

## РАСПРОСТРАНЕНИЕ ЯЧЕЙСТОЙ ДЕТОНАЦИИ ПО ГАЗОВЗВЕСИ ПРИ НАЛИЧИИ ГРАДИЕНТА КОНЦЕНТРАЦИИ

Т.А. Хмель, П.А. Фомин

*Институт теоретической и прикладной механики им. С.А.Христиановича СО РАН,  
630090, Новосибирск, Россия*

**Введение.** Интерес к детонационным течениям газовзвесей реагирующих частиц обусловлен как вопросами взрывобезопасности, так и перспективами использования явления детонации в технике и технологиях. Добавка реагирующих частиц к газовым смесям может служить инструментом управления характеристиками детонации, влияя на условия воспламенения, скорость детонации, размер и характер детонационной ячейки. Одним из способов управления является организация пространственных неоднородностей в распределении частиц (по размерам, концентрациям, фракционному составу). В настоящей работе в рамках модели приведенной кинетики детонационного горения алюминия, расширенной для применения в неоднородных по концентрациям газовзвесей, исследуются двумерные детонационные течения в плоских каналах при наличии продольного или поперечного градиентов концентрации.

**Физико-математическая модель** гетерогенной детонации, основанная на подходах механики гетерогенных сред и полуэмпирических законах воспламенения и горения микроразмерных и наноразмерных частиц алюминия, представлена в работах [1-3]. Расширение модели для неоднородных по концентрациям взвесей предполагает решение дополнительного уравнения для пространственного распределения «начальных» концентраций, от которых зависит распределение интегрального тепловыделения химических реакций, что отражает состав продуктов реакции, и доли несгоревших частиц. Эта зависимость определяется из решения стационарной задачи о структуре волны детонации на основе эмпирических данных и результатов термодинамических расчетов по зависимости скорости нормальной детонации от начальной концентрации частиц. Предлагаемый подход для моделирования гетерогенной детонации неоднородных сред основан на представлениях модели [4, 5], в которой используются данные термодинамического анализа для построения кинетики детонационного горения газовых и газокапельных смесей. В частности, в рамках модели [4, 5] в [6] получены данные по распространению ячейистой детонации в газовой смеси переменного состава.

Постановка задачи соответствует задаче ударно-волнового инициирования детонации в плоском канале и установлении режима распространения ячейистой детонации. Численный метод основан на схеме TVD Хартена для газа и схеме Джентри-Мартина-Дэйли для частиц. Рассмотрены пределы изменения концентраций от бедных до сверхстехиометрических составов.

**Результаты расчетов** для частиц 1 мкм представлены на рис. 1-2 в виде теневых картин максимального давления, выявляющих траектории тройных точек. При отсутствии градиента концентрации в достехиометрических и сверхстехиометрических смесях формируются регулярные ячейистые структуры. Скорости фронта, а также пиковые давления и плотности фаз в бедных и богатых смесях различаются значительно, при этом размер ячеек практически не зависит от начальной концентрации. При распространении детонации по каналу с продольным положительным (отрицательным) градиентом концентрации происходит замедление (ускорение) фронта и увеличение (уменьшение) средних и пиковых значений давления и плотности фаз (рис. 1).

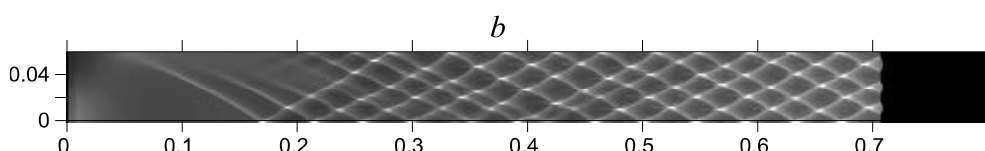
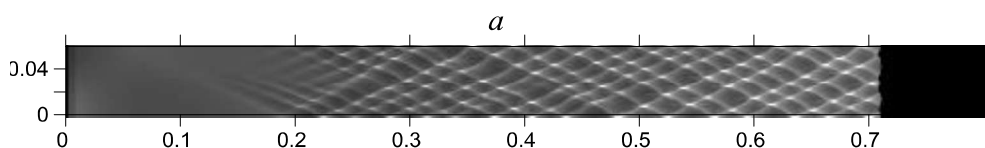


Рис. 1. Распространение ячеистой детонации по смеси с продольным положительным (а) и отрицательным (б) градиентами концентрации.

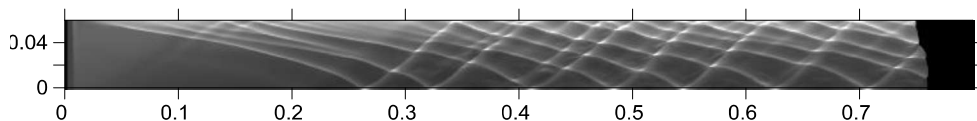


Рис. 2. Распространение ячеистой детонации по смеси с поперечным градиентом концентрации.

При поперечной неоднородности в канале формируются ячеисто-подобные структуры с искривленным фронтом и промежуточным значением средней скорости распространения (рис. 2). Форма ячеек несимметрична и значительно вытянута. Параметры течения на участке бедной смеси характеризуются пониженными значениями давлений и плотностей фаз, а на участке более высокой начальной концентрации – повышенными. Результаты согласуются с исследованиями аналогичных течений газовой детонации [6].

Работа выполнена при поддержке Российского фонда фундаментальных исследований (грант № 18-58-53031 ГФЕН\_а).

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Fedorov A.V., Khmel T.A.** Numerical simulation of formation of cellular heterogeneous detonation of aluminum particles in oxygen // *Combustion, Explosion and Shock Waves*. 2005. Vol. 41, No. 4. P. 435-448.
2. **Khmel T.A., Fedorov A.V.** Modeling of plane detonation waves in a gas suspension of aluminum nanoparticles // *Combustion, Explosion and Shock Waves*. 2018. Vol. 54, No. 2. P. 189-199.
3. **Khmel T.A., Fedorov A.V., Lavruk S.A.** Two-dimensional detonation flows in gas suspensions of micro- and nanosized aluminum particles // *AIP Conf. Proceedings*. Vol. 1893, No. 1. S. l.: AIP Publishing, 2017. 030143 p.
4. **Nikolaev Yu.A., Fomin P.A.** Analysis of equilibrium flows of chemically reacting gases. *Combustion, Explosion and Shock Waves*, Vol. 18, N 1, pp.53-58 (1982).
5. **Nikolaev Yu.A., Fomin P.A.** Approximate equation of kinetics in heterogeneous systems of gas-condensed-phase type. *Combustion, Explosion and Shock Waves*, Vol. 19, N 6, pp.737-745 (1983).
6. **P.A. Fomin, T. Kash, A.V. Trotsyuk, H. Hieronymus.** Modeling of film and surface detonation. *Internal Flows (Proceedings of The 5th International Symposium on Experimental and Computational Aerothermodynamics of Internal Flows, Gdansk, Poland, 2001, September 4-7)*, Vol. 2, Piotr Doerffer (Ed.), IFFM Publishers, 2001, pp. 935-943.