

Численное моделирование инициирования и распространения волн газовой детонации в трубах со сложной геометрией



17 Численное моделирование инициирования и распространения волн газовой детонации в трубах со сложной геометрией

Представлены результаты исследования инициирования и распространения сверхзвуковой волны горения — детонации — во взрывчатой газовой смеси. Для оптимизации инициирования предложено использовать профилировку стенок трубы. Исследования проводятся в рамках идеологии вычислительного эксперимента на многопроцессорных ЭВМ. Полученные результаты имеют как фундаментальное значение, так и представляют практический интерес, указывая путь снижения энергозатрат на инициирование детонации в силовых установках.

АВТОРЫ:

И.В. Семенов — канд. физ.-мат. наук, ст.научн.сотрудник, Институт автоматизации проектирования РАН, [e-mail: semenov@icad.org.ru](mailto:semenov@icad.org.ru)

П.С. Уткин — мл. научн. сотрудник, Институт автоматизации проектирования РАН, [e-mail: utkin@icad.org.ru](mailto:utkin@icad.org.ru)

И.Ф. Ахмедьянов — мл. научн. сотрудник, Институт автоматизации проектирования РАН, [e-mail: aidarmail@gmail.com](mailto:aidarmail@gmail.com)

А.Ю. Лебедева — стажер-исследователь, Институт автоматизации проектирования РАН, [e-mail: lebedeva-zp@yandex.ru](mailto:lebedeva-zp@yandex.ru)

В.В. Марков — докт. физ.-мат. наук, вед. научн. сотрудник, Математический институт имени В.А. Стеклова РАН, [e-mail: markov@mi.ras.ru](mailto:markov@mi.ras.ru)

Детонация — это гидродинамический волновой процесс распространения по веществу зоны экзотермической реакции со сверхзвуковой скоростью. Детонационная волна представляет собой самоподдерживающийся ударный разрыв, за фронтом которого непрерывно инициируется химическая реакция вследствие нагрева при адиабатическом сжатии. Другими словами детонация — это сверхзвуковой режим распространения горения.

Несмотря на то, что явление газовой детонации имеет более чем вековую историю исследования, до сих пор природа многомерных детонационных структур, образующихся в газовых реагирующих смесях при различных условиях, до конца не исследована. Вместе с тем в настоящее время потребность в понимании детонационных процессов возрастает из-за необходимости решения широкого класса прикладных проблем, связанных с разработкой методов обеспечения взрывобезопасности на производствах, а также с попытками использовать детонационное горение в силовых установках.

Как известно, реальная детонация в газах сопровождается образованием сложной неоднородной и нестационарной структуры течения за ее передним фронтом [1]. Для экспериментального исследования детонационных явлений требуется разработка прецизионных методов измерений различных газодинамических величин (плотности, давления, температуры и т.д.), и часто эти методы сами по себе являются предметом серьезного научного исследования. Исторически сложилось так, что натурный эксперимент в вопросах исследования газовой детонации долгое время являлся фактически единственным инструментом. Тем не менее результаты, полученные исследователями при использовании уже первых ЭВМ, помогли существенно прояснить природу детонационных явлений. Сегодня вычислительный эксперимент — неотъемлемый этап исследования механики быстропротекающих процессов. Более того, современные многопроцессорные вычислительные комплексы позволяют выявить очень тонкие эффекты, обнаружить которые в натурном эксперименте без привлечения средств математического моделирования весьма затруднительно или практически невозможно.

Настоящая работа посвящена исследованию одного из многочисленных вопросов механики быстропротекающих процессов — возможности инициирования детонации в газовых смесях при минимальных затратах энергии на коротких расстояниях и за малое время. Основная идея оптимизации инициирования заключается в специальной профилировке стенок трубы с тем, чтобы при прохождении относительно слабой ударной волны (УВ) по трубе обеспечить возникновение локальных областей самовоспламенения взрывчатой смеси и формирование затем самоподдерживающегося детонационного режима. Конечная цель — перевести

в детонацию УВ с минимальной интенсивностью.

Исследование проводится в рамках идеологии вычислительного эксперимента на многопроцессорных ЭВМ с распределенной памятью с использованием разработанного авторами программного комплекса для численного исследования динамики потоков реагирующих многокомпонентных и многофазных сред в многомерных областях [2]. Распараллеливание расчетного алгоритма осуществляется методом декомпозиции области с использованием библиотеки MPI. Для расчетов используются суперкомпьютер МВС-100К Межведомственного суперкомпьютерного центра РАН и суперкомпьютер СКИФ МГУ «Чебышев».

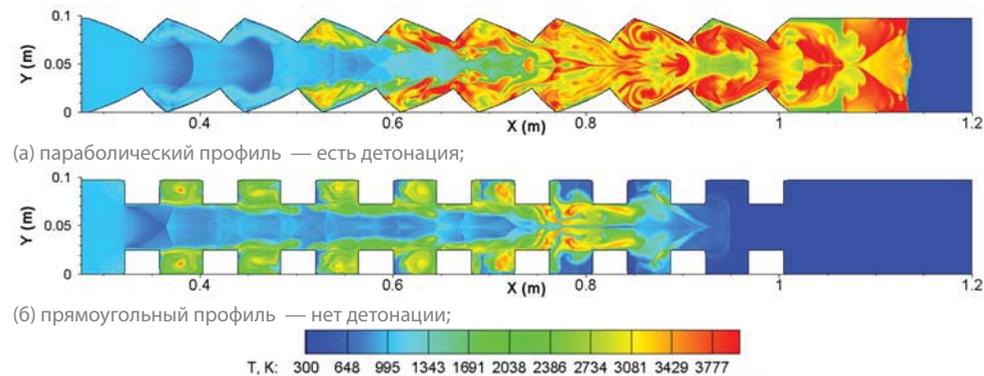


Рис. 1. Оптимизация геометрии канала для инициирования детонации в плоском случае, поля температуры в градусах Кельвина

В двумерной плоской постановке для модельной стехиометрической пропановоздушной смеси удалось показать, что регулярный параболический профиль стенок канала может существенно сократить время и расстояния перехода ударной волны в детонационную по сравнению с классическим профилем стенки канала в виде прямоугольных выступов [3] (рис. 1). Расчеты проводились с использованием 50 ядер на сетках с числом ячеек порядка 500 000 с пространственным разрешением около 0.1 мм. Время типичного расчета составляет около 10 часов, эффективность параллельного счета даже при использовании до сотни ядер не падает ниже 50%.

Для снижения интенсивности инициирующей УВ в осесимметричной трубе было предложено использовать геометрию стенок в виде параболического сужения и конического расширения (рис. 2). Геометрические параметры профиля были оптимизированы в результате детального анализа механизма инициирования детонации, включающего несколько стадий: двойное Маховское отражение лидирующей

УВ от параболического сужения, формирование локальных взрывов и последующее реиницирование детонации благодаря коническому расширению.

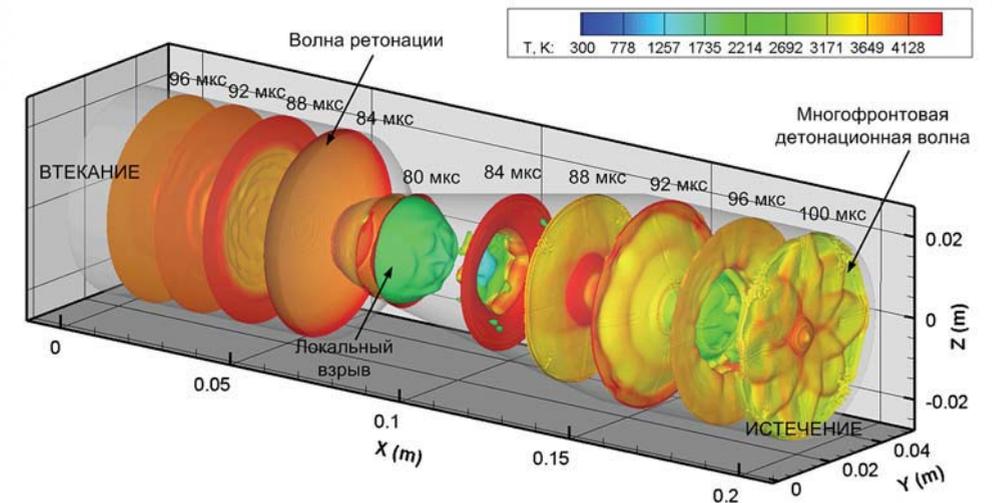


Рис. 2. Динамика инициирования и распространения волны детонации в трехмерной трубе с параболическим сужением и коническим расширением

На рис. 3 представлено поле максимального давления в случае инициирования детонации в трехмерной трубе в виде витка спирали с коленами. Хорошо видна характерная ячеистая структура детонации в выходном колене. Трехмерные расчеты проводились с использованием 600 ядер на сетках с числом ячеек порядка 30 млн с пространственным разрешением около 0,3 мм.

Полученные результаты имеют как фундаментальное значение, раскрывая механизм инициирования детонации в трубе с профилированными стенками, так и представляют практический интерес, поскольку указывают путь снижения энергозатрат на инициирование детонации в импульсных тепловых машинах.

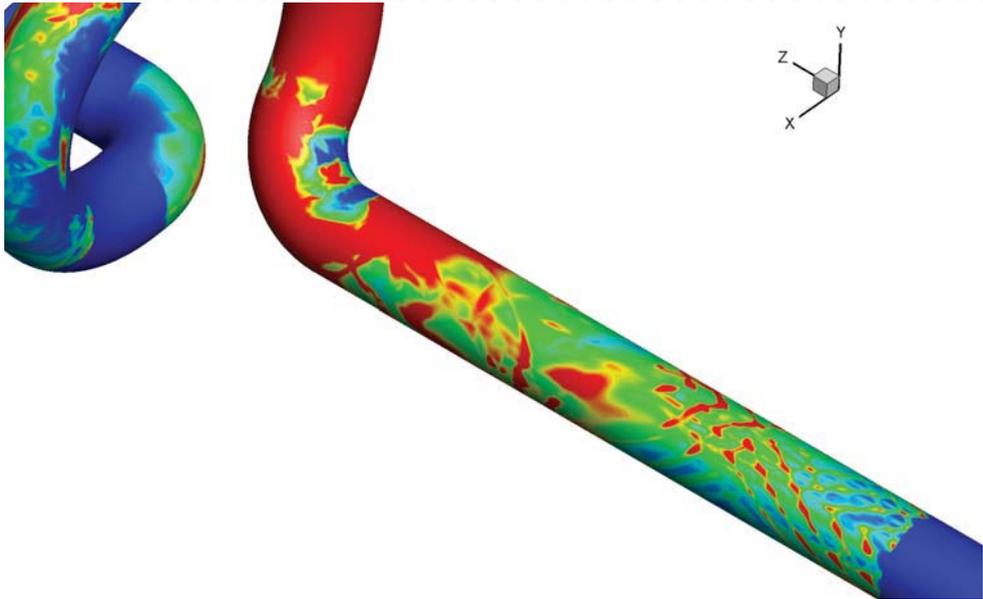


Рис. 3.

Поле максимумов давления, иллюстрирующее многомерную структуру детонационной волны

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Васильев А.А., Митрофанов В.В., Топчиян М.Е.* Детонационные волны в газах // Физика горения и взрыва. 1987. № 5. С. 109 — 130.
2. *Семенов И.В., Уткин П.С., Марков В.В.* Численное моделирование двумерных детонационных течений на многопроцессорной вычислительной технике // Вычислительные методы и программирование. 2008. Т. 9. С. 119 — 128.
3. *Фролов С.М. и др.* Сокращение длины и времени перехода горения в детонацию в трубе с профилированными регулярными препятствиями // Доклады Академии Наук. 2007. Т. 415. № 4. С. 509 — 513.