

Метод связывания SPH-частиц и объемных элементов при решении тепловых задач в LS-DYNA

^{1,2}Цзиньсяо Сюй, Джейсон Ван

¹LSTC

²LSTC

Перевод В. Б. Литвинова под ред. Б. Г. Рубцова

1 Резюме

Гидродинамика гладких частиц является бессеточным Лагранжевым методом и представляет собой простой и гибкий метод построения устойчивого численного решения связанных задач взаимодействия жидкостей и твердых тел. Он широко применяется для моделирования многофазных течений, теплопереноса, задач со взрывчатыми веществами и т.д. В LS-DYNA стандартный способ решения связанных тепловых задач для любых двух частей конструкции состоит в использовании тепловых контактов, для задания которых нужна площадь контакта между этими частями конструкции. В силу свойств частиц метода SPH они могут использоваться для учета чрезвычайно больших деформаций и иметь неограниченные перемещения. В реальных инженерных приложениях частицы SPH могут отображать очень сложное поведение свободной поверхности и границы раздела материалов, включая разделение на фрагменты, при этом новые поверхности будут автоматически генерироваться в каждом цикле взаимодействия с объемными элементами. В такой ситуации обновлять контактные границы и рассчитывать истинные площади контакта между частицами SPH и объемными элементами довольно сложно. В этой статье мы представляем новый метод теплового связывания частиц SPH и объемных элементов с помощью ключевого слова *DEFINE_ADAPTIVE_SOLID_TO_SPH с параметрами $icpl=3$ и $iort=0$ без тепловых контактов, а в качестве связующей среды между исходными частицами SPH и объемными элементами используются «призрачные» (мнимые) частицы SPH внутри объемных элементов. Для демонстрации надежного связывания этим методом приводятся несколько примеров.

2 Введение

Теплоперенос является очень важным процессом во многих промышленных и геофизических задачах. Во многих задачах геофизической и промышленной гидродинамики рассматриваются сложные течения со многими текучими средами и газами в условиях теплопереноса. Движение поверхностей жидкостей может включать колебания, плескание и разделение на фрагменты. Тепловые и химические процессы могут еще больше усложнять задачу. Моделирование таких систем может иногда представлять сложности для конечно-разностных и конечно-элементных методов, особенно с учетом сложного движением свободной поверхности, в то время как средствами гидродинамики гладких частиц (SPH) можно легко отслеживать опрокидывание (разрыв) волны, а это дает реалистичное моделирование плескания (разбрызгивания) на расстояниях, где необходимо учитывать поверхностное натяжение.

Использование частиц SPH обеспечивает Лагранжевый метод решения дифференциальных уравнений с частными производными. Существенно то, что дискретизация расчетной области выполняется рядами частиц с примерно одинаковыми интервалами. Частицы движутся и меняют свои свойства (такие, как температура) в соответствии с набором обыкновенных дифференциальных уравнений, выводимых из исходных разрешающих дифференциальных уравнений в частных производных. Клири и Монахан (Cleary and Monaghan, 1995) распространили этот метод на теплоперенос и затем связали его с потоками тепла и массы, в силу чего моделирование задач теплопереноса этим методом SPH получило ряд значительных преимуществ:

1. Такой подход дает возможность легко учитывать потоки импульсного характера.
2. Можно реалистично моделировать сложное поведение свободной поверхности и границы раздела материалов.
3. Сравнительно легко можно добавить сложную физику, например, многофазность, реалистические уравнения состояния, сжимаемость, излучение, отверждение и растрескивание.

Стандартным методом решения связанных тепловых задач для двух произвольных частей модели в LS-DYNA является использование тепловых контактов, что требует введения площадей контакта между этими частями. При проведении расчетов частицы SPH, в силу своих свойств, допускают чрезвычайно большие деформации и могут двигаться без ограничений. В реальных инженерных задачах частицы SPH могут иметь очень сложное поведение свободной поверхности и границы раздела мате-

риалов, включая разделение материала на фрагменты, при этом новые поверхности будут автоматически генерироваться на каждом цикле при взаимодействии с объемными элементами. Обновлять контактные границы и рассчитывать истинные площади контакта между частицами SPH и объемными элементами довольно сложно. В этой статье мы представляем новый метод теплового связывания частиц SPH и объемных элементов на основе ключевого слова *DEFINE_ADAPTIVE_SOLID_TO_SPH с параметрами $icpl=3$ и $iopt=0$ без использования тепловых контактов.

3 Ключевое слово в LS-DYNA и Приложениях

Ключевое слово *DEFINE_ADAPTIVE_SOLID_TO_SPH используется для адаптивного преобразования Лагранжевой объемной части или набора частей в SPH-частицы, когда объемные Лагранжевы элементы, составляющие эти части, разрушаются (см. Рис. 1) или используются в качестве гибридных элементов для связывания исходных частей модели SPH и объемных частей. Одна или более частиц SPH (элементов) будет генерироваться вместо каждого разрушившегося элемента. Частицы SPH, заменяющие замещаемый элемент, будут наследовать все свойства разрушившегося элемента, например, массу, кинематические переменные и структурные свойства.

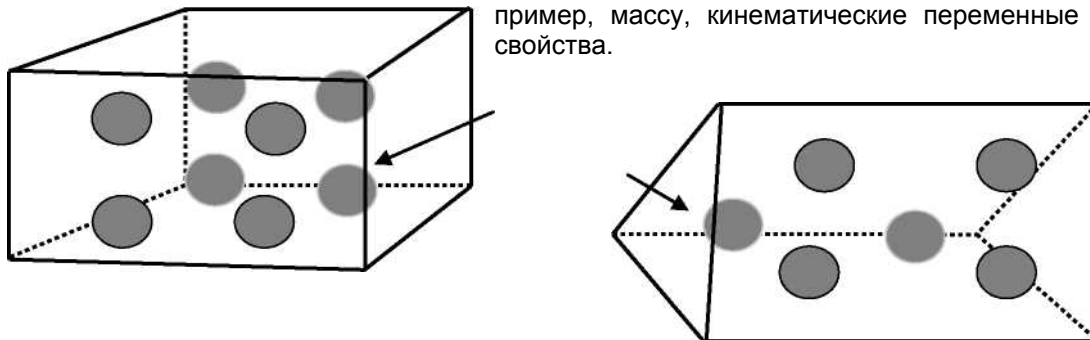


Рис.1: Превращение объемных элементов в частицы SPH

С параметром $ICPL=0$ это ключевое слово используется для моделирования осколков (фрагментов) без связывания появившихся частиц SPH с объемными элементами. Чтобы такое взаимодействие частей произошло, пользователю нужно задать контактный узел поверхности. Если заданы параметры $ICPL=1$ и $IOPT=1$, то образовавшиеся частицы SPH связываются с объемными элементами в виде одной общей части посредством связывания (Гибридные элементы).

При значениях параметров $ICPL=1$ и $IOPT=0$ это ключевое слово используется для создания Гибридных элементов, в которых происходит связывание SPH с объемными элементами. Гибридные элементы используются как переходные слои между частицами SPH и объемными элементами. Поскольку часть сетки состоит из частиц SPH и есть вероятность того, что они выдержат большую деформацию, а остальная часть модели состоит из объемных конечных элементов, то гибридные элементы помещаются между объемными и частицами, и каждый гибридный элемент состоит из двух слоев: слоя объемных элементов и слоя частиц.

Для чисто теплового связывания между частицами SPH и объемными элементами была введена новая функция с параметрами $ICPL=3$ и $IOPT=0$. В этой функции использовались гибридные элементы, поэтому у нас есть формулировка SPH и в то же самое время мы имеем сетки из объемных элементов, которые четко описывают границы раздела материалов. Объемные элементы ограничивают узловое местоположения частиц SPH. Частицы SPH здесь обеспечивают реальное тепловое связывание исходной части с элементами SPH и части с объемными элементами, которая была введена здесь с помощью 8-го параметра ввода ключевого слова *DEFINE_ADAPTIVE_SOLID_TO_SPH (как показано на Рис. 4).

4 Примеры

4.1 Задача 1

Здесь рассматривался простой трехмерный случай теплопроводности. Для обеих частей, и SPH, и объемной, начальная температура задана равной 0.0. На узлах поверхности справа от части SPH было задано условие постоянства температуры на границе (см. Рис. 2). Тепловое связывание между частями SPH и объемной было определено при помощи ключевого слова *DEFINE_ADAPTIVE_SOLID_TO_SPH с параметрами $icpl=3$ и $iopt=0$. Теплопроводность для частей SPH и объемной задана по умолчанию (как среднее значение проводимостей двух частей). На Рис. 3 показана температура, которая получилась как результат теплопередачи в этой связанной задаче для двух частей модели.

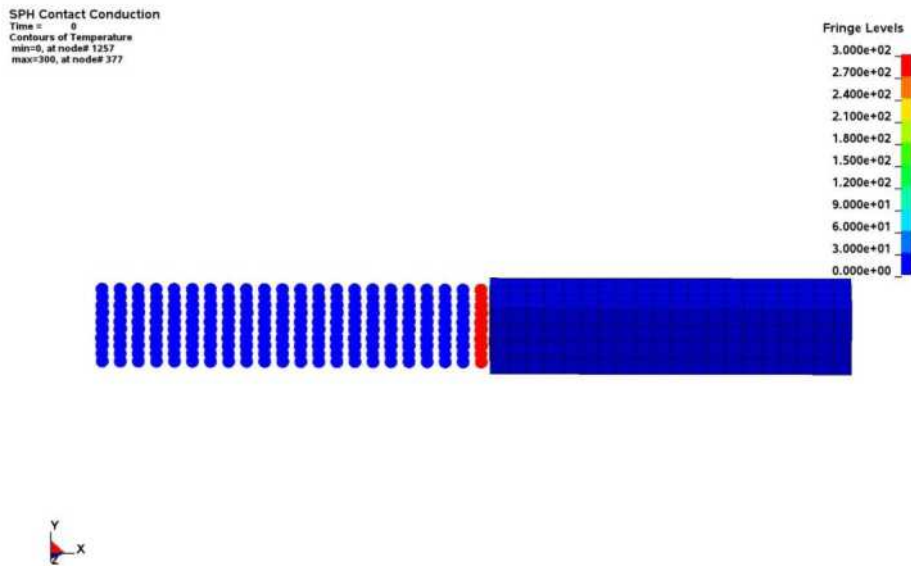


Рис. 2: Начальные условия связанной задачи для модели с двумя частями

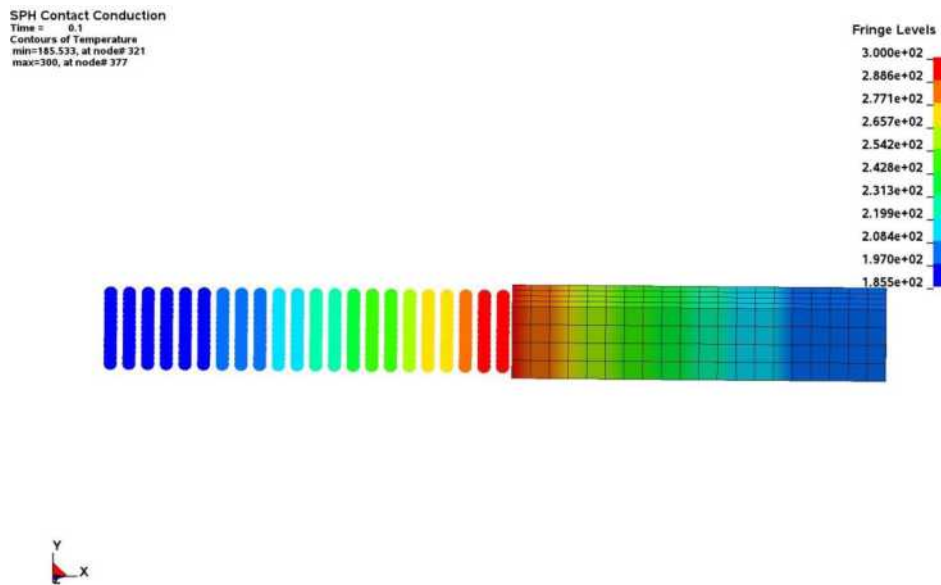


Рис. 3: Температурное поле расчетной модели

SPH Contact Conduction
Time = 0

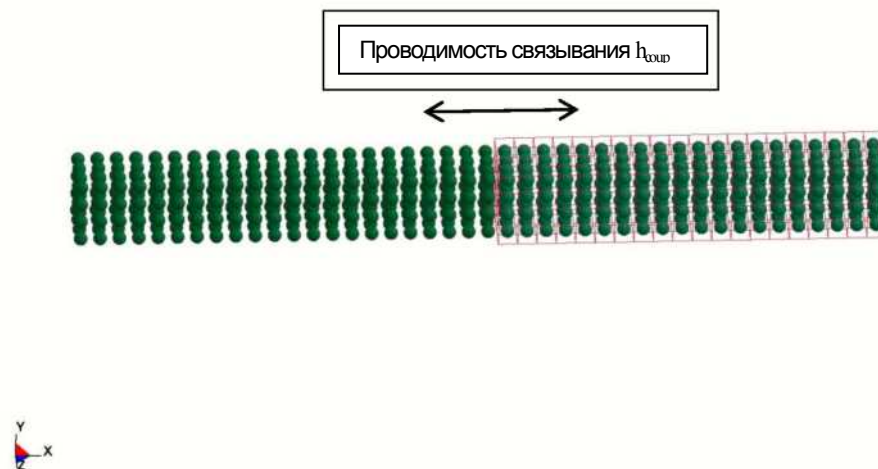


Рис.4: Задание гибридных элементов для модели с частью SPH и объемной частью

4.2 Задача 2

В этом случае рассматривалась более сложная задача с высокоскоростным ударом. Часть SPH ударяла в тонкую пластину из объемных элементов с очень высокой начальной скоростью. Во время удара, часть SPH испытала очень сложное поведение свободной поверхности и границ раздела материалов, включая разделение на фрагменты и образование новых поверхностей на каждом цикле взаимодействия с объемной пластиной. Температура тела SPH изменилась из-за преобразования механической работы в тепло при пластической деформации. Процесс соударения был таким быстрым, что заметной передачи тепла в окружающую среду не произошло. Тепловое связывание части SPH и пластины из объемных элементов задано ключевым словом *DEFINE_ADAPTIVE_SOLID_TO_SPH с параметрами ICPL=3 и IOPT=0 (Рис. 6 иллюстрирует задание гибридных элементов для этого связывания). Теплопроводность для теплового взаимодействия между частью SPH и объемной пластиной было задано по умолчанию. На Рис. 5 показано распределение температур в модели при высокоскоростном ударе.

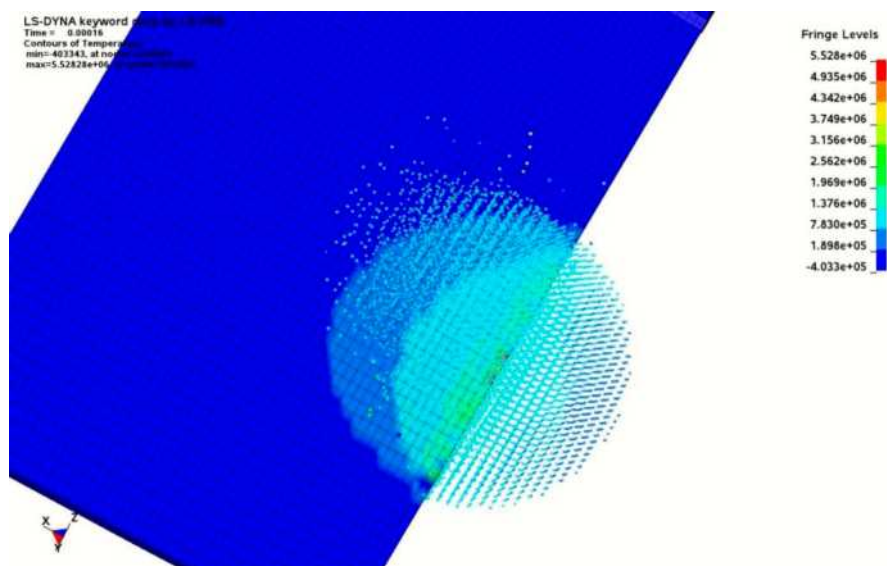


Рис.5: Распределение температур в модели при высокоскоростном ударе

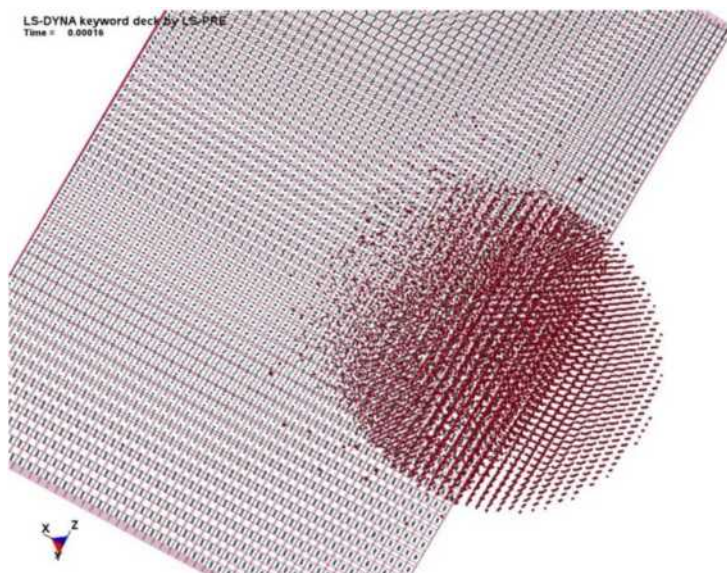


Рис. 6: Задание гибридных элементов для высокоскоростного соударения части SPH и объемной пластины (связанная задача)

5 Итоги и дальнейшая работа

В этой статье мы представляем новый метод теплового связывания областей с частицами SPH и объемными элементами при помощи ключевого слова `DEFINE_ADAPTIVE_SOLID_TO_SPH` с параметрами `icpl=3` и `iort=0` без использования тепловых контактов. Для описания более сложного поведения материала в связанных инженерных задачах требуется усложнение модели теплопроводности для дальнейших приложений этого ключевого слова.

6 Литература

- [1] Jingxiao Xu, Jason Wang, Interaction methods for the SPH parts (Multiphase Flow, Solid Bodies) in LS-DYNA, 13th International LS-DYNA Users conference, 2014.
- [2] Jingxiao Xu, Heat Transfer with Explicit SPH Method in LS-DYNA, 12th International LS-DYNA Users conference, 2012.
- [3] Jingxiao Xu, Jason Wang, Node to node contacts for SPH applied to multiple fluids with large density ratio, 9th European LS-DYNA Conference 2013.
- [4] L.B. Lucy, A numerical approach to the testing of the fission hypothesis, *Astron. J.* 82 (12) (1977) 1013.
- [5] L.D. Cloutman, SPH simulations of hypervelocity impacts, Lawrence Livermore National Laboratory, Rep. UCRL-ID-105520, 1991.
- [6] R.A. Gingold and J.J. Monaghan, Kernel estimates as a basis for general particle methods in hydrodynamics, *J. Comput. Phys.* 46 (1982) 429-453.
- [7] L.D. Libersky and A.G. Petschek, Smooth particle hydrodynamics with strength of materials, New Mexico Institute of Mining and Technology, Socorro, NM.
- [8] J.J. Monaghan, Simulating free surface flows with SPH, *J. Comp. Phys.* 110 (1994) 399-406.
- [9] Paul W. Cleary, Modelling confined multi-material heat and mass flows using SPH, *Applied Mathematical Modelling*, Volume 22, Issue 12, December 1998, Pages 981-993.
- [10] F. OTT and E. SCHNETTER, A modified SPH approach for fluids with large density differences, 2003.
- [11] X. Y. Hu and N. A. ADAMS, A multi-phase sph method for macroscopic and mesoscopic flows, *Comput. Phys.* 213, 2 (2006), 844-861.
- [12] B. Solenthaler and R. Pajarola, Density contrast SPH Interfaces, Eurographics/ACM SIGGRAPH symposium on Computer Animation, 2008.
- [13] Matthias Muller, Barbara Solenthaler, Richard Keiser and Markus Gross, Particle-Based Fluid- fluid Interaction, Eurographics/ACM SIGGRAPH symposium on Computer Animation (2005), pp. 237-244. 1, 2, 4, 6.
- [14] Markus Ihmsen, Julian Bader, Gizem Akinci and Mathias Teschner, Animation of air bubbles with SPH, International Conference on Computer Graphics Theory and Application, 2011.
- [15] P.A. Cundall and O. D. L. Strack, A discrete numerical model for granular assemblies (1979), *Geotechnique*, 29(1), 47-65.