

ПРИМЕНЕНИЕ ПАКЕТА ПРОГРАММ ЛОГОС-ПРОЧНОСТЬ ДЛЯ МОДЕЛИРОВАНИЯ ПРОЦЕССА ФОРМИРОВАНИЯ КУМУЛЯТИВНЫХ СТРУЙ

Тихонова Ирина Александровна (IATikhonova@vniief.ru), Власова Марина Александровна, Володина Наталия Александровна, Кирюхина Маргарита Николаевна, Краюхин Сергей Андреевич, Сvirский Олег Владиславович, Трунова Злата Дмитриевна

ФГУП «РФЯЦ-ВНИИЭФ», г. Саров Нижегородской обл.

В настоящее время в ИТМФ РФЯЦ-ВНИИЭФ разрабатывается многофункциональный пользовательский пакет программ инженерного анализа и суперкомпьютерного моделирования ЛОГОС. С целью развития его функциональных возможностей был реализован эйлеров этап с расчетом контактных границ методом концентраций, а также некоторые модели кинетики детонации и разрушения. Областью практического применения новых возможностей является решение задач, реализующих высокоскоростные течения сплошной среды с большими деформациями при ударно-волновом нагружении. Работоспособность реализованных алгоритмов показана на примере задач по моделированию процесса формирования кумулятивной струи.

Проведено численное моделирование процесса формирования и эволюции кумулятивной струи для снарядов нескольких калибров, различных геометрических форм и веществ облицовки. Верификация полученных результатов проводилась на экспериментальных данных ИФВ, полученных с использованием методов импульсного рентгенографирования и синхробаллистической съемки. Проведена расчетно-экспериментальная оценка процесса формирования кумулятивной струи.

Ключевые слова: Library of Equation of States (LEOS), взрывчатое вещество (ВВ), конечно-элементный (КЭ), продукт взрыва (ПВ), пакет программ (ПП), уравнение состояния (УРС), кумулятивная струя.

SIMULATIONS OF SHAPED-CHARGE JET FORMATION PROCESS BY THE LOGOS SOFTWARE PACKAGE

Tikhonova Irina Aleksandrovna (IATikhonova@vniief.ru), Vlasova Marina Aleksandrovna, Volodina Nataliya Aleksandrovna, Kiryukhina Margarita Nikolaevna, Krayukhin Sergey Andreevich, Svirskiy Oleg Vladislavovich, Trunova Zlata Dmitrievna

FSUE «RFNC-VNIIEF», Sarov Nizhny Novgorod region

At present, ITMF / RFNC-VNIIEF is developing a cross-functional user software package for engineering analysis and supercomputer simulations called LOGOS. To improve its functionality, we have implemented an Eulerian step with interface calculations by the method of concentrations and some detonation kinetics and damage models. The range of practical application for the new capabilities includes problems involving high-velocity continuum flows with severe deformations under shock loading. Performance of the implemented algorithms is demonstrated by simulations of the shaped-charge jet formation process.

Numerical simulations of shaped-charge jet formation and evolution were performed for several projectile sizes, geometries and lining materials. The calculated results were verified against experimental data obtained by the Institute of Detonation Physics using pulsed radiography and synchroballistic photography. Computational and experimental assessment of the shaped-charge jet formation process was performed.

Key words: LEOS, HE, FE, detonation products, software LE package, equation of state, shaped-charge jet.

Введение

В настоящее время в ИТМФ РФЯЦ-ВНИИЭФ разрабатывается многофункциональный пользовательский пакет программ инженерного анализа и суперкомпьютерного моделирования ЛОГОС (ПП ЛОГОС) [1, 2].

В рамках работ по расширению функциональных возможностей пакета программ ЛОГОС-ПРОЧНОСТЬ (ПП ЛОГОС-ПРОЧНОСТЬ) реализован эйлеров этап (предназначенный для решения задач газодинамики на неподвижных конечно-элементных сетках) с расчетом контактных границ методом концентраций, а также некоторые модели кинетики детонации и разрушения.

Областью практического применения новых возможностей является решение задач, реализующих высокоскоростные течения сплошной среды с большими деформациями при ударно-волновом нагружении.

Приведены экспериментальные данные ИФВ, полученные с использованием методов импульсного рентгенографирования и синхробаллистической съемки. Представлены результаты численного моделирования процесса формирования и эволюции кумулятивной струи для снарядов нескольких калибров, различных геометрических форм и веществ облицовки.

Технология проведения расчетов на неподвижной эйлеровой сетке

Расчет течения сплошной среды осуществляется в два этапа: на первом (лагранжевом) этапе на каждом временном шаге сетка увлекается веществом; рассчитываются изменения величин за счет действующих сил (давления, дивергенции тензора напряжений, внешних сил и т. д.); на втором (эйлеровом) этапе происходит перестроение счетной сетки по некоторым законам (в случае эйлерова расчета после лагранжева этапа счетная сетка возвращается в исходное состояние), и рассчитываются конвективные потоки величин с одной сетки на другую.

Для расчета задач, реализующих высокоско-

ростные течения сплошной среды с большими деформациями при ударно-волновом нагружении, дополнительно к возможностям ПП ЛОГОС-ПРОЧНОСТЬ были реализованы модели расчета детонации ВВ, алгоритм расчета концентраций, схемы пересчета величин на неподвижную сетку (эйлеров этап), алгоритмы учета разрушенного вещества по модели хрупкого откола, подключена библиотека уравнений состояний LEOS [3].

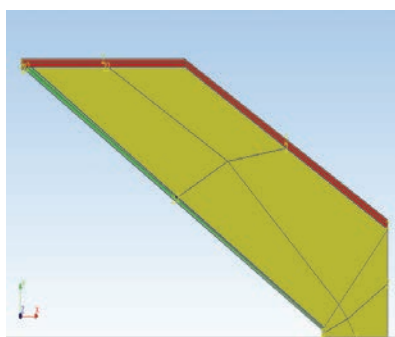
В настоящее время в ПП ЛОГОС-ПРОЧНОСТЬ создана верификационная база тестирования созданных алгоритмов, и разработано руководство пользователя.

Технология проведения расчетов, моделирующих высокоскоростные течения сплошной среды, включает с себя следующие этапы:

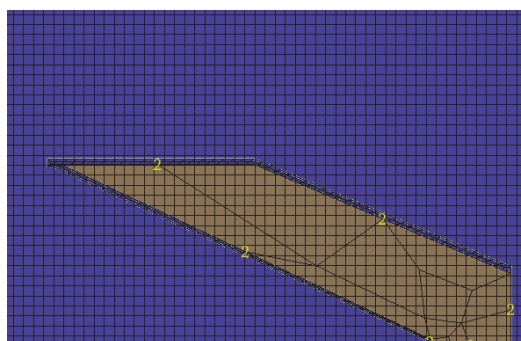
- подготовка геометрии задачи;
- построение конечно-элементной сетки;
- задание физических свойств материалов, параметров счетных программ и других параметров.

Подготовка задач на неподвижных КЭ сетках проводится в графической оболочке ЛОГОС-ПРЕПОСТ [4] и не отличается от стандартных задач прочности, за исключением этапа построения счетной сетки. Расчетная КЭ сетка для задач с большими деформациями состоит из базовой эйлеровой сетки, на которой производится весь расчет, и конечно-элементной сетки, необходимой для описания всех веществ. Конечно-элементная сетка представляет собой совокупность областей, которые описывают все созданные контура для веществ задачи (рис. 1,а). Она не должна быть очень подробной, главное требование при построении данной сетки заключается в том, чтобы она описывала с необходимой точностью все границы контура вещества. Численное моделирование проводится на базовой эйлеровой сетке (рис. 1,б). Именно степенью подробности этой сетки определяется точность расчета.

При запуске задачи на счет сначала осуществляется пересчет геометрии с конечно-элементной сетки на базовую эйлерову конечно-элементную сетку, рассчитываются концентрации веществ.



а



б

Рис. 1. Примеры сеток: а – КЭ-сетка, б – базовая сетка



Рис. 2. Снаряд калибра 147 мм, форма облицовки – рупор

Примеры задач механики сплошной среды с большими деформациями при ударно-волновом нагружении

В РФЯЦ-ВНИИЭФ проведен ряд экспериментальных исследований формирования и эволюции кумулятивных струй в модельных опытах с использованием методов импульсного рентгенографирования и синхробаллистической съемки.

По рентгеновскому изображению струи можно дать качественную оценку ее состояния. Обработка двух рентгеновских изображений струи, в зависимости от постановки опыта, позволяет получить количественные параметры: распределение скорости, радиуса и времени разрыва вдоль струи, длину струи, размеры отдельных элементов, отклонение струи от оси в плоскости, параллельной плоскости рентгеновской кассеты с пленками (рис. 2). Все расстояния измеряются от основания облицовки.

Для проверки работоспособности реализованных алгоритмов в ПП ЛОГОС-ПРОЧНОСТЬ проведено численное моделирование процесса формирования и эволюции кумулятивной струи для снарядов нескольких калибров, различных геометрических форм и веществ облицовки.

Задача 1. Снаряд калибром 44 мм с геометрической формой облицовки конус

На рис. 3 представлена начальная геометрия кумулятивного снаряда (КС) калибром 44 мм, построенная в препроцессоре ЛОГОС-ПРЕПОСТ.

КС состоит из молибденовой облицовки, кольцевого детонационного распределителя из ВВ ТЭН с $\rho=1,525\text{ г/см}^3$ ($D = 7,82$ кс/с, $Q = 5,7$ кДж/г) и снаряжен ВВ на основе октогена с $\rho=1,85\text{ г/см}^3$ ($D = 8,86$ кс/с, $Q = 6,39$ кДж/г). Для расчета ВВ использовались уравнение идеального газа с $\gamma=3$.

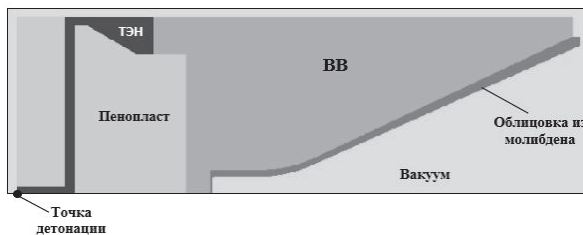
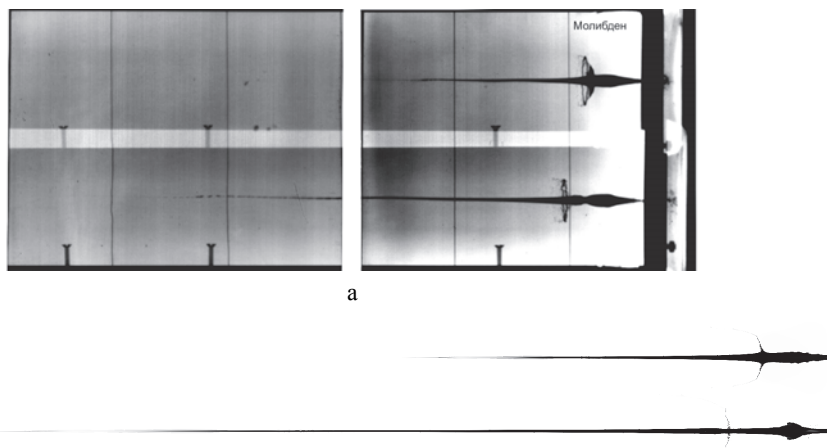


Рис. 3. Геометрия задачи

Инициирование детонации осуществлялось в начальный момент в точке детонации, обозначенной черным на рис. 3. Для моделирования распространения детонации использовался пошаговый алгоритм контроля скорости детонации [5].

Расчеты двумерной осесимметричной задачи проводились на эйлеровой сетке со стороной ячейки 0,01 см. Общее число точек в задаче составило примерно 5,5 млн.

На рис. 4 приведено сравнение экспериментальных рентгенограмм с результатами расчетов на время 25,1 и 39,9 мкс.



а

б

Рис. 4. Формирование кумулятивной струи: а – данные эксперимента, б – расчетные данные

По рентгенограммам эксперимента на время 39,9 мкс определен диаметр струи в зависимости от продольного расстояния вдоль оси симметрии ОХ. Расстояния измеряются от основания облицовки. Сравнение экспериментальных и расчетных диаметров струи приведено на рис. 5.

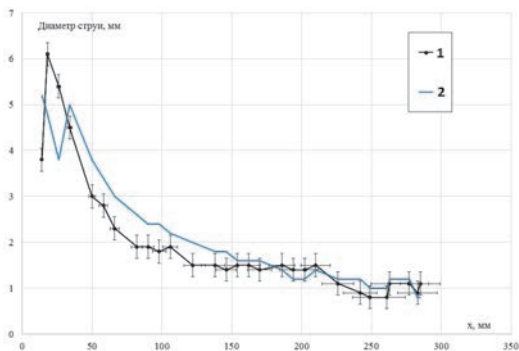


Рис. 5. Экспериментальный и расчетный диаметры струи на момент времени: 1 – эксперимент, 2 – расчет

В эксперименте для КС калибром 44 мм зафиксирована скорость струи 10,1 км/с, в расчете – 9,9 км/с. Таким образом, отклонение данных, полученных при расчетах в ПП ЛОГОС-ПРОЧНОСТЬ, от экспериментальных данных не превышает 2 % по скорости струи и 3,5 % по величине диаметра струи.

Задача 2. Снаряд калибром 147 мм с геометрической формой облицовки рупор

На рис. 6 представлена начальная геометрия кумулятивного снаряда (КС) калибром 147 мм, постро-

енная в препостпроцессоре ЛОГОС-ПРЕПОСТ.

КС состоит из медной облицовки, кольцевого детонационного распределителя из ВВ ТЭН с $\rho=1,525\text{ г/см}^3$ ($D = 7,82\text{ кс/с}$, $Q = 5,7\text{ кДж/г}$) и снаряжен ВВ на основе октогена с $\rho=1,85\text{ г/см}^3$ ($D = 8,86\text{ кс/с}$, $Q = 6,39\text{ кДж/г}$). Для расчета ВВ использовались уравнение идеального газа с $\gamma=3$.

Инициирование детонации осуществлялось в начальный момент в точке детонации, обозначенной черным на рис. 6. Для моделирования распространения детонации использовался пошаговый алгоритм контроля скорости детонации [5].

Расчеты двумерной осесимметричной задачи проводились на эйлеровой сетке со стороной ячейки 0,01 см. Общее число точек в задаче составило примерно 5,5 млн.

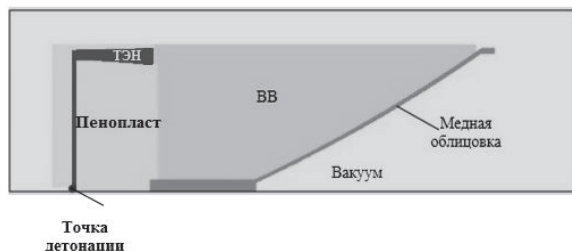
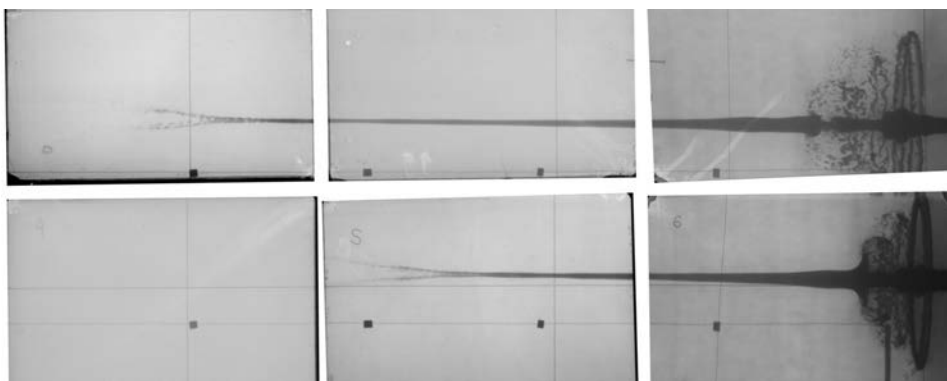
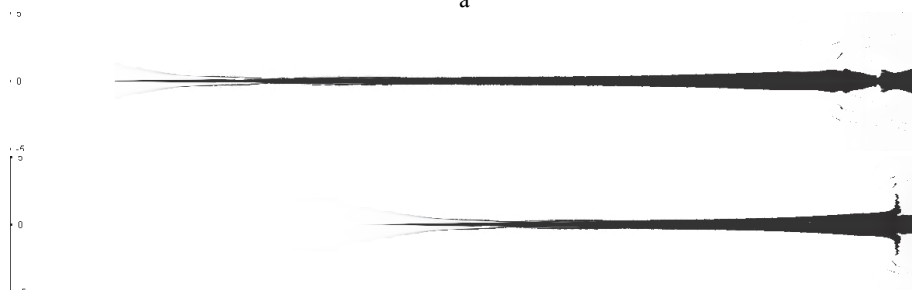


Рис. 6. Геометрия задачи

На рис. 7 приведено сравнение экспериментальных рентгенограмм с результатами расчетов на время 75 и 92,6 мкс.



а



б

Рис. 7 Формирование кумулятивной струи: а – данные эксперимента, б – расчетные данные

По рентгенограммам эксперимента на время 90,2 мкс определен диаметр струи в зависимости от продольного расстояния вдоль оси симметрии ОХ. Расстояния измеряются от основания облицовки. Сравнение экспериментальных и расчетных диаметров струи приведено на рис. 8.

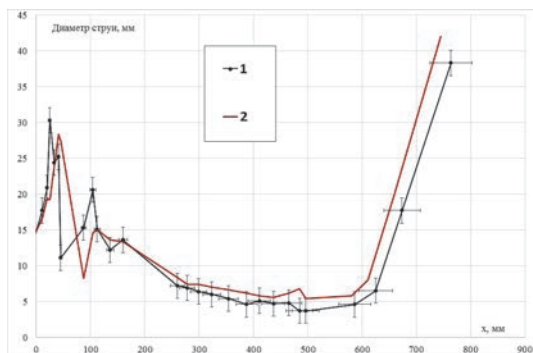


Рис. 8. Экспериментальный и расчетный диаметры струи на момент времени 1 – эксперимент, 2 – расчет

В эксперименте для КС калибром 147 мм зафиксирована скорость струи 10,2 км/с, в расчете – 10,23 км/с. Таким образом, отклонение данных, полученных при расчетах в ПП ЛОГОС-ПРОЧНОСТЬ, от экспериментальных данных не превышает 0,3 % по скорости струи и 3,5 % по величине диаметра струи.

Заключение

В пакете программ ЛОГОС-ПРОЧНОСТЬ реализован эйлеров этап, предназначенный для решения задач газодинамики на неподвижных конечно-элементных сетках. Проведена верификация реализованных алгоритмов на задачах, моделирующих процесс формирования и эволюции кумулятивной струи для снарядов нескольких калибров, различных геометрических форм и веществ облицовки.

Проведена расчетно-экспериментальная оценка процесса формирования кумулятивной струи. Сравнение результатов, полученных при расчетах в ПП ЛОГОС-ПРОЧНОСТЬ, с экспериментальными дан-

ными ИФВ показало, что отличие по основным характеристикам струи не превышает 3,5 %.

Таким образом, можно сделать вывод о возможности применимости ПП ЛОГОС-ПРОЧНОСТЬ к решению задач, реализующих высокоскоростные течения сплошной среды с большими деформациями при ударно-волновом нагружении.

Список литературы

1. Циберев К. В., Авдеев П. А., Александрова О. Л., Артемова Е. О. и др. Обзор возможностей моделирования задач прочности с использованием пакета программ ЛОГОС // Труды XV международного семинара «Супервычисления и математическое моделирование» – Саров, 2014.
2. Александрова О. Л., Барабанов Р. А., Дьянов Д. Ю., Косарим С. С., Наумов А. О., Спиридонов В. Ф., Филимонкин Е. А., Циберев К. В. Пакет программ ЛОГОС. Конечно-элементная методика расчета задач статической прочности конструкций с учетом эффектов физической и геометрической нелинейности // Вопросы атомной науки и техники. Серия: Математическое моделирование физических процессов. 2014. Т. 3. С. 3–17.
3. Библиотека программ «LEOS» для расчета теплофизических свойств веществ [Электронный ресурс] / Свидетельство о государственной регистрации № 2010614411. Электронный бюллетень – 2010.
4. Анищенко А. А., Дерюгин В. И., Дюпин В. Н. и др. Препостпроцессор ЛОГОС-ПРЕПОСТ. Архитектура уровня бизнес-логики. Хранение, импорт и экспорт данных // Вопросы атомной науки и техники. Сер. Математическое моделирование физических процессов. 2014. Вып. 2. С. 78–82.
5. Володина Н. А., Краюхин С. А. Алгоритм итерационной коррекции времен детонации за счет учета направления движения детонационной волны в методике ЛЭГАК // Вопросы атомной науки и техники. Сер. Математическое моделирование физических процессов. 2019. Выпуск 3.