

**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*

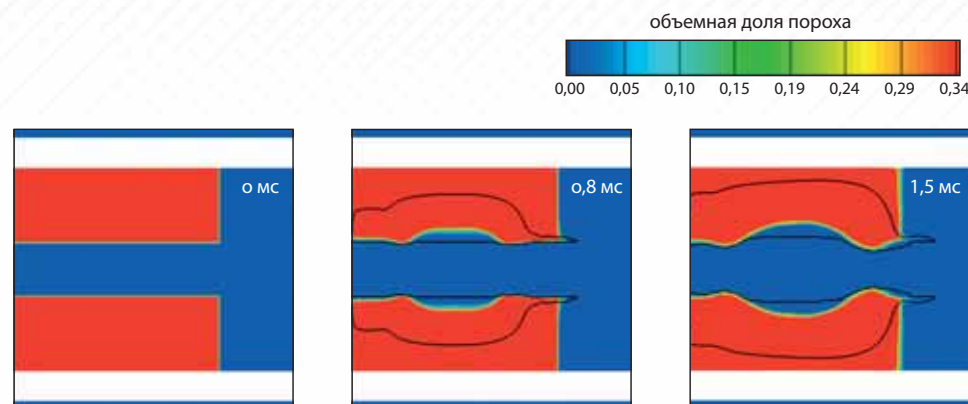
**П.С. Уткин** – мл. науч. сотрудник, Ин-т автоматизации проектирования РАН;

*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 линеаризация 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-



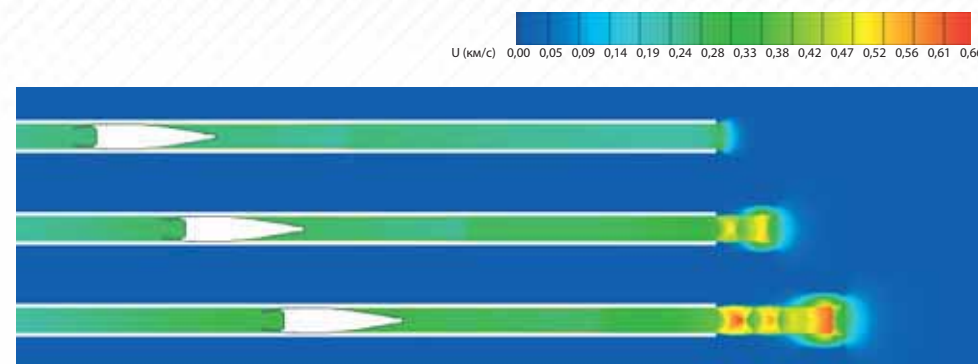
**Рис. 1.** Динамика воспламенения порохового заряда. Распределения объемной доли пироксилинового пороха, черная линия соответствует фронту волны воспламенения

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).

# Теоретическое исследование наноразмерных функциональных устройств и механизмов наносборки

## 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.

