

ПАКЕТ ПРОГРАММ ЛОГОС. ИСПОЛЬЗОВАНИЕ МЕТОДА СГЛАЖЕННЫХ ЧАСТИЦ ПРИ РЕШЕНИИ ЗАДАЧ ВЫСОКОСКОРОСТНОГО ДИНАМИЧЕСКОГО ДЕФОРМИРОВАНИЯ

Д. Ю. Дьянов, А. В. Казанцев, А. А. Челаков

Российский федеральный ядерный центр –
Всероссийский НИИ экспериментальной физики, Саров

Доклад посвящен описанию возможностей, реализованных в рамках SPH-методики пакета программ ЛОГОС в период 2015–2019 гг. В частности, приводится описание модели откола, граничного условия «SPH плоскость симметрии» и условия совместности деформации («склейка») между SPH-частицами и лагранжевой конечно-элементной сеткой, кроме того описаны алгоритмы для проведения расчетов осесимметричных течений методом SPH в двумерной постановке. Работоспособность и эффективность функциональных возможностей, представленных в рамках данного доклада, демонстрируется на решении ряда верификационных задач.

Ключевые слова: пакет программ ЛОГОС, программный модуль ЛОГОС-ПА, динамическое деформирование, метод конечных элементов, метод сглаженных частиц, контактное взаимодействие, «склейка».

Введение

В ФГУП «РФЯЦ-ВНИИЭФ» ведется разработка расчетно-математического пакета программ ЛОГОС [1], предназначенного для инженерного анализа и суперкомпьютерного моделирования в интересах высокотехнологичных отраслей промышленности. Одной из составных частей пакета программ ЛОГОС является программный модуль для моделирования НДС конструкций при динамических, статических, вибрационных нагрузках (далее – ЛОГОС-ПА) [2].

Одним из условий успешного внедрения пакета программ ЛОГОС в полный цикл разработки изделий на предприятиях является наличие широкого набора функциональных возможностей для моделирования задач динамического деформирования. Базовом способом численного решения указанного класса задач в ЛОГОС-ПА является использование лагранжевого подхода на основе метода конечных элементов для аппроксимации по пространству при явной конечно-разностной аппроксимации по времени [3–4].

При моделировании задач динамического деформирования часто встречаются ситуации, когда возникают области больших деформаций и разрушений с разлетом вещества, как, например, при высокоскоростном соударении, а также ином интенсивном нагружении тел. Одним из способов расчета подобных задач является использование бессеточного лагранжевого метода SPH [5]. Основной идеей данного метода является моделирование сплошной среды набором частиц постоянной массы (далее SPH-частицы).

SPH-подход был внедрен в ЛОГОС-ПА в 2013 году. Особенности реализации данного метода в ЛОГОС-ПА приведены в [6], где описана численная аппроксимация, алгоритмы распараллеливания на распределенной памяти, а также алгоритмы проведения расчетов связанного деформирования лагранжевых конечно-элементных сеток и подобластей SPH-частиц на основе расчета контактного взаимодействия между ними.

Данный доклад посвящен описанию развития SPH-методики пакета программ ЛОГОС в период 2015–2019 гг. Целью развития было повышение точности моделирования высокоскоростного (до 10 км/с) удара твердых тел и реализация ряда методов для сокращения вычислительных затрат. Для повышения точности реализована описанная в докладе модель откола, работоспособность которой демонстрируется на решении двух верификационных задач. Кроме того, на одной из указанных задач в докладе показана эффективность ряда реализованных методов, предназначенных для сокращения вычислительных затрат. Данные методы включают в себя: граничное условие совместности деформации между SPH-частицами и лагранжевой сеткой («склейка»), граничное условие «SPH плоскость симметрии», а также алгоритмы для проведения расчетов осесимметричных течений методом SPH в двумерной постановке.

1. Модель откола

При численном моделировании высокоскоростного (до 10 км/с) удара твердых тел важен учет эффектов, связанных с разрушением материалов. В методике SPH для моделирования разрушения реализована модель откола, согласно которой зануляется девиатор тензора напряжений и давление при достижении критерия [7]. В дальнейшем разрушенные SPH-частицы считаются в газодинамическом приближении (т. е. без учета девиатора тензора напряжений) с занулением давления в случае растяжения. Общая схема расчета давления разрушенных SPH-частиц выглядит следующим образом:

$$P = \begin{cases} P & \text{при } P > 0; \\ 0 & \text{при } P \leq 0. \end{cases} \quad (1)$$

Задача о соударении стального шарика со стальной преградой с начальной скоростью 923 м/с

В качестве первого тестового примера рассматривается задача о моделировании воздействия сферическим ударником по плоской преграде. Ударник и преграда выполнены из стали. На рис. 1 приведена начальная геометрия задачи.

Начальная скорость V ударника составляет 923 м/с и направлена по нормали к преграде. Диаметр d ударника равен 7.1 мм. Преграда представляет собой диск с диаметром $D = 150$ мм и толщиной $h = 6$ мм. Боковая поверхность диска жестко закреплена.

Моделирование проводится методом SPH в трехмерной постановке на последовательно сгущающихся разбиениях расчетной области. В табл. 1 приведены параметры дискретизации.

На рис. 2 показана начальная расстановка SPH-частиц ударника и преграды в области зоны удара (вид в плоскости XOY).

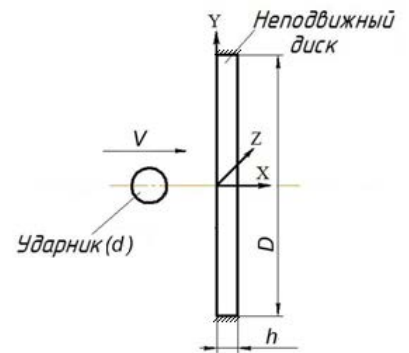


Рис. 1. Начальная геометрия

Параметры дискретизации расчетной области

Таблица 1

Шаг разбиения Δ , мм	0.8	0.6	0.4
Количество SPH-частиц ударника	3112	7208	24464
Количество SPH-частиц преграды	222144	490800	1656915

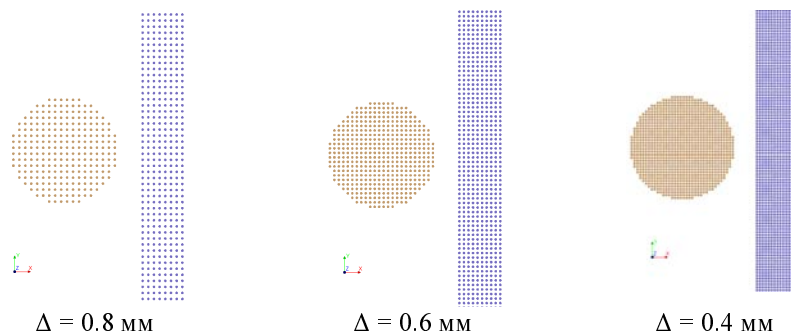


Рис. 2. Начальная расстановка частиц в зоне удара (вид в плоскости XOY)

Для описания сдвиговой прочности материала в расчете использовалась модель Джонсона-Кука. В качестве параметра, определяющего разрушение, было принято первое главное напряжение. В табл. 2 приведены физико-механические параметры модели материала.

Таблица 2

Физико-механические параметры модели материала

Параметр	Значение
начальная плотность ρ , кг/м ³	7850
модуль сдвига G , Гпа	81.8
начальный предел текучести A , МПа	350
параметр деформационного упрочнения B , МПа	275
параметр деформационного упрочнения N	0.36
параметр динамического упрочнения C	0.022
параметр термического разупрочнения M	1
температура плавления T_M , К	1811
первое главное напряжения разрушения $SIGP1$, Гпа	2.25

Для вычисления давления и температуры использовался УРС Ми-Грюнайзена. В табл. 3 приведены параметры УРС.

Таблица 3

Параметры УРС

Параметр	Значение
коэффициент Грюнайзена $\text{GAMMA}0$	2.17
начальная скорость звука $C1$, м/с	4596
констант $S1$	1.49
нормальная температура T_{ref} , К	298
удельная теплоемкость CV , Дж / (кг·К)	452

На рис. 3 приведено полученное численное решение. Для наглядности результаты приводятся для половины геометрии.

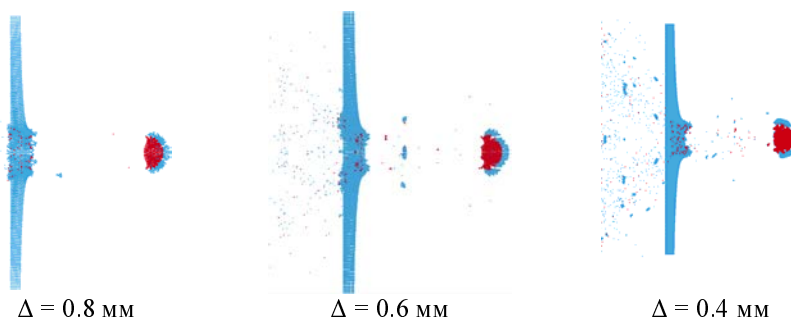


Рис. 3. Результаты расчета

На рис. 4 приведена зависимость запреградной скорости от дискретизации, полученная в расчетах по ЛОГОС.

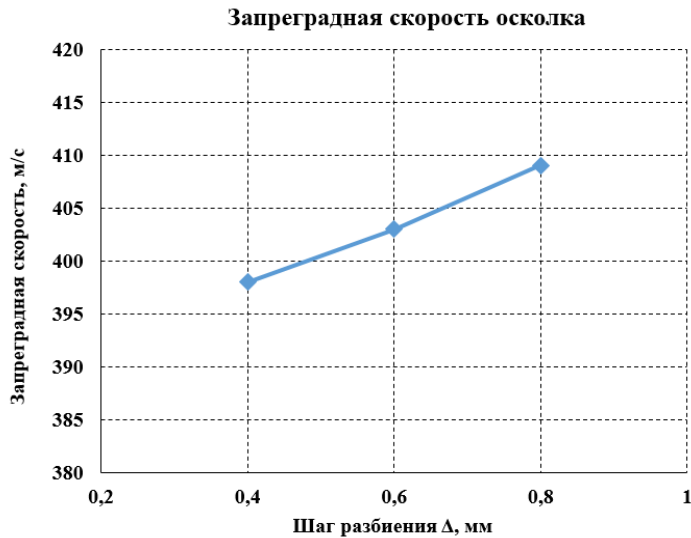


Рис. 4. Зависимость запреградной скорости от дискретизации

Приведенная зависимость имеет характер, близкий к линейному. На основе чего можно сделать вывод, что порядок сходимости численного решения близок к первому.

Задача о соударении алюминиевого шарика с алюминиевой преградой с начальной скоростью 7400 м/с

В качестве второго тестового примера рассматривается задача о моделировании воздействия алюминиевого сферического ударника по плоской алюминиевой преграде. Постановка задачи описана в [8]. Начальная скорость ударника составляет 7400 м/с по нормали к преграде. Диаметр ударника – 3.2 мм. Преграда представляет собой прямоугольный параллелепипед с габаритами 80×80 мм и толщиной 14 мм.

Расчет проводится методом SPH в трехмерной постановке. Использовалось решетчатое разбиение расчетной области с шагом 0.4 мм. Таким образом расчетная модель состоит из 1400280 SPH-частиц (из них 280 – шарик, 1400000 – преграда). На рис. 5 показана начальная расстановка SPH-частиц ударника и преграды в области зоны удара (вид в плоскости XOY).

Для описания сдвиговой прочности материала в расчете использовалась модель Джонсона-Кука. В качестве параметра, определяющего разрушение, было принято первое главное напряжение. В табл. 4 приведены физико-механические параметры модели материала.

Для вычисления давления и температуры использовался УРС Ми-Грюнайзена. В табл. 5 приведены параметры УРС.

Расчеты проводились в двух постановках: с учетом и без учета модели откола. На рис. 6 приведены результаты расчетов в сравнении с экспериментальными данными [8]. Для наглядности результаты показаны для двух слоев SPH-частиц в области плоскости симметрии.

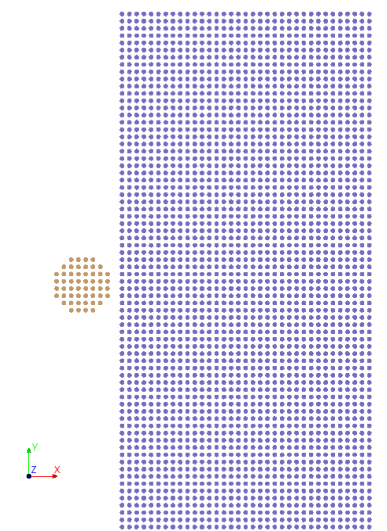


Рис. 5. Начальная расстановка SPH-частиц в зоне удара (вид в плоскости XOY)

Таблица 4

Физико-механические параметры модели материала

Параметр	Значение
начальная плотность ρ , кг/м ³	2780
модуль сдвига G , ГПа	27.6
начальный предел текучести A , МПа	330
параметр деформационного упрочнения B , МПа	426
параметр деформационного упрочнения N	0.34
параметр динамического упрочнения C	0.015
параметр термического разупрочнения M	1
температура плавления T_M , К	910
первое главное напряжения разрушения $SIGP1$, ГПа	1.1

Таблица 5

Параметры УРС

Параметр	Значение
коэффициент Грюнайзена $GAMMA0$	2
начальная скорость звука $C1$, м/с	5328
констант $S1$	1.338
нормальная температура $Tref$, К	298
удельная теплоемкость CV , Дж/(кг·К)	875

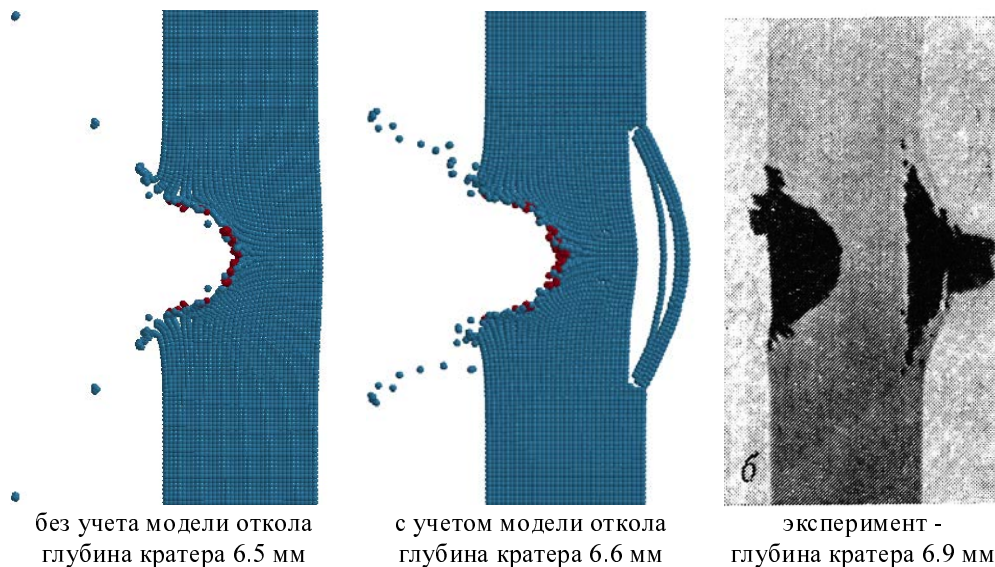


Рис. 6. Сравнение результатов расчетов с экспериментом (результаты расчетов показаны для двух слоев SPH-частиц в области плоскости симметрии)

Из приведенных результатов видно, что расчет без использования модели откола неплохо согласуется с экспериментом лишь по глубине кратера. А расчет, использующий модель откола, хорошо описывает эксперимент как с точки зрения глубины кратера, так и с точки зрения откола тыльной стороны преграды.

2. Граничное условие «склейка» SPH с лагранжевой сеткой

Для моделирования совместности деформации несогласованных по счетной сетке частей модели в лагранжевой конечно-элементной методике ЛОГОС-ПА доступно граничное условие «склейка». При подготовке расчетной модели задаются пары «склеенных» поверхностей - подчиненная и главная.

Вычислительный алгоритм накладывает связь между сеточными узлами подчиненной поверхности и гранями главной поверхности.

Граничное условие «склейка» между SPH-частицами и лагранжевой сеткой целесообразно использовать, например, когда область преграды вне зоны воздействия на нее ударника деформируется незначительно. Малодеформируемую область преграды можно моделировать в конечно-элементном приближении с менее подробной дискретизацией. Для согласованного деформирования используется условие «склейка» на границе SPH-частиц и лагранжевой сетки. Тем самым значительно сокращается количество SPH-частиц в расчете, а, следовательно, и вычислительные затраты.

Базовым методом ЛОГОС-ПА для расчета «склейки» является метод кинематических связей при подходе «узел-грань» [7]. Далее приведено общее описание расчета «склейки» в ЛОГОС-ПА.

Используя параметрическое представление, определяется положение подчиненного узла на главной грани, как показано на рис. 7. Делается это один раз – при инициализации задачи.

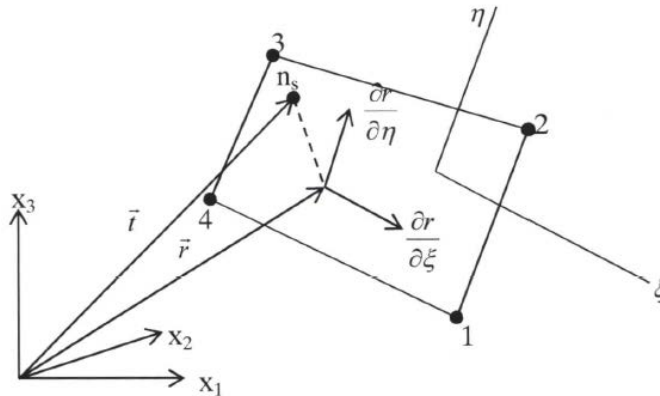


Рис. 7. Проекция подчиненного узла на главную грань

Согласно методу кинематических связей для согласованного движения пары «узел-грань» на каждом счетном шаге выполняется два этапа:

– интерполяция узловых сил f_S^i и массы M_S^i подчиненных узлов в узлы главной грани

$$\Delta f_M^i = \varphi_i(\xi_c, \eta_c) f_S^i, \quad (2)$$

$$\Delta M_M^i = \varphi_i(\xi_c, \eta_c) M_S^i; \quad (3)$$

– интерполяция насчитанных скоростей v_M^j узлов главной грани в подчиненные узлы

$$v_S^i = \sum_j \varphi_j(\xi_c, \eta_c) v_M^j, \quad (4)$$

где i, j – индексы узлов главной грани, (ξ_c, η_c) – локальные координаты узла на грани, φ_i – функции формы грани.

Для расчета согласованного деформирования лагранжевой сетки и области SPH проведена работа по адаптации процедур определения информации о связываемых парах «узел-грань», а также вычислительных процедур метода кинематической связи.

Отдельно стоит отметить распараллеливание алгоритмов «склейки» при счете на распределенной памяти. В ЛОГОС-ПА используется подход, согласно которому для каждой связанной пары «узел-грань» главная грань лежит на «своем» mpi процессе, а подчиненный узел – на любом. В случае, если подчиненный узел лежит не том же mpi процессе, что и главная грань, выполняются процедуры синхронизации необходимых величин. Для метода кинематических связей перед процедурой интерполяции «подчиненный узел -> узлы главной грани» выполняется процедура синхронизации узловых сил и массы. А перед интерполяцией «узлы главной грани -> подчиненный узел» вычисленные скорости подчиненных узлов отсылаются на те mpi процессы, на которых они лежат. В случае, когда подчиненный узел является SPH-частицей, дело усложняется тем, что она может «перелетать» с одного mpi процесса на другой. В связи с этим, в структуру данных «узел-грань» добавлен признак о том, что подчиненный узел является SPH-частицей, а также номер процесса, на

котором лежит подчиненный узел. Кроме этого, в структуру SPH-частиц добавлено два поля для хранения номера в массиве «узел-грань» и номера mpI процесса, на котором лежит главная грань. С использованием указанной информации реализованы две дополнительные процедуры, выполняющие синхронизацию необходимых величин между mpI процессами, когда подчиненный узел является SPH-частицей.

Тестовый пример на «склейку» SPH с лагранжевой сеткой

Эффективность данного метода демонстрируется на примере рассмотренной ранее задачи о соударении алюминиевого ударника с алюминиевой преградой с начальной скоростью 7400 м/с. Ударник и область преграды размером 40×40 мм моделируются SPH-частицами, остальная часть преграды – в лагранжевом конечно-элементном приближении. Пространственная дискретизация и области SPH, и сеточной области выполнялась с шагом 0.4 мм. На рис. 8 приведено изображение вида расчетной модели.

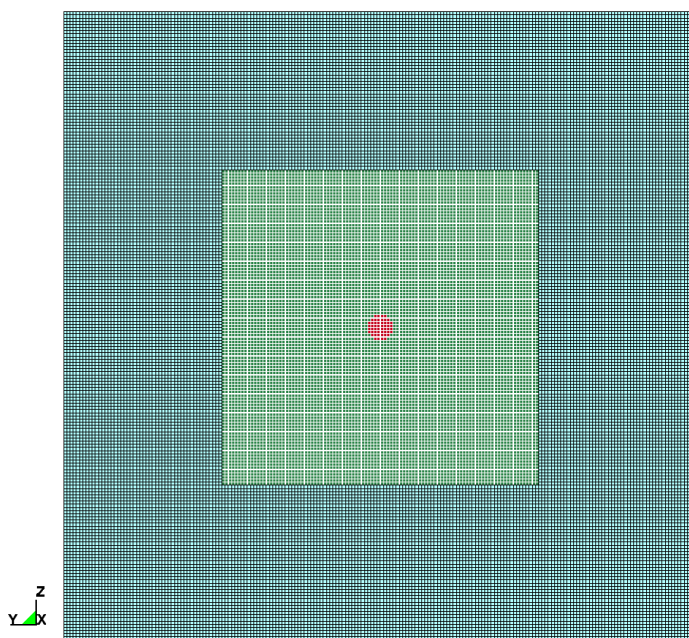


Рис. 8. Расчетная модель (вид в плоскости YOZ)

Параметры пространственной дискретизации приведены в табл. 6.

Таблица 6

Параметры дискретизации

	SPH-частицы	8-ми узловой гексаэдр
Ударник	280	–
Преграда	350000	1050000

На границе сетки и области SPH-частиц задается условие «склейка» для моделирования их согласованного деформирования.

На рис. 9 приведены полученные результаты в сравнении с аналогичным расчетом в чистой SPH постановке. Для наглядности результаты показаны для двух слоев SPH-частиц в области плоскости симметрии. Кроме того, отображено поле напряжений по Мизесу (шкала приведена в Па).

Из приведенных результатов видно, что связанная постановка практически идеально повторяет результат чистой SPH задачи. В табл. 7 приводится сравнение времен счета и эффективности распараллеливания задачи в связанной и чистой SPH постановках с использованием разного числа mpI процессов.

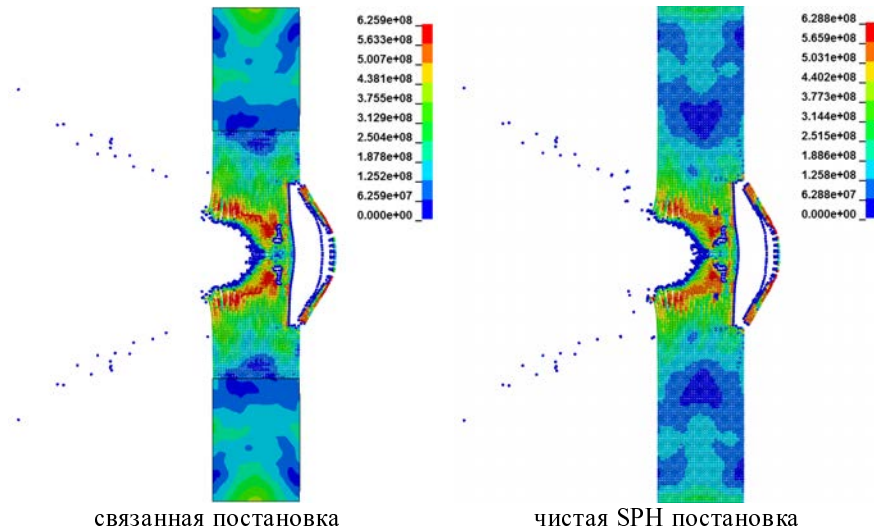


Рис. 9. Сравнение результатов расчетов связанной и чистой SPH постановок

Таблица 7

Сравнение времен счета и эффективности распараллеливания

Количество ядер (mpi)	Связанная постановка		Чистая SPH постановка	
	Время счета, с	Эффективность, %	Время счета, с	Эффективность, %
24	678	68	2165	70
48	366	63	1145	66
96	197	58	605	63

3. Граничное условие «SPH плоскость симметрии»

Зачастую при моделировании задач, имеющих симметрию относительно какой-либо плоскости, с целью сокращения вычислительных затрат используют только половину геометрии с заданием условия симметрии. В случае лагранжевой конечно-элементной методики для задания условия симметрии достаточно ограничить перемещения узлов, лежащих в плоскости симметрии. В случае же SPH-частиц этого делать недостаточно по двум причинам. Первая причина состоит в том, что SPH-частицы перемешиваются в процессе счета, и, если закрепить перемещения для SPH-частиц на плоскости симметрии, то соседние к ним вполне могут проникнуть за плоскость. Во-вторых, у SPH-частиц, находящихся рядом с плоскостью симметрии, не хватает соседей, что ведет к занижению в них давления. В связи с этим, реализовано граничное условие «SPH плоскость симметрии» [7]. Далее описана суть алгоритма, реализованного в ЛОГОС-ПА.

На каждом счетном шаге для исходных SPH-частиц, расстояние от которых до плоскости симметрии не более $2h$, строятся виртуальные. Виртуальная SPH-частица получается с помощью операции зеркального отражения исходной относительно плоскости симметрии, задаваемой по точке и вектору нормали \vec{n} , как показано на рис. 10.

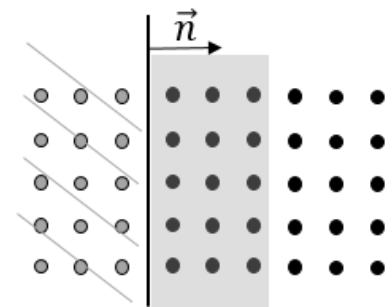


Рис. 10. Виртуальные SPH-частицы (заштрихованная область)

В процессе численной аппроксимации рассматриваются только исходные SPH-частицы, а виртуальные используются в качестве соседей.

Масса, давление и плотность виртуальных SPH-частиц равны значениям этих параметров в исходных. Координаты и скорость вычисляются зеркальным отображением значений в исходных SPH-частицах относительно плоскости симметрии:

$$r_{\bar{v}}^{\alpha} = r^{\alpha} - 2dn^{\alpha}, \quad u_{\bar{v}}^{\alpha} = u^{\alpha} - 2(u, n)n^{\alpha}, \quad (5)$$

где d – расстояние от исходной SPH-частицы до плоскости симметрии.

Тензор напряжений σ_v виртуальной SPH-частицы получается путем преобразования $\sigma_v = M^T \sigma M$, где σ – тензор напряжений исходной, M – матрица зеркального отражения в декартовой системе координат относительно плоскости с вектором единичной нормали $\vec{n}(A, B, C)$:

$$M = \begin{pmatrix} -A^2 + B^2 + C^2 & -2AB & -2AC \\ -2AB & A^2 - B^2 + C^2 & -2BC \\ -2AC & -2BC & A^2 + B^2 - C^2 \end{pmatrix}. \quad (6)$$

Тестовый пример на использование «SPH плоскости симметрии»

Эффективность данного метода демонстрируется также на примере рассмотренной ранее задачи о соударении алюминиевого ударника с алюминиевой преградой с начальной скоростью 7400 м/с, но моделирование выполняется с использованием половины геометрии. На рис. 11 изображена расчетная модель.

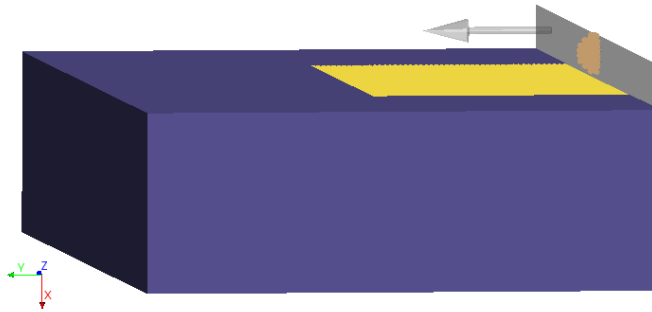


Рис. 11. Расчетная модель

Для моделирования симметрии задается граничное условие «SPH плоскость симметрии», изображенное на рис. 11. Для сеточной модели симметрия задается ограничением перемещений вдоль оси Oy для узлов сетки, находящихся в плоскости симметрии. Как и в предыдущем примере, на границе сетки и области SPH-частиц задается условие «склейка» для моделирования их согласованного деформирования.

На рис. 12 приведены результаты расчета на один из моментов времени для двух видов с отображением поля напряжений по Мизесу.

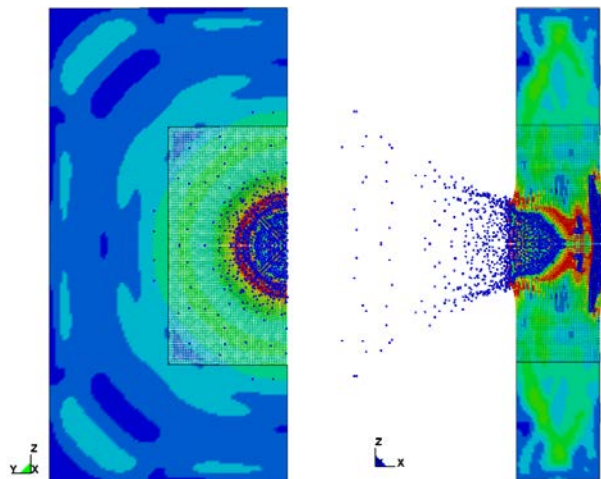


Рис. 12. Результаты расчета

Видно, что полученный результат симметричен относительно заданной плоскости симметрии, при этом он повторяет результат расчета полной модели. С точки зрения вычислительных затрат, на проведение расчетов необходимо примерно в 1.9 раз меньше времени по сравнению с аналогичными расчетами полной модели.

4. Алгоритм для расчета осесимметричных течений

Одним из востребованных способов проведения расчетов течений, имеющих осевую симметрию, является двумерное приближение. Существует несколько подходов к решению данной задачи методом SPH [9–10]. Для реализации в ЛОГОС-ПА взят за основу алгоритм, выполняющий переход от двумерной к решению трехмерной задачи, путем поворота исходных SPH-частиц относительно оси симметрии. Далее приведено более подробное описание реализованного алгоритма.

На каждом счетном шаге для исходных SPH-частиц строятся «дублиры», которые получаются с помощью операции поворота вокруг оси симметрии. Их количество n выбирается, исходя из того, что расстояние между ними не должно превышать h , и определяется выражением

$$n = \frac{\pi}{\arcsin\left(\frac{h}{2r}\right)}. \quad (7)$$

где r – расстояние от исходной частицы до оси симметрии.

В процессе численной аппроксимации рассматриваются только исходные SPH-частицы, а «дублиры» используются в качестве соседей. Для исходных SPH-частиц, расстояние от которых до оси не более $2h$, «дублиры» используются со всей окружности, а для всех остальных – только две (по одной справа и слева от исходной). На рис. 13 приведена общая схема построения «дублеров».

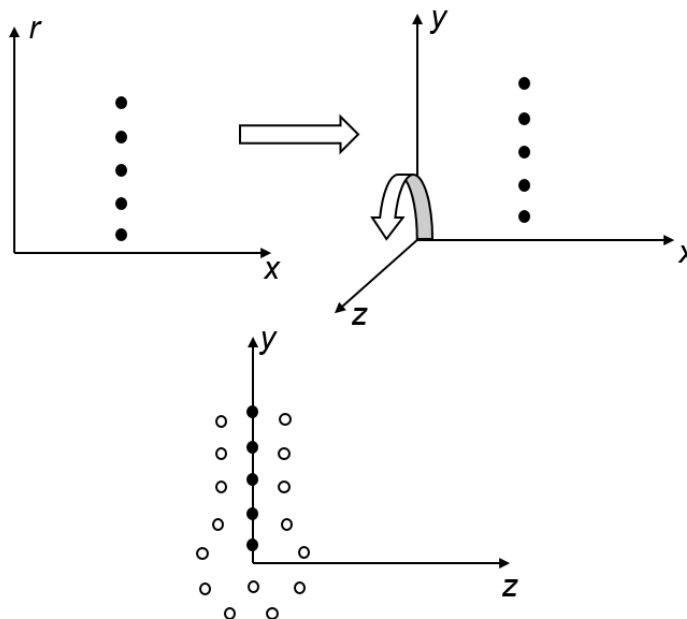


Рис. 13. Общая схема построения «дублеров» (закрашенные точки – исходные SPH-частицы, незакрашенные – «дублиры»)

Массы SPH-частиц определяются на каждом счетном шаге. Вычисление происходит исходя из сохранения массы тора, полученного вращением окружности относительно оси симметрии (радиус окружности равен $h/2$, а центр расположен в первоначальном положении исходной SPH частицы).

Масса, давление и плотность «дублеров» равны значениям этих параметров в исходных SPH-частицах. Координаты и скорость вычисляются поворотом значений исходных SPH-частиц на угол φ против часовой стрелки вокруг оси симметрии:

$$\begin{aligned} x_\varphi &= x, y_\varphi = r \cos(\varphi), z_\varphi = r \sin(\varphi) \\ u_\varphi^x &= u^x, u_\varphi^y = u^y \cos(\varphi), u_\varphi^z = -u^y \sin(\varphi) \end{aligned} \quad (8)$$

Тензор напряжений σ_φ «дублеров» получается путем преобразования $\sigma_\varphi = A^T \sigma A$, где σ – тензор напряжений исходной SPH-частицы, A – матрица поворота в декартовой системе координат вокруг оси Ox (т.е. вокруг оси симметрии) на угол φ против часовой стрелки:

$$A = \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & \cos(\varphi) & -\sin(\varphi) \\ 0 & \sin(\varphi) & \cos(\varphi) \end{pmatrix}. \quad (9)$$

Тестовый пример на алгоритм расчета осесимметричных течений

Работоспособность данного метода демонстрируется также на примере рассмотренной ранее задачи о соударении алюминиевого ударника с алюминиевой преградой с начальной скоростью 7400 м/с, но моделирование выполняется в двумерной осесимметричной постановке. Дискретизация расчетной области выполнялась, как и в трехмерных расчетах, с шагом 0.4 мм. Таким образом расчетная модель состояла из 3526 SPH-частиц (из них 26 – шарик, 3500 - преграда). Начальная расстановка SPH-частиц приведена на рис. 14.

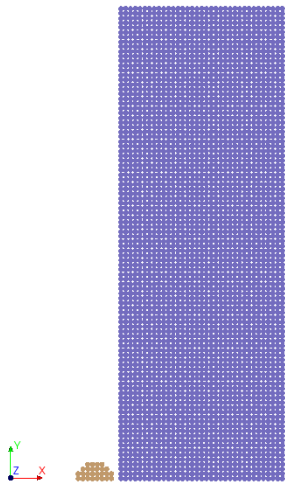


Рис. 14. Начальная расстановка SPH-частиц

На рис. 15 приведены результаты двумерного расчета в сравнении с аналогичным трехмерным. Для наглядности результаты двумерных расчетов отражены зеркально относительно плоскости XOZ , а трехмерные показаны для двух слоев SPH-частиц в области плоскости симметрии.

Из приведенных результатов видно, что в двумерном расчете, как и в аналогичном трехмерном, получено отсутствие пробития и откол тыльной стороны преграды. Но стоит отметить, что двумерный расчет дает чуть более завышенные параметры разрушения преграды. С точки зрения вычислительных затрат, двумерный расчет выполнен менее чем за полминуты в скалярном режиме на персональном компьютере. В табл. 7 приведены вычислительные затраты для аналогичных трехмерных задач, где самый быстрый расчет чистой SPH постановки выполнен за 10 минут с использованием 96 mp процессов вычислительного кластера.

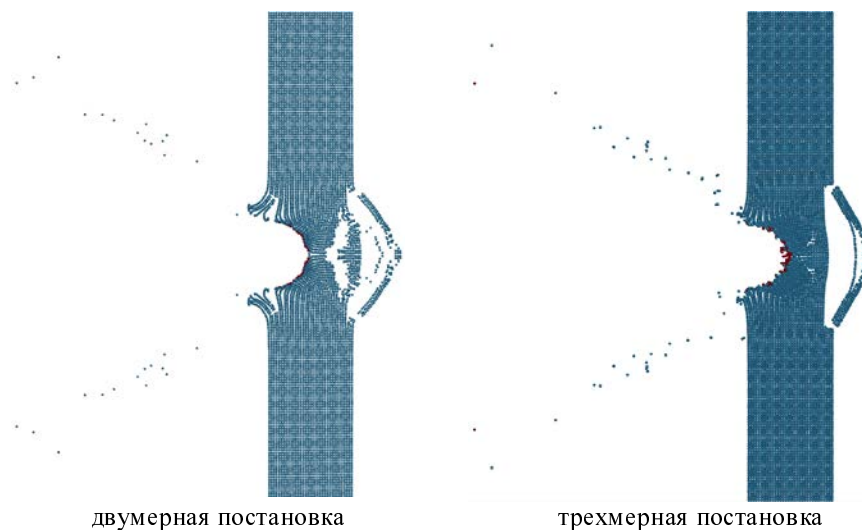


Рис. 15. Сравнение результатов расчета задачи в двумерной и трехмерной постановках

Заключение

Методы и алгоритмы, описанные в рамках данной работы, предназначены для повышения точности моделирования, а также сокращения вычислительных затрат при моделировании задач динамического деформирования в программном модуле ЛОГОС-ПА с использованием метода SPH.

В работе приведено описание реализованной модели откола, а также граничных условий «склейка» и «SPH плоскость симметрии». Описаны реализованные алгоритмы для проведения расчетов осесимметричных течений методом SPH в двумерной постановке. Приведенные результаты расчета ряда верификационных задач подтверждают работоспособность и эффективность реализованных возможностей.

Литература

1. Дерюгин Ю. Н., Козелков А. С., Спиридонов В. Ф., Циберев К. В., Шагалиев Р. М. Многофункциональный высокопараллельный пакет программ ЛОГОС для решения задач тепломассопереноса и прочности // С.-Петербургский науч. форум «Наука и общество»: Сб. тез. докл., С.-Пб, 2012. С. 102.
2. Авдеев П. А., Александрова О. Л., Артемова Е. О. и др. Обзор возможностей моделирования задач прочности с использованием пакета программ ЛОГОС // Супервычисления и математическое моделирование: Труды XV международного семинара, Саров, 13–17 октября, 2014. С. 9–17.
3. Дьянов Д. Ю., Казанцев А. В., Циберев К. В. и др. Пакет программ ЛОГОС. Функциональные возможности для решения динамических задач прочности // Супервычисления и математическое моделирование: Труды XVII международного семинара, – Саров, 15–19 октября, 2018. С. 210–219.
4. Дьянов Д. Ю., Спиридонов В. Ф., Циберев К. В. и др. Пакет программ ЛОГОС. Модуль решения динамических задач прочности // Вопросы атомной науки и техники. Сер. Математическое моделирование физических процессов. 2018. Вып. 2. С. 3–13.
5. Gingold R. A., Monaghan J. J. Smoothed Particle Hydrodynamics: Theory and application to non-spherical stars // Month. Not. Royal Astr. Soc. 1977. P. 375–389.
6. Дьянов Д. Ю., Казанцев А. В., Морозов С. В. и др. Пакет программ ЛОГОС. Функциональные возможности для решения связанных задач прочности и гидродинамики сглаженных частиц // Супервычисления и математическое моделирование: Труды XV международного семинара, Саров, 13–17 октября, 2014. С. 212–220.
7. Hallquist John O. LS-DYNA Theory Manual. - Livermore Software Technology Corporation, 2015. <http://www.lstc.com/download/manuals>.
8. Геринг Дж. Высокоскоростной удар с инженерной точки зрения. Высокоскоростные ударные явления. – М.: МИР, 1973.
9. Башуров В. В., Иоилев А. Г. Алгоритм метода сглаженных частиц для моделирования осесимметричных упругопластических течений // Всероссийская конференция «Теоретические основы и конструирование численных алгоритмов решения задач математической физики»: Сб. докл., Новосибирск, сентябрь, 2003.
10. Зубов А. Д., Лебедев А. М. Метод сглаженных частиц SPH для расчетов газодинамических задач со сферической и цилиндрической симметриями // Вопросы атомной науки и техники. Сер. Математическое моделирование физических процессов. 2009. Вып. 1. С. 19–28.

**“LOGOS” SOFTWARE PACKAGE.
APPLICATION OF THE SMOOTHED-PARTICLE HYDRODYNAMICS METHOD
FOR HIGH-STRAIN-RATE DYNAMIC DEFORMATION SIMULATIONS**

D. Yu. Dyanov, A. V. Kazantsev, A. A. Chelakov

Russian Federal Nuclear Center –
All-Russian Scientific Research Institute of Experimental Physics, Sarov

The paper presents the capabilities implemented based on the SPH method in the LOGOS software package in 2015-2019. In particular, it describes the spall model, the “SPH plane of symmetry” boundary condition and the strain compatibility (merging) conditions for SPH particles and Lagrange finite-element meshes, and specifies algorithms for two-dimensional axisymmetric flow calculations by the SPH method. A number of verification cases are given to demonstrate the performance and efficiency of the functional capabilities presented in the paper.

Key words: LOGOS software package, LOGOS-SA software module, dynamic deformation, finite-element method, smoothed-particle hydrodynamics, contact interaction, merging