

Математическое моделирование течений с ударными и детонационными волнами с использованием высокопроизводительных вычислений*А.И. Лонато^{1,2}, П.С. Уткин^{1,2}*¹Институт автоматизации проектирования РАН²Московский физико-технический институт (государственный университет)

Детонационная волна (ДВ) представляет собой самоподдерживающийся ударный разрыв, за фронтом которого непрерывно инициируется химическая реакция вследствие нагрева при адиабатическом сжатии. Как известно из экспериментальных и численных исследований, распространение ДВ в пространстве характеризуется формированием сложного нелинейного колебательного процесса.

Целью работы является численное исследование двух классов задач теории детонации. Первый класс задач – численное моделирование различных режимов распространения пульсирующей детонационной волны в двух постановках – моделирование в лабораторной системе координат с инициированием детонации у закрытого конца канала (П1) и моделирование в системе координат, связанной с лидирующим скачком (П2) [0] – и сопоставление полученных результатов. Второй класс задач – исследование динамики ударных волн в многофокусирующих системах (эллиптические отражатели) [2] для инициирования детонации.

При решении первого класса задач используется математическая модель одномерной системы уравнений Эйлера, дополненной моделью кинетики химической реакции Аррениуса. В постановке П1 в начальный момент времени канал, заполненный реагирующей смесью, разделен на две части. В левой, относительно короткой части заключен газ с повышенными значениями давления и температуры. Таким образом, моделируется мгновенное действие электрического разряда для инициирования детонации. В правой части канала находится газ при нормальных условиях. На обеих границах расчетной области устанавливаются граничные условия непротекания. В постановке П2 правая граница соответствует фронту ДВ, и на ней выставляются условия Ренкина-Гюгонно, отвечающие текущей скорости фронта ДВ. На левой границе выставляются условия экстраполяции нулевого порядка. В качестве начального условия используется решение стационарной системы Эйлера.

Вычислительный алгоритм в обеих постановках основан на методе расщепления по физическим процессам – газодинамики и химической кинетики. Расчет газодинамической задачи включает проведение ENO-реконструкции величин на границах ячеек расчетной сетки со вторым порядком аппроксимации, вычисление потоков через грани ячеек с использованием сеточно-характеристического варианта монотонной схемы Куранта-Изаксона-Рис, и интегрирование по времени по схеме Рунге-Кутты второго порядка аппроксимации. Более подробно этапы описаны в [3]. При использовании подхода П2 возникает связанная с переходом в систему координат лидирующего скачка необходимость в дополнительном уравнении эволюции скорости ДВ. Численное решение уравнения эволюции также проводится по схеме повышенного порядка аппроксимации, описанной, например, в [4].

Проведены расчеты длительной эволюции ДВ в обеих постановках. Для устойчивого режима распространения ДВ в обеих постановках получен выход газодинамических параметров на уровень параметров фон-Неймана. Показано, что расчетная схема действительно имеет второй порядок аппроксимации. Для слабо неустойчивой детонации – получен выход параметров за фронтом детонационной волны на предельный цикл (см. Рис. 1). Для реализованных режимов проведено количественное сравнение пульсаций с использованием Фурье-анализа.

При решении второго класса задач, где рассматривается эволюция ударных волн в многофокусирующих системах из [2], используется математическая модель двумерной системы уравнений Эйлера. Вычислительный алгоритм основан на численном интегрировании уравнений на треугольных ячейках расчетной сетки. Основные этапы вычислительного алгоритма включают дискретизацию уравнений методом конечных объемов и явную схему интегрирования по времени. При расчете потоков через ребра ячеек используется метод AUSM, описанный в [5].

Проведены расчеты процессов эволюции ударных волн для всех многофокусирующих систем из [2]. Полученные результаты свидетельствуют о том, что наилучшая фокусировка

осуществляется при использовании системы с тремя отражателями (см. Рис. 2). Данное заключение подтверждается опубликованными в [2] результатами экспериментальных исследований.

Исследование выполнено при финансовой поддержке РФФИ в рамках научного проекта № 16-31-00408 «мол_а».

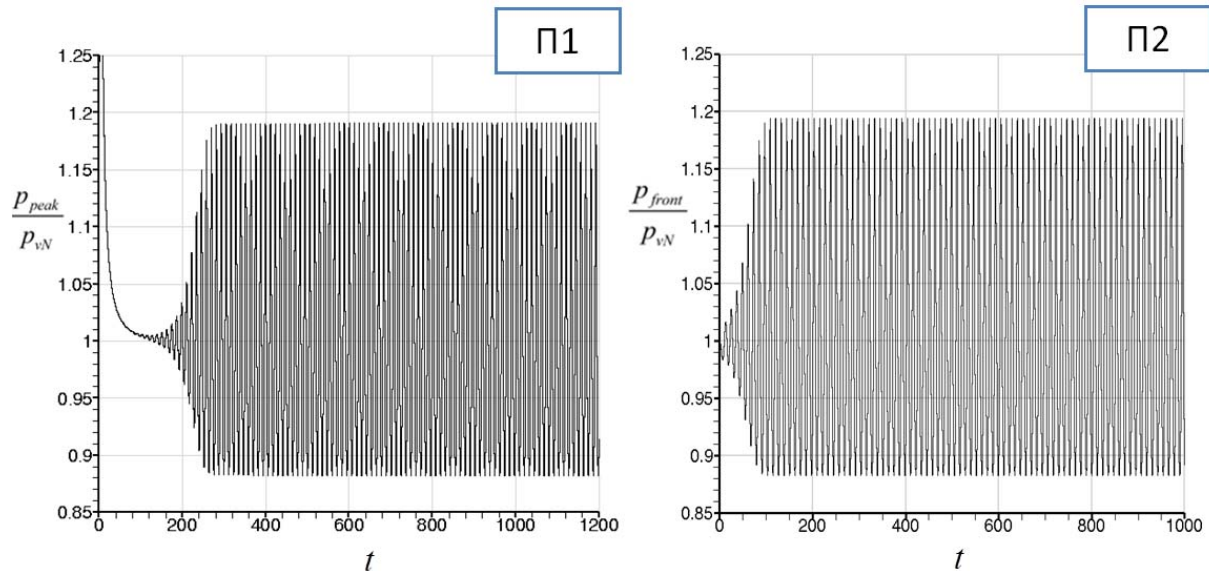


Рис. 1. Слабо неустойчивый режим. Зависимость давления в пике к давлению фон-Неймана от времени в постановке П1(слева) и зависимость давления за фронтом к давлению фон-Неймана от времени в постановке П2(слева).

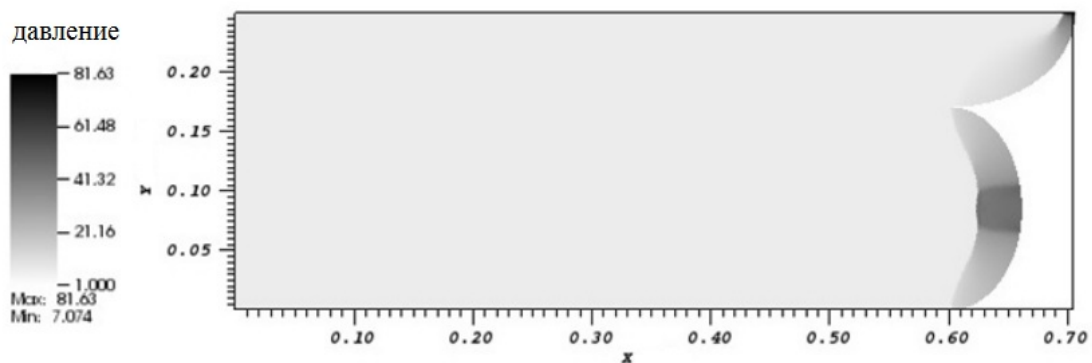


Рис. 2. Рассчитанный профиль давления для системы с тремя отражателями (половина канала).

Литература

1. *Kasimov A.R., Stewart D.S.* On the dynamics of the self-sustained one-dimensional detonations: A numerical study in the shock-attached frame // *Physics of Fluids*. 2004. V. 16. P. 3566.
2. *Vasil'ev A.A.* Cellular structures of a multifront detonation wave and initiation (review) // *Combustion, explosion, and shock waves*. 2015. V. 51. P. 1.
3. *Лопато А.И., Уткин П.С.* Математическое моделирование пульсирующей волны детонации с использованием ENO-схем различных порядков аппроксимации // *Компьютерные исследования и моделирование*. 2014. Т. 6. С. 643.
4. *Лопато А.И., Уткин П.С.* О двух подходах к математическому моделированию детонационной волны // *Математическое моделирование*. 2016. Т. 28. С. 133.
5. *Liou M.-S., Steffen Jr C.J.* A new flux splitting scheme // *Journal of Computational Physics*. 1993. V. 107. P. 23.