

Рис. 2. Взаимодействие в воздухе двух когерентных скрещенных импульсов (распространяются слева направо) в режиме филаментации. В области их перекрытия возникает интерференционная картина (серповидные структуры), которая в случае синфазных импульсов приводит к возникновению центрального протяженного филамента и нескольких побочных максимумов

учитывать случайные флуктуации показателя преломления и наличие водного аэрозоля, которые обуславливают стохастическую картину образования нитей (рис.1).

Применение многопроцессорной вычислительной техники для решения многомерных задач внутренней баллистики



16 Применение многопроцессорной вычислительной техники для решения многомерных задач внутренней баллистики

Для многомерного численного исследования внутрибаллистических процессов в устройствах различного назначения разработан программный комплекс для многопроцессорных ЭВМ. Исследования проводятся на основе математической модели движения многофазной, многокомпонентной, двухскоростной газопороховой среды с учетом прогрева и горения пороховых элементов и силового межфазного взаимодействия. Для описания движения метаемого тела используется оригинальный метод внутренней границы. В качестве примера представлены результаты двумерного численного исследования внутрибаллистического процесса в ствольной установке крупного калибра.

АВТОРЫ:

И.В. Семенов – канд. физ.-мат. наук, ст. науч. сотрудник, Ин-т автоматизации проектирования РАН;

e-mail: semenov@icad.org.ru

И.С. Меньшов – докт. физ.-мат. наук, вед. науч. сотрудник, Ин-т прикладной математики им. М.В. Келдыша РАН;

e-mail: menshov@kiam.ru

И.Ф. Ахмедьянов – мл. науч. сотрудник, Ин-т автоматизации проектирования РАН;

e-mail: aildarmail@gmail.com

П.С. Уткин – мл. науч. сотрудник, Ин-т автоматизации проектирования РАН;

e-mail: utkin@icad.org.ru

Задача исследования внутрибаллистического процесса встречается в настоящее время как в военных, так и в гражданских приложениях (пороховые заряды для срабатывания систем тушения пожаров, пиропатроны в подушках безопасности автомобилей, газогенераторы и т.д.). «Нульмерный» термодинамический подход [1] позволяет определить основные интегральные характеристики внутрибаллистического процесса – максимальное давление и скорость метаемого тела, но не способен описать волновые процессы (так называемые волны Вьеля), возникающие при определенных условиях закладки пороха. С подобной задачей справляются квазиодномерные газодинамические модели [2]. Вместе с тем хорошо известно, что внутрибаллистический процесс, по крайней мере на некоторых стадиях, например в течение воспалительного периода, может характеризоваться существенно неоднородными пространственными распределениями определяющих величин [1]. Использование современных модульных пороховых зарядов и метаемых тел сложной формы также могут приводить к неоднородному протеканию внутрибаллистического процесса. Все это определяет необходимость разработки математических моделей, вычислительных алгоритмов и соответствующего программного обеспечения для проведения многомерных исследований внутрибаллистических процессов.

Для исследований внутрибаллистических процессов используется математическая модель движения многофазной, многокомпонентной, двухскоростной газопороховой среды с учетом горения пороха и силового межфазного взаимодействия, а также модель прогрева порохового элемента на основе решения одномерного уравнения теплопроводности [2]. Связь термодинамических параметров состояния газовой фазы описывается уравнением типа Дюпре с коволюмом. В дисперсной фазе вводится межгранулярное давление, препятствующее чрезмерному уплотнению дисперсной фазы.

Разработанный вычислительный алгоритм решения полученной системы дифференциальных уравнений в частных производных основан на методе расщепления по физическим процессам, явной схеме интегрирования по времени и методе конечных объемов для дискретизации по пространственным переменным. Для расчета потоков в газовой фазе используется схема Годунова, в дисперсной фазе – также схема Годунова или более диссипативная схема Русанова. Для расчета потоков в случае локального разрыва пористости используется приближенная линейаризация Роу. Для описания движения метаемого тела используется метод внутренней границы, который заключается в том, что в правую часть уравнений вводятся источники членов, моделирующие действие стенок метаемого тела на газопороховую смесь, а расчет при этом осуществля-

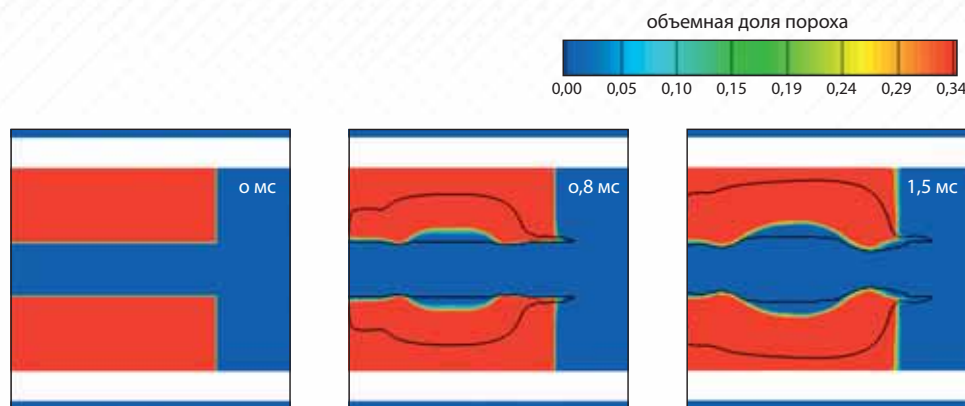


Рис. 1. Динамика воспламенения порохового заряда. Распределения объемной доли пироксилинового пороха, черная линия соответствует фронту волны воспламенения

ется сквозным образом во всей области. К преимуществам данного подхода по сравнению с использованием криволинейных, декартовых или вложенных сеток относятся простота генерации сетки в областях со сложной геометрией, а также отсутствие необходимости перестраивать сетку на каждом временном шаге в результате перемещения метаемого тела.

Расчетный алгоритм распараллелен для использования на многопроцессорных ЭВМ с распределенной памятью. Распараллеливание осуществляется путем декомпозиции расчетной области с использованием свободно распространяемого пакета программ и алгоритмов METIS, предназначенного для декомпозиции графов на подграфы. Расчеты проводятся на СК МВС-100k Межведомственного суперкомпьютерного центра РАН и СК СКИФ МГУ «Чебышев». Анализ качества распараллеливания демонстрирует удовлетворительные характеристики ускорения и эффективности при использовании нескольких сотен процессорных ядер.

В качестве примера рассматривается задача о выстреле из баллистической установки с использованием метательного заряда, состоящего из одного модуля. В состав модуля входит навеска пироксилинового пороха, а также воспламенитель, который размещается в центральном осевом канале (рис. 1).

Считается, что воспламенительный порох начинает гореть мгновенно, а для воспламенения пироксилинового пороха должен выполняться критерий, в качестве которого в данном случае было принято условие достижения на по-

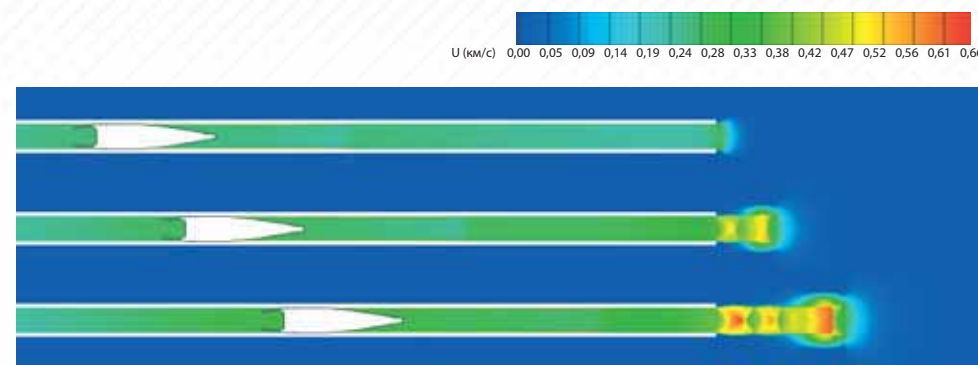


Рис. 2. Распределения продольной компоненты скорости газа в последовательные моменты времени (верхнее – 32,2 мс, последующие – через 2 мс)



Рис. 3. Распределения градиента давления газа, момент времени 45,8 мс

ворачивают на себя внимание структуры, связанные как с обтеканием тела окружающим воздухом, так и с обтеканием тела пороховыми газами, вылетающими вслед за ним из ствола.

верхности пороха заданной температуры. На рис. 1 представлена динамика воспламенения заряда. Волна воспламенения распространяется от центра модуля по направлению к периферийным слоям пороха и постепенно охватывает весь модуль.

Динамика движения метаемого тела внутри ствола представлена на рис. 2. На этом же рисунке наблюдается типичная ударно-волновая конфигурация при вылете струи воздуха, которая возникает перед движущимся телом. Рис. 3 иллюстрирует распределение градиента давления газа после вылета метаемого тела из ствола.

Авторы выражают глубокую признательность академикам РАН О.М. Белоцерковскому (ИАП РАН) и В.Б. Бетелину (НИИСИ РАН) за всестороннюю поддержку проводимых исследований, С.М. Фролову, В.С. Посвянскому, Б.С. Ермолаеву (Институт химической физики им. Н.Н. Семенова РАН) за помощь в работе, а также В.В. Чернову (ОАО «ЦНИИ «Буревестник») за экспериментальную поддержку проводимых теоретических исследований. Работа выполнена при поддержке РФФИ (грант № 09-01-12073-офи_м).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Серебряков М.Е.* Внутренняя баллистика ствольных систем и пороховых ракет. М.: Госуд. науч.-техн. изд-во Оборонгиз, 1962.
2. *Хоменко Ю.П., Ищенко А.Н., Касимов В.З.* Математическое моделирование внутрибаллистических процессов в ствольных системах. Новосибир.: Изд-во СО РАН, 1999.

Теоретическое исследование наноразмерных функциональных устройств и механизмов наносборки

