

УДК 534.222.2;536.46;661.215.1

ЧИСЛЕННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ВЯЗКИХ ДЕТОНАЦИОННЫХ ТЕЧЕНИЙ

© 2011 г.

А.В. Троцюк

Институт гидродинамики им. М.А. Лаврентьева СО РАН, Новосибирск

trotsyuk@hydro.nsc.ru

Поступила в редакцию 15.06.2011

Проведено численное моделирование двухмерной многофронтной (ячеистой) структуры детонационной волны в водородо-кислородной смеси с учетом процессов молекулярного переноса (вязкость, теплопроводность, диффузия). Исследовано влияние этих процессов на структуру волны и режимы ее распространения в узких и широких каналах.

Ключевые слова: газовая детонация, ячейка, вязкие течения, пределы детонации, узкие каналы, численное моделирование.

Введение

В последние годы резко возрос интерес к исследованию (как к численному, так и к экспериментальному) детонационных течений при малых масштабах течения. Это вызвано развитием новых технологий в химической промышленности (микрореакторы), а также в создании новых миниатюрных энергетических источников (MEMS (Micro-Electro-Mechanical-Systems) технологии). Закономерно возник вопрос о взрывобезопасности таких устройств и об организации различных режимов горения в них с целью повышения эффективности их работы, например сжигания топлива в детонационных волнах (ДВ). Однако при малых размерах сверхзвуковых реагирующих течений важную роль начинают играть процессы молекулярного переноса (вязкость, теплопроводность и диффузия).

Модель течения и численный метод

Для исследования детонационных течений при малых масштабах (низкие числа Рейнольдса) была разработана физическая модель течения вязких реагирующих газов на основе полных уравнений Навье–Стокса и высокоточной двухстадийной модели химической кинетики [1] (включающей в себя индукционную стадию [2] и стадию тепловыделения [3, 4]). Эта модель позволяет описывать вязкие нестационарные до- и сверхзвуковые химически реагирующие течения. Примененная модель химической кинетики приближенная, но обладает очень высокой точностью при описании стадии тепловыделения, сравнимой с точностью детального

кинетического механизма реакций. Самым важным преимуществом этой модели является ее простота, что на порядки снижает требования к оперативной памяти и быстродействию компьютера по сравнению с детальным кинетическим механизмом описания реакций. На основе предложенной физической модели горения созданы параллельные версии численного кода с различной стратегией разбиения на подобласти всей области решения. Полученная система уравнений решалась с помощью конечно-объемной схемы [5] с использованием MUSCL TVD интерполяции 4-го порядка [6] и алгоритма [7] приближенного решения задачи Римана на гранях контрольного объема.

Результаты моделирования

Проведены двумерные расчеты многофронтной (ячеистой) структуры вязкой детонационной волны в плоском канале. При моделировании эффекты молекулярного переноса (вязкость и т.д.) учитывались различным образом: как на стенках канала, так и в потоке, или только в центральной области течения. Расчеты проведены при различных начальных давлениях водородо-кислородной смеси, было сделано сравнение с результатами невязкого моделирования структуры ДВ в этой смеси (уравнения Эйлера).

Было получено, что на число поперечных волн на фронте ДВ (размер детонационной ячейки) существенное влияние оказывают эффекты молекулярного переноса исключительно в окрестности стенок канала, но не в центральной части течения. Для широких каналов (высота канала больше чем несколько размеров

детонационной ячейки) полученные размеры детонационной ячейки (согласно вязким и невязким расчетам) хорошо согласуются экспериментальными данными по водородным смесям.

Были также проведены расчеты структуры фронта ДВ в узких каналах (ширина канала меньше размера детонационной ячейки). Здесь влияние вязкости уже существенно (рис. 1).

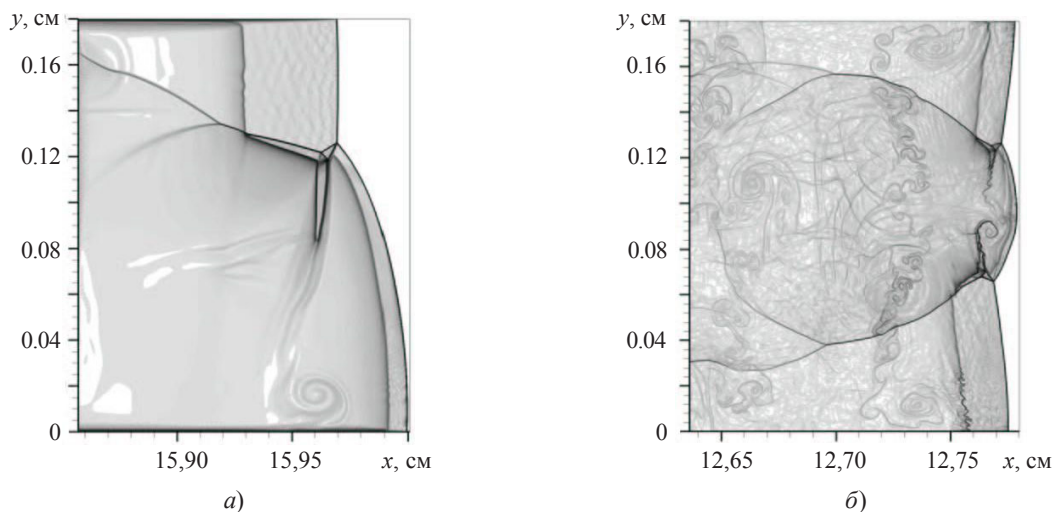


Рис. 1

На рисунке представлена численная шпирен-визуализация поля течения в детонационной волне в смеси $2\text{H}_2 + \text{O}_2$ при начальном давлении $p_0 = 0.4$ бар и $T_0 = 298.15$ К (размер детонационной ячейки $a_0 = 0.22$ см) в канале высотой 0.18 см: а) вязкая детонация (уравнения Навье–Стокса); б) для сравнения невязкая детонация (уравнения Эйлера). Получены затухающие режимы детонационного горения в таких каналах. Исследован стационарный режим распространения ДВ в подобном капилляре. Было получено условие существования стационарного режима: если высота капилляра больше определенного критического значения для данного химического состава смеси и заданной величины начального давления, то тогда в нем возможно существование самоподдерживающейся ДВ.

В настоящее время интенсивно проводятся расчеты по моделированию структуры вязких детонационных течений при распространении ДВ в капилляре с резким изменением его высоты, а также по проникновению ДВ из широкого канала (безграничного полупространства) в узкий капилляр. Получены результаты этих исследований.

Работа поддержана РФФИ.

Список литературы

1. Korobeinikov V.P., Levin V.A., Markov V.V., Chernyi G.G. // *Astronaut. Acta*. 1972. Vol. 17. P. 529–537.
2. White D.R. // *11th Symp. (Intern.) on Combustion*. Berkeley. 1966. P. 147–154.
3. Nikolaev Yu.A., Fomin P.A. // *Combustion, explosion and shock waves*. 1982. Vol. 18, No 1. P. 53–58.
4. Nikolaev Yu.A., Zak D.V. // *Combustion, explosion and shock waves*. 1988. Vol. 24, No 4. P. 87–90.
5. Godynov S.K. Ed. *Numerical solution of the multi-dimensional problems of gaseous dynamics*. M.: Nauka, 1976.
6. Yamamoto S., Daiguji H. // *Computers Fluids*. 1993. Vol. 22, No 2/3. P. 259–270.
7. Batten P., Leschziner M.A., Goldberg U.C. // *J. Computational Physics*. 1997. Vol. 137. P. 38–78.

NUMERICAL SIMULATIONS OF VISCOUS DETONATION FLOWS

A.V. Trotsyuk

A numerical simulation of two-dimensional multi-front (cellular) structure of a detonation wave in hydrogen/oxygen mixture was conducted with an allowance of molecular transfer processes such as viscosity, thermal conductivity, diffusion etc. The effect of these processes on the wave structure and the propagation regimes in narrow and wide channels was investigated.

Keywords: gaseous detonation, cell, viscous flows, detonation limits, narrow channel, numerical simulation.