

## ИССЛЕДОВАНИЕ РАСПРОСТРАНЕНИЯ ГЕТЕРОГЕННОЙ ДЕТОНАЦИИ В СЛОЕ ЧАСТИЦ АЛЮМИНИЯ

Т.А. Хмель, С.А. Лаврук

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

Проблема подъема и воспламенения реагирующей пыли за фронтом ударной или детонационной волны не является новой. Эти задачи рассматривались, как теоретически, [1–5], так и экспериментально [6,7]. Однако, данных еще недостаточно как по картинам течения, так и по критическим условиям распространения при таких условиях. В данной работе исследуется взаимодействие ударной волны с гетерогенной смесью частиц алюминия с последующим распространением детонации. Использовалась модель детонационного горения алюминия, описанная в [8,9]. Горение алюминия описывается в рамках приведенной кинетики с учетом неполного сгорания частиц и температурного критерия воспламенения. Также учитывался переход от диффузионного к кинетическому режиму горения частиц микро и наночастиц алюминия [10,11], в отличие от работы [3]. Рассматривается канал, частично заполненный предварительно перемешанной стехиометрической смесью частиц алюминия в кислороде (Рис. 1).

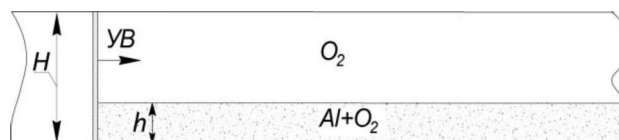


Рис. 1. Схема расчетной области

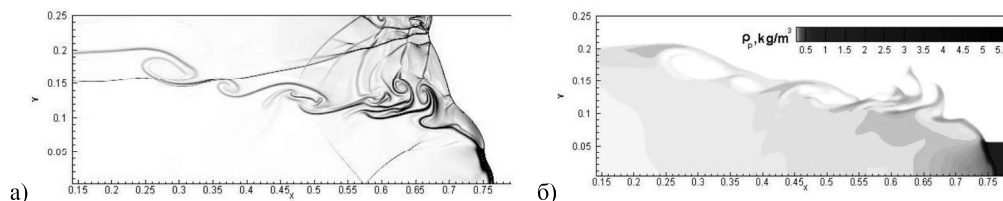


Рис. 2. Картины течения. а) Шлирен изображения течения, б) Плотность частиц  $d=3.5$  мкм  $t=0.56$  мс,

Результаты расчетов представлены на рис. 2-3. При ширине реагирующего слоя в  $h=5$  см и ширине канала в  $H=25$  см наблюдается режим течения, близкий к критическому. На шлирен изображении (Рис. 2) можно заметить, что в течении образуются вихревые структуры, аналогичные тем, что ранее были описаны в работах [3,5]. За фронтом ударной волны на контактной границе развивается неустойчивость Кельвина-Гельмгольца.

Анализируя картины максимального давления (рис. 3), можно заключить, что в реагирующей смеси на начальном участке канала происходит инициирование и распространение детонации. Далее происходит ослабление детонации, характеризующееся снижением пиковых давлений до 30 – 35 атм, при этом фронт детонации некоторое время остается плоским. Со временем происходит зарождение и развитие поперечных волн, в которых давление уже превышает давление Чепмена-Жуге (55 атм). При выходе из реагиру-

юшей смеси поперечные волны продолжают распространяться вверх по каналу, отражаясь от верхней стенки. Кроме того, отражение поперечных волн происходит и от контактной поверхности (границы слоя), усиливая детонацию внутри слоя (Рис. 3а).

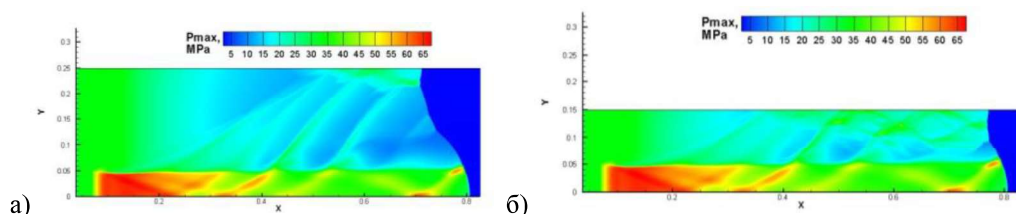


Рис. 2. Картины истории максимальных давлений, а)  $h=5$  см,  $H=25$  см,  $d=3.5$  мкм,  $t=0.60$  мс, б)  $h=5$  см,  $H=15$  см,  $d=3.5$  мкм,  $t=0.60$  мс

Схожие картины имеют место и при уменьшении ширины канала (рис. 3б). В облаке происходит распространение детонации в квази-стационарном режиме. В области над реагирующими частицами распространяются поперечные ударные волны, которые при взаимодействии между собой образуют систему поперечных волн. Давление газа за фронтом лидирующей ударной волны вне слоя составляет 10 – 20 атм, а при столкновении поперечных волн превышает 45 атм. Средняя скорость распространения фронта примерно одинакова в обоих случаях ( $H=25$  см и  $H=15$  см) и составляет примерно 1.3 км/сек, что ниже скорости Чепмена-Жуге (1.56 км/сек).

Работа выполнена в рамках Программы фундаментальных научных исследований государственных академий наук на 2013-2020 годы (проект АААА-А17-117030610139-4).

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Semenov I., Utkin P., Markov V.** Numerical modelling of dust-layered detonation structure in a narrow tube // *J. Loss Prev.* 2013. Vol. 26, № 2. P. 380–386.
2. **Li Y.-C. et al.** Deflagration to detonation transition fueled by dust layers // *Shock Waves*. 1995. Vol. 5, № 4. P. 249–258.
3. **Fedorov A. V., Fomin V.M., Khmel T.A.** Theoretical and numerical study of detonation processes in gas suspensions with aluminum particles // *Combust. Explos. Shock Waves*. 2006. Vol. 42, № 6. P. 735–745.
4. **Badiola C., Gill R.J., Dreizin E.L.** Combustion characteristics of micron-sized aluminum particles in oxygenated environments // *Combust. Flame*, 2011. Vol. 158, № 10. P. 2064–2070.
5. **Houim R.W., Oran E.S.** Numerical simulation of dilute and dense layered coal-dust explosions // *Proc. Combust.*, 2015. Vol. 35, № 2. P. 2083–2090.
6. **Klemens R. et al.** Dynamics of dust dispersion from the layer behind the propagating shock wave // *J. Loss Prev.* 2006. Vol. 19, № 2–3. P. 200–209.
7. **Lebecki K. et al.** Large scale grain dust explosions-research in Poland // *Shock Waves*, 1995. Vol. 5, № 1–2. P. 109–114.
8. **Fedorov A. V., Khmel' T.A., Lavruk S.A.** Exit of a Heterogeneous Detonation Wave into a Channel with Linear Expansion. II. Critical Propagation Condition // *Combust. Explos. Shock Waves*, 2018. Vol. 54, № 1. P. 72–81.
9. **Khmel T.A., Fedorov A. V.** Modeling of Plane Detonation Waves in a Gas Suspension of Aluminum Nanoparticles // *Combust. Explos. Shock Waves*, 2018. Vol. 54, № 2. P. 189–199.
10. **Сандарам Д., Янг В., Зарко В.Е.** Горение наночастиц алюминия (обзор) // *Физика Горения И Взрыва*. 2015. Vol. 51, № 2. P. 37–63.
11. **Федоров А.В., Хмель Т.А.** Проблемы замыкания моделей при описании детонации ультрадисперсных газовзвесей алюминия (обзор) // *Физика Горения И Взрыва*. 2019. Vol. 55, № 1. P. 3–20.