет в дельта-форме на рассматриваемых тестовых задачах газодинамики с теплопроводностью примерно на 10 % выполняется быстрее.

Литература

1. Бахвалов Н. С., Жидков Н. П., Кобельков Г. М. Численные методы. М.: Наука, 1987.
2. Dembo R. S., Eisenstat S. C., Steihaug T. Inexact Newton methods // SIAM J. Numer. Anal. 1982. Vol. 19. P. 400–408.
3. Eisenstat S. C., Walker H. F. Choosing the forcing terms an inexact Newton method // SIAM J. SCI. Comput. January 1996. Vol. 17, N 1. P. 16–32.
4. Woodward C. S. SUNDIALS: Suite of nonlinear and differential/algebraic equation solvers // Lawrence Livermore National Laboratory, UCRL-PRESS-213978.
5. Бондаренко Ю. А., Горбунов А. А. Практические условия устойчивости для счета тепловых волн в неявных разностных схемах // Вопросы атомной науки и техники. Сер. Математическое моделирование физических процессов. 2008. Вып. 4. С. 3–12.
6. Харлоу Ф. Н. Численный метод частиц в ячейках для задач гидродинамики. Вычислительные методы в гидродинамике. М.: Мир, 1967. С. 316–342.
7. Павленко О. Н., Литвиненко И. А. Моделирование трехмерного течения газа методом частиц на адаптивно-встраиваемой сетке. Расчет задачи о точечном взрыве // Вопросы атомной науки и техники. Сер. Математическое моделирование физических процессов. 2003. Вып. 4. С. 61–67.
8. Бартенев Ю. Г., Бондаренко Ю. А., Ерзунов В. А. и др. Комплекс LParSol для решения СЛАУ // XIII Международ. семинар «Супервычисления и математическое моделирование»: Тез. докл. Саров, 3–7 октября, 2011. С. 34–36.

ТЕХНОЛОГИЯ РЕШЕНИЯ ЗАДАЧ НА СЕТКАХ ТИПА «ХИМЕРА» В ПАКЕТЕ ПРОГРАММ ЛОГОС

Ю. Н. Дерюгин, Р. Н. Жучков, Д. К. Зеленский, А. В. Саразов

Российский федеральный ядерный центр –
Всероссийский НИИ экспериментальной физики, г. Саров

Введение

В «РФЯЦ-ВНИИЭФ» разработан пакет программ ЛОГОС [1], предназначенный для решения связанных и сопряженных трехмерных задач теплопереноса и гидродинамики на параллель-

ных ЭВМ. В настоящее время ведется развитие и расширение функциональных возможностей пакета программ. Доклад посвящен особенностям реализации методов расчета задач аэродинамики с использованием сеток с перекрытиями в рамках пакета программ ЛОГОС.

Среди множества вопросов газовой динамики следует выделить класс задач, численное моделирование которых сопряжено с движением отдельных узлов и агрегатов. Это может быть относительное движение объектов, так и изменение формы исследуемого тела. Любое из движений может коренным образом повлиять на характер течения потока.

Для решения задач с подвижными границами могут применяться различные методики. Первый подход основан на применении адаптивных сеток. В данном случае на каждый момент времени генерируется новая геометрия, соответствующая текущему положению объекта. Количество ячеек, граней, узлов, топология связей для данной техники счета изменяются. Существенным минусом такой методики, ограничивающей ее промышленное применение, является ее высокая стоимость с вычислительной точки зрения.

Альтернативой методике, основанной на адаптивных сетках, может быть подход, использующий алгоритмы деформации сетки с сохранением топологии связей. Такой прием позволяет сохранить число геометрических элементов расчетной модели, изменяя лишь координаты узлов, что дает существенный выигрыш по времени и экономии вычислительных ресурсов. Недостатком методики расчета на деформирующихся сетках является довольно узкая область применимости. Подобные алгоритмы могут использоваться в тех случаях, когда обтекаемый объект изменяет свою форму или положение относительно других тел незначительно.

Одним из подходов, позволяющим расширить область применения методов вычислительного анализа для задач с движением объектов, является использование методики с применением многообластных сеток с перекрытиями [2, 3]. Для задач со сложной геометрией не всегда удастся построить качественную расчетную сетку, учитывающую режим течения и геометрические особенности всех элементов. Технология на основе сеток типа «Химера» предполагает генерацию независимых геометрических моделей для различных объектов, которые в дальнейшем объединяются в одну сетку с перекрытиями. Класс таких сеток получил название «Химера». Вычислительный процесс на сетках типа «Химера» учитывает наличие перекрытий и обеспечивает взаимодействие разделенных сеток. В дальнейшем топологически несвязанные сетки будем называть доменами. Данная технология гарантирует постоянство сеточной топологии расчетной модели и лишена недостатков, присущих методикам, основанным на адаптивных и деформирующихся сетках.

1. Методика счета на сетках типа «Химера»

Для лучшего понимания технологии счета на перекрывающихся сетках рассмотрим модельную задачу (рис. 1).

Все дальнейшие рассуждения сохраняют свою справедливость для произвольных нерегулярных трехмерных сеток. Вычислительный процесс методики расчета на сетках с перекрытиями основывается на следующих шагах:

- процедура маркировки, включающая:
 - 1) определение счетных и несчетных ячеек;
 - 2) генерация новых граничных условий;
- построение интерполяционного шаблона, включающее нахождение ячеек доноров и акцепторов.

Операция маркировки ячеек проводится на каждый момент времени с целью определения типа ячейки. Данный шаг необходим, поскольку при перекрытии сеток определенная часть ячеек одной из геометрий может попасть внутрь области другого региона, в котором отсутствуют ячейки.

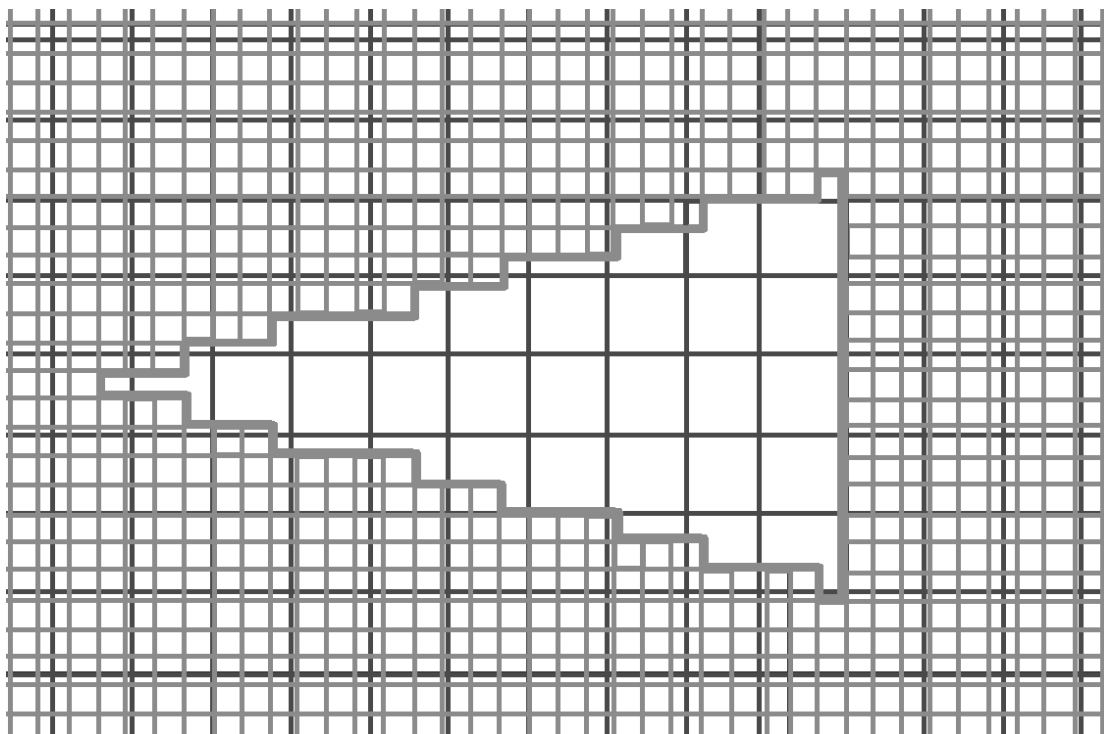


Рис. 1. Пример сетки типа «Химера»

Из рис. 1 видно, что часть ячеек сетки, отображенной черным цветом, лежит внутри несчетной зоны для сетки, помеченной серым цветом. Подобные ячейки должны быть исключены из расчета.

Открытые границы отдельных сеток объявляются интерфейсами (далее IBS – Interpolation Boundary Surface). Границы, являющиеся непроницаемыми, такие как стенка, определяют раздел между счетными и несчетными регионами других сеток. В дальнейшем такого рода граничные условия будем называть NPS (Non-Penetrable Surface). Процедура исключения из расчета помеченных ячеек проводится для каждого домена задачи. В простейшем случае грани, представляющие границу раздела, определяют новый фиктивный интерфейс (далее FBS – Fringe Boundary Surface). С целью повышения точности расчета не рекомендуется проводить выделения непосредственно, используя NPS. Поскольку сгенерированный фиктивный интерфейс FBS будет в непосредственной близости к реальным непроницающим границам. И в силу различия геометрических характеристик ячеек двух сеток может привести к нежелательным эффектам. Поэтому разумно по возможности максимально расширить границы выделения в направлении к открытым границам. Созданные в процессе маркировки новые границы обеспечивают коммуникационное взаимодействие связанных регионов. В свою очередь, открытые интерфейсы IBS обеспечивают обратную связь между регионами и вместе с FBS образуют необходимые начальные данные интерполяционного шаблона.

2. Маркировка

Как было сказано ранее, ключевой функцией маркировки является определение принадлежности ячейки к счетному процессу. Данный этап зависит от расположения границ каждого региона. Данный процесс состоит из шагов:

- определение всех границ типа NPS для каждого региона;
- произведение операции сечения каждой сетки всеми NPS других доменов;
- определение выколотых областей;
- построение на границе раздела всех фиктивных интерфейсов FBS.

Первый шаг для модельной задачи заключается в выделении границей NPS серой сетки ячеек из домена, помеченного черным цветом. Все ячейки, грани, лежащие внутри поверхности NPS, объявляются несчетными в черном домене. Грани, представляющие границу раздела, определяют новый фиктивный интерфейс FBS. Следует понимать, что расширенная граница NPS не должна выходить за пределы локальной расчетной сетки и гарантировала отсутствие пересечений границ отчуждения, принадлежащих разным регионам.

С вычислительной точки зрения самым дорогостоящим этапом построения коммуникационного шаблона является операция сечения [4]. Поэтому следует применять быстрые алгоритмы для задачи определения набора несчетных ячеек.

Завершением этапа маркировки является построение фиктивных граничных условий FBS. Данная процедура проводится путем прямого выбора граней, разделяющих счетные и несчетные домены.

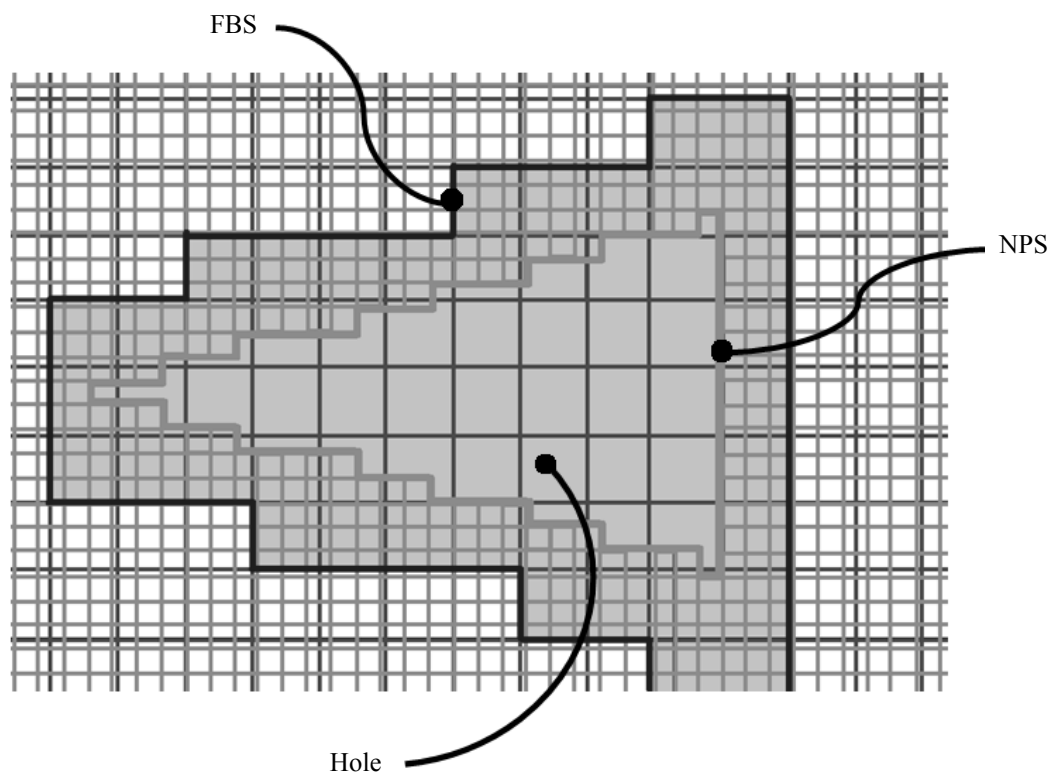


Рис. 2. Результат процесса маркировки

3. Интерполяционный шаблон

Для обеспечения взаимодействия между независимыми регионами помимо формирования списка активных ячеек необходимо произвести поиск доноров и акцепторов. Донором будем называть ячейку, которая является счетной, и расчетные данные которой могут использоваться для граней акцепторов FBS/IBS. Для поиска ячеек доноров необходимо провести процедуру аналогичную сечению NPS, непосредственно используя открытые и фиктивные интерфейсы. Процедура сечения выполняется для всех граней, которые имеют лишь одну счетную ячейку. Для каждой грани находятся ячейки доноры из других регионов, на основе которых выполняется реконструкция параметров на границе.

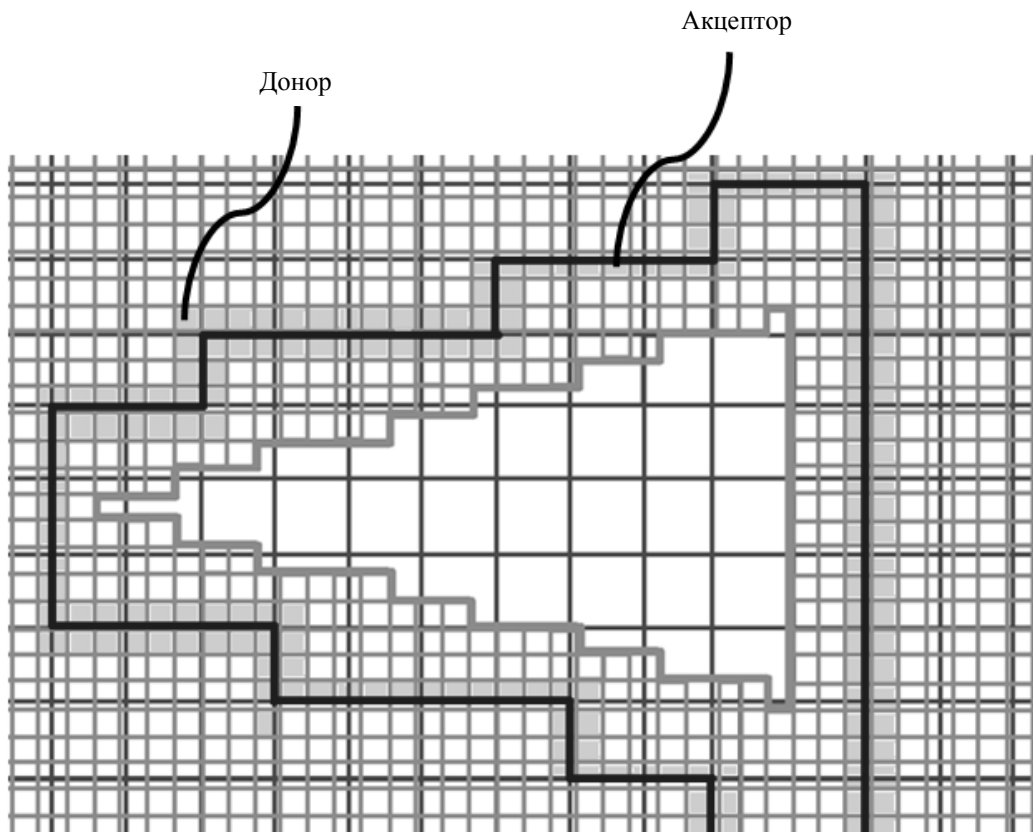


Рис. 3. Интерполяционный шаблон

В качестве алгоритма реконструкции на FBS/IBS для сеток «Химера» в модуле расчета сжимаемых течений применяется метод IDW (Inverse Distance Weighting). Для восстановления значения на грани используется следующее соотношение:

$$\varphi^a(x^a, y^a, z^a, t) = \frac{\sum w_j(\text{Cell}_j^d) \varphi_j^d(x^d, y^d, z^d, t)}{\sum w_j(\text{Cell}_j^d)}, \quad (1)$$

$$w_j(\text{Cell}_j^d) = \frac{\text{Volume}_j}{\|\vec{r}_a - \vec{r}_d\|^2}, \quad (2)$$

где $w_j(\text{Cell}_j^d)$ – весовая функция, Volume_j – объем ячейки донора, \vec{r}_a, \vec{r}_d – радиус вектора центров ячеек акцептора и донора соответственно.

4. Математическая модель

Известно, что для численного расчета процессов с движением границ базовые уравнения Навье – Стокса теряют справедливость. Поэтому для учета фактора движения используется модифицированная система уравнений Навье-Стокса на основе условия геометрической консервативности [5–7]:

$$\frac{\partial}{\partial t} \int_{\Omega(t)} W dV + \int_{\partial\Omega(t)} (F(W) - \dot{x}W) \bar{n} dS - \int_{\partial\Omega(t)} (G(W)) \bar{n} dS = \int_{\Omega(t)} H dV, \quad (3)$$

где \dot{x} – скорость движения грани контрольного объема.

Как видно, первое слагаемое отражает не только изменение консервативных переменных во времени, но и скорость изменения контрольного объема. Так же следует отметить, что при расчете конвективных потоков необходимо учитывать скорость движения грани. В том случае, если все границы неподвижны, то из уравнения (3) следует базовый закон Навье – Стокса.

5. Верификационный расчет

В качестве верификационной задачи предлагается международный тест AGARD23 [8]. Рассматривается нестационарное обтекание потоком вязкого сжимаемого газа крыла, пилона и подвесного груза при числе Маха $M = 0,95$. В эксперименте груз отделялся посредством катапульты, действие которой в численном расчете заменяется действием кратковременных сил, приложенными к определенным точкам. В задаче оцениваются положения груза с течением времени. На рисунках ниже представлены геометрические характеристики, точки приложения внешних сил.

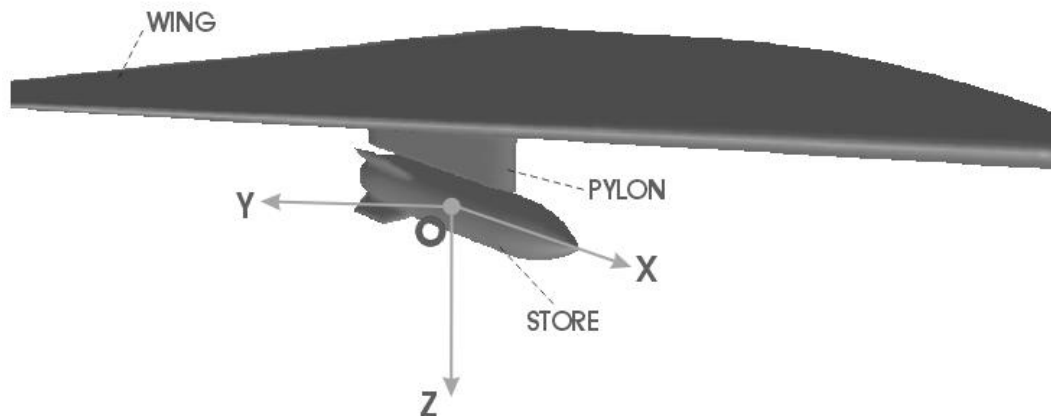


Рис. 4. Общий вид

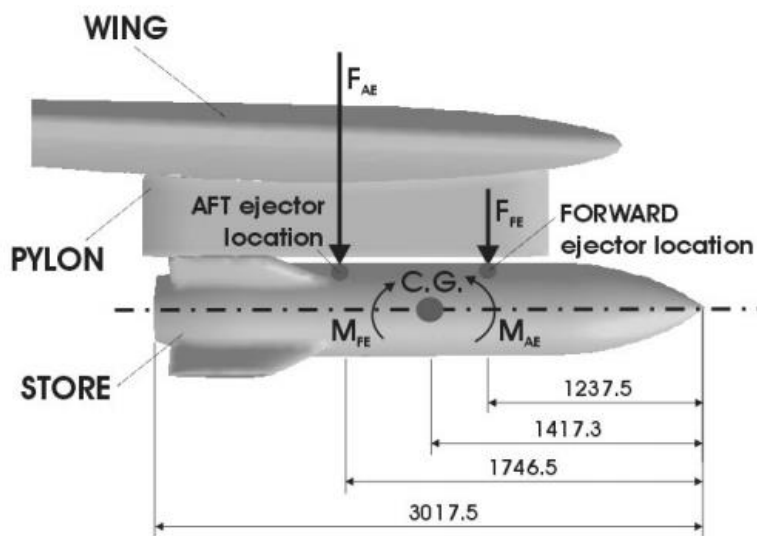


Рис. 5. Геометрические характеристики

Для решения задачи были сгенерированы отдельно друг от друга и в дальнейшем объединены сетки для груза и для крыла. Расчет проводился в два этапа. На первом этапе было получено стационарное решение задачи, которое использовалось как начальное для нестационарного расчета. Для твердого тела задавались масса, компоненты тензора инерции. На объект на протяжении всего счета задачи действовали аэродинамические нагрузки и сила тяжести.

На рисунке ниже представлены результаты моделирования. Как видно из графика результаты моделирования хорошо согласуются с экспериментальными данными.

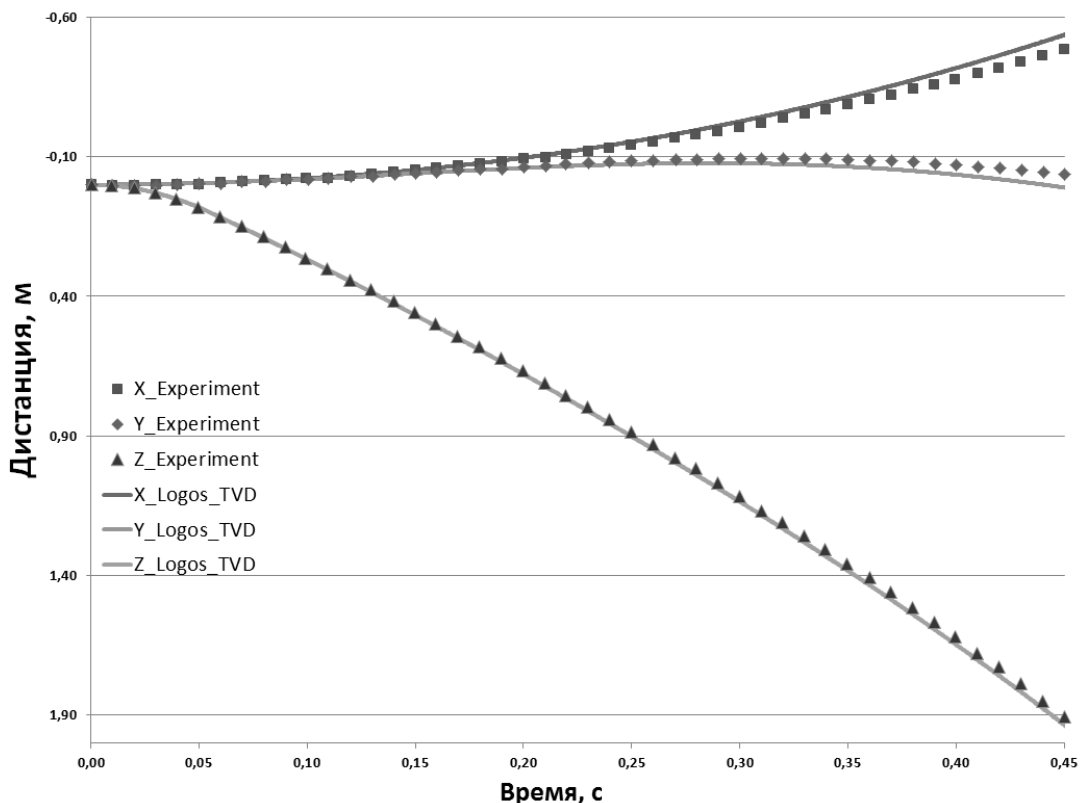


Рис. 6. Положение центра масс груза

Заключение

В докладе изложена методика расчета на сетках типа «Химера». Рассмотрены основные этапы моделирования с учетом перекрытий. Разработанные алгоритмы были протестированы и отлажены на ряде задач, некоторые из которых представлены в докладе. Результаты моделирования позволяют судить о перспективности дальнейшей работы в данном направлении.

В качестве демонстрации работоспособности внедренных алгоритмов представлены результаты моделирования процесса отделения подвесного груза от крыла ЛА. Технология счета на сетках типа «Химера» внедрена в пакет программ ЛОГОС и проходит стадию тестирования.

Литература

1. Погосян М. А., Савельевских Е. П., Шагалиев Р. М. и др. Применение отечественных суперкомпьютерных технологий для создания перспективных образцов авиационной техники // Во-

просы атомной науки и техники. Сер. Математическое моделирование физических процессов. 2013. Вып. 2. С. 3–18.

2. Benek J. A., Buning P. G., Steger J. L. A 3-D Chimera Grid Embedding Technique // AIAA Paper. 1985. N 85–1523.

3. Benek J. A., Donegan T. L., Suhs N. E. Extended Chimera Grid Embedding Scheme With Application to Viscous Flow // Ibid. 1987. N 87–1126.

4. Препарата Ф., Шеймос М. Вычислительная геометрия: Введение: пер. с англ. М.: Мир, 1989.

5. Thomas P. D., Lombard C. K. Geometric conservation law and its application to flow computations on moving grids // AIAA Journal. 1979. Vol. 17, N 10. P. 1030–1037.

6. Mavriplis D. J., Yang Z. Construction of the discrete geometric conservation law for high-order time-accurate simulations on dynamic // J. of Comp. Phys. 2006. 213. P. 557–573.

7. Lesoinne M., Farhat Ch. Geometric conservation laws for flow problems with moving boundaries and deformable meshes, and their impact on aeroelastic computations // Computer methods in applied mechanics and engineering. 1996. 134. P. 71–90.

8. Fox. J. H. 23. Generic Wing, Pylon and Moving Finned Store, Verification and Validation Data for Computational Unsteady Aerodynamics, RTO-TR-26, October 2000, St. Joseph Ottawa/Hill, Canada.

ПАКЕТ ПРОГРАММ ЛОГОС. ФУНКЦИОНАЛЬНЫЕ ВОЗМОЖНОСТИ ДЛЯ РЕШЕНИЯ СВЯЗАННЫХ ЗАДАЧ ПРОЧНОСТИ И ГИДРОДИНАМИКИ СГЛАЖЕННЫХ ЧАСТИЦ

*Д. Ю. Дьянов, А. В. Казанцев, С. В. Морозов, С. В. Стародубов,
К. В. Циберев, А. А. Челаков*

Российский федеральный ядерный центр –
Всероссийский НИИ экспериментальной физики, г. Саров

Введение

В настоящее время разрабатывается пакет программ ЛОГОС для решения широкого круга задач, в том числе механики деформируемого твердого тела на многопроцессорных вычислительных ресурсах [1]. Одной из составных частей данного пакета программ является модуль решения задач по расчету напряженно-деформированного состояния конструкций при динамических термосиловых воздействиях, основанный на методе конечных элементов.

При численном расчете конструкций встречаются ситуации, где решения имеют области больших деформаций и разрушений, сопровождающихся разлетом вещества. Численное решение такого рода задач сеточными методами в лагранжевой постановке сопряжено с некоторыми трудностями, которые касаются поддержания качества расчетной сетки. В эйлеровой же постановке трудности связаны с точным расчетом контактных границ. Альтернативным подходом к решению такого класса задач является метод сглаженных частиц SPH (сокращенно от *Smoothed Particle Hydrodynamics* – *гидродинамика сглаженных частиц*). К плюсам этого метода стоит отнести простоту реализации и возможность моделировать разлет вещества без применения специальных техник.

SPH-метод является бессеточным лагранжевым численным методом для решения широкого класса задач. Данный метод основан на моделировании сплошной среды набором частиц постоянной массы. Численное решение во всей области интегрирования получается с помощью интерполяционных функций, для которых эти частицы являются интерполяционными узлами, в соответствии с чем, каждая SPH-частица является точкой интерполяции, в которой известны параметры дефор-