

УДК 532.529+541.126

**ОСОБЕННОСТИ ДЕТОНАЦИИ В ПОЛИДИСПЕРСНЫХ ГАЗОВЗВЕСЯХ**

© 2011 г.

Т.А. Хмель

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

khamel@itam.nsc.ru

Поступила в редакцию 16.06.2011

Представлены результаты численного моделирования детонации в полидисперсных газовзвесах. Процессы распространения и инициирования плоских волн, двумерные течения ячеистой детонации исследуются на модели двух-, трех- и пятифракционных взвесей частиц алюминия в кислороде. Установлены особенности структур неидеальной детонации, сценарии и критерии инициирования, свойства ячеистой детонации, в частности вырождение ячеек. При доле преобладающей фракции ниже 40% ячеистая детонация полностью вырождается в устойчивую плоскую волну, что связано с влиянием процессов межфазного взаимодействия различных компонент. Результаты подтверждаются данными экспериментов.

*Ключевые слова:* детонация, газовзвеси, ячеистая детонация, численное моделирование.

Исследования воспламенения, горения и детонации в газовзвесах обусловлены вопросами взрывопожаробезопасности производств, основанных на порошковых технологиях, и развитием детонационных технологий, например детонационных двигателей. Подавляющее большинство работ по детонационным процессам в газовзвесах выполнено в предположении монодисперсности. В то же время порошки являются обычно полидисперсными и характеризуются некоторой функцией распределения частиц по размерам. Распространение плоских ударных и детонационных волн в полидисперсных взвесах частиц унитарного топлива исследовалось в [1, 2], где для разных процессов в одной и той же смеси определен различный «средний» размер частиц. Цель настоящей работы – численное исследование влияния распределения частиц по размерам на характеристики плоской и ячеистой детонации в полидисперсных взвесах на модели многофракционных стехиометрических взвесей частиц алюминия в кислороде.

Физико-математическая модель детонации, основанная на уравнениях механики гетерогенных сред и приведенной химической кинетике, изложена в [3]. Здесь в рассмотрение включены несколько фракций частиц различного размера, при этом их взаимодействия с газом описываются идентичными соотношениями с учетом размеров частиц. Уравнения Эйлера решаются численно с применением схемы TVD для газа и Джентри–Мартина–Дэйли для фракций частиц. Метод успешно применялся для расчетов ячеистой детонации в монодисперсных взвесах [4]. Состав  $N$ -

фракционной взвеси определяется величинами

$$\eta_i = \rho_{pi} / \rho_{p0}, \quad \rho_{p0} = \sum_{i=1}^N \rho_{pi}$$

– начальная плотность (для стехиометрии алюминия и кислорода  $1.34 \text{ кг/м}^3$ ), размер частиц 1–5 мкм.

В [3] было показано, что детонация в монодисперсных взвесах алюминия неидеальна, в решении для стационарных структур имеется внутренняя звуковая (по замороженной скорости звука) точка. Оказалось, что в бидисперсных взвесах детонация также неидеальна, однако стационарная часть структуры ограничена равновесно-замороженной звуковой точкой  $FE$ , к которой примыкает расширяющийся участок нестационарного течения до замороженной звуковой точки  $F$  – точки смыкания с волной разрежения. Детонационные структуры бидисперсных взвесей характеризуются двойным ро-слоем, в крупных и в мелких частицах. Амплитуды ро-слоев определяются концентрациями фракций. Соответственно профили давления и плотности газа принимают форму кривых с двумя точками локального максимума. В зависимости от параметра насыщенности величина первого максимума может быть как выше, так и ниже второго. При непрерывной функции распределения частиц по размерам характер профилей параметров детонационной структуры будет более сглаженным.

Сценарии инициирования детонации также имеют новые свойства, в частности, имеется «комбинированный» сценарий: сначала развивается детонационно-подобное течение, поддержи-

ваемое горением мелких частиц, в продуктах которых происходит воспламенение крупных. Здесь возникают двухфронтные структуры, которые существуют ограниченное время и распространяются до их слияния в одну пересжатую волну, ослабляемую впоследствии до выхода на нормальный режим детонации. Критерии инициирования детонации определяются размером частиц фракций и фракционным составом. Присутствие всего лишь 5–10% частиц вдвое меньшего диаметра обеспечивает снижение энергии взрывного инициирования на 30–50%.

Ячеистая детонация полидисперсных взвесей обнаруживает новые свойства, не присущие ячеистой детонации в газах или в монодисперсных взвесьях. При значительном доминировании одной из фракций частиц характеристики ячеистой детонации подобны монодисперсной взвеси (рис. 1а), а размер ячейки определяется размером частиц доминирующей фракции. При увеличении долей частиц других размеров в численном моделировании наблюдается ослабление поперечных волн и спрямление фронта детонации (рис. 1б). На рисунке мгновенные картины ячеистой детонации даны соответственно для монодисперсной (2 мкм) и бидисперсной (2 мкм и 1 мкм,  $\eta_2 = 0.6$ ) взвесей. Течение характеризуется меньшими пульсациями параметров. Снижаются максимальные давления в тройных точках и при их столкновении. Имеет место выпрямление траекторий тройных точек. Все эти свойства характеризуются как вырождение ячеистой детонации.

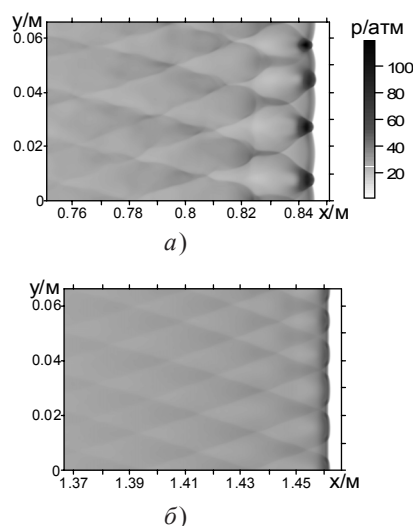


Рис. 1

В детонации трех- и пятифракционных взвесей с симметричной функцией распределения частиц по размерам ячейки образуются лишь при доле средней фракции не менее 40%.

На рис. 2 представлены траектории тройных точек в трехфракционной взвеси 1, 2 и 3.5 мкм,  $\eta_2 = 0.6$ . При некоторых составах бидисперсных взвесей и при доле средней фракции менее 40% в трех- и пятифракционных взвесьях имеет место полное вырождение ячеистой детонации в устойчиво распространяющуюся плоскую волну.

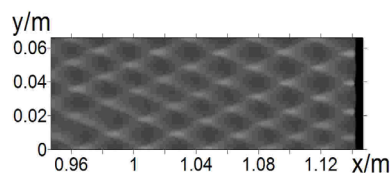


Рис. 2

Возможность устойчивого распространения плоской детонации в полидисперсных взвесьях подтверждается методами акустического анализа течений. Формирование регулярной системы поперечных волн ячеистой детонации обусловлено неустойчивостью фронта и особенностями распространения возмущений в неоднородном поле течения детонации, благодаря которым первичная поперечная волна порождает вторичные волны на определенном расстоянии друг от друга [5]. Как показывает акустический анализ структур течения многофракционных взвесей, проведенный аналогично [5], процессы релаксаций каждой из фракций накладываются, характерный масштаб расстояния между поперечными волнами не определяется. В результате вторичные волны как регулярная система и ячеистая детонация не формируются. Результаты акустического анализа полностью согласуются с данными численного моделирования.

Свойство вырождения ячеистой детонации в полидисперсных взвесьях подтверждается экспериментами [6], где при одинаковых условиях наблюдалось значительное снижение амплитуды пульсаций ячеистой детонации при переходе от монодисперсного к полидисперсному порошку алюминия. Подобное снижение пульсаций в течениях ячеистой детонации получено на модели трехфракционных смесей 1, 2 и 3.5 мкм при переходе от  $\eta_2 = 0.8$  к  $\eta_2 = 0.6$ .

Выявленные особенности детонационных структур полидисперсных взвесей позволяют рассматривать фракционный состав смеси как возможный фактор управления характеристиками детонационных процессов.

#### Список литературы

1. Кутушев А.Г., Родионов С.П. // ПМТФ. 1993. №2. С. 24–31.
2. Ивандаев А.И., Кутушев А.Г., Родионов С.П. //

- ПМТФ. 1995. Т. 36, №6. С. 14–24.
3. Fedorov A.V., Fomin V.M., Khmel' T.A. // *Shock Waves*. 1999. V. 9, No 5. P. 313–318.
4. Федоров А.В., Хмель Т.А. // *ФГВ*. 2005. Т. 41, №4. С.84–98.
5. Barthel H.O., Strehlow R.A. // *Physics of Fluids*. 1966. V. 9, No 10. P. 1896–1907.
6. Zhang F., Gerrard K.B., Rypley R. // *Proc. of the 7-th ISHPMIE*, St. Petersburg, Russia, July 7-11, 2008. Vol. II. P. 22–23.

#### SPECIFIC FEATURES OF DETONATIONS IN POLYDISPERSE GAS PARTICLE MIX-TURES

*T.A. Khmel*

The paper presents the results of numerical simulations of detonation processes in polydisperse gas particle mixtures. Initiation and propagation of plane detonation waves, two-dimensional detonation flow of cellular detonations are investigated using the model of aluminum particles of two, three, and five fractions suspended in oxygen. Specific features of structures of non-ideal detonation, scenarios and criteria of detonation initiation are revealed. Properties of cellular detonations, specifically degeneration of detonation cells, are obtained. With dominating fraction less than 40% complete transformation of the cellular detonation into a steady propagating planar detonation wave occurs. This is stipulated by the phase interaction processes of different fractions. The results are confirmed by experimental data.

*Keywords:* detonation, gas particle suspensions, cellular detonation, numerical simulations.