

О ВЗРЫВНОМ ВОЗДЕЙСТВИИ ПРИ ДЕТОНАЦИИ ПОРОШКОВ АЛЮМИНИЯ

Т.А. Хмель

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

Введение. Широкое распространение технологий, использующих микро- и нанодисперсные порошки алюминия, а также возможность скопления пыли при производстве изделий из алюминия обуславливает актуальность проблемы взрывобезопасности. Одним из важных вопросов является оценка взрывных нагрузок на стены помещений и различные конструкции (транспортёры, вентиляционные шахты и т.д.). Как правило, при проектировании конструкций учет возможного взрывного воздействия основывается на оценках амплитудных характеристик волн Чепмена-Жуге (ЧЖ). Однако как в газовых смесях, так и в газозвесах частиц алюминия распространение детонационного фронта носит характер ячеистой детонации. При этом максимальные давления в тройных точках (при столкновениях поперечных волн на фронте лидирующей ударной волны) могут быть в несколько раз выше, чем давления в хипике волны Чепмена-Жуге.

В настоящей работе обсуждается вопрос о пиковых давлениях детонации и представлены расчетные данные для монодисперсных и полидисперсных порошков алюминия микронного и нанометрового диапазона размерности частиц. Результаты получены на основе моделирования развития и распространения ячеистой гетерогенной детонации в плоских каналах в рамках полуэмпирической модели, учитывающей особенности воспламенения и горения микродисперсных и нанодисперсных порошков алюминия.

Физико-математическая модель детонации микродисперсных взвесей частиц алюминия в кислороде изложена в [1-2]. Модель основана на уравнениях механики сплошной слабозапыленной среды с описанием химических реакций в рамках приведенной кинетики, константы которых определены на основе экспериментальных данных по воспламенению и горению частиц алюминия в различных условиях, включая условия детонации, а также известных данных по распространению детонационных волн. Расширение модели на диапазон наноразмерных частиц включает учет эффектов свободно молекулярного обтекания частицы газом при описании межфазного взаимодействия (сопротивления и теплообмена частиц с газом), а также учет изменения закона горения частиц при переходе к нанометровому диапазону размеров частиц [3].

Описание химического взаимодействия частиц с газом проводится в рамках приведенной кинетики аррениусовского типа. Зависимость характерного времени горения наноразмерных частиц в кислороде от их размера, давления и температуры газа определена на основе совокупности эмпирических данных в [3] $\tau_{\xi} = \tau_0 (d/d_0)^{0.3} \exp(E_a/RT_1) (p/p_*)^{-0.5}$, где $d_0=80$ нм, $E_a=60$ кДж/моль, $p_*=0.8$ МПа. Для частиц диаметром 0.5 мкм и микронных размеров принимается $\tau_{\xi} = \tau_0 (d/d_1)^m \exp(E_a/RT_2)$, где $E_a=32$ кДж/моль, $d_1=3.5$ мкм, при этом при $d<3.5$ мкм $m=0.3$, при $d>3.5$ мкм $m=2$ (учитывается переход от диффузионного режима горения к кинетическому режиму).

Результаты расчетов. Распространение плоских волн ЧЖ и волн ячеистой детонации моделировалось на основе решения нестационарных уравнений в одномерном и двумерном приближении. В плоских волнах детонации ЧЖ в стехиометрических взвесах алюминия в кислороде максимальные давления достигаются в точке хипика и состав-

ляют порядка 50 – 60 атм. При некоторых условиях взрывного инициирования детонации локальные давления в пересжатом режиме могут достигать более высоких значений (120 атм), однако пересжатые волны быстро ослабляются волнами разрежения, и максимальные давления снижаются до значений ЧЖ.

Реальные детонационные волны в газозвеси алюминия, как и в газовой детонации, распространяются в режиме ячеистой детонации. В точках смыкания поперечных волн и фронта лидирующей волны давления возрастают и при столкновении поперечных волн могут достигать значительно более высоких значений. Картины ячеистой детонации в каналах получены из решения задачи о взаимодействии ударной волны с облаком частиц и постепенного развития малых возмущений [4].

В монодисперсных взвесьях микроразмерных и субмикронных частиц (при $E_a = 32$ кДж/моль) траектории тройных точек показывают близкую к регулярной ячеистой структуру. На рис. 1 показаны поля максимальных за период развития и распространения ячеистой детонации давлений $p_{\max}(x, y) = \max_t[p(x, y, t)]$ для частиц 2 мкм (а) и 500 нм (б). В монодисперсных взвесьях микроразмерных частиц пиковые давления ячеистой детонации превышают давления ЧЖ более чем в 2 – 3 раза. При этом можно отметить некоторое уменьшение пиковых давлений при увеличении размера частиц. Например, расчетные максимальные давления в монодисперсной взвеси 2 мкм составили 158 атм (рис. 1а), в смеси 3.5 мкм - 128 атм, а в смеси 6 мкм - 125 атм.

Значительное снижение пиковых давлений отмечено при рассмотрении полидисперсных взвесей микроразмерных частиц. Ячеистая детонация в бидисперсных взвесьях и в трех- пятифракционных взвесьях характеризуются ослаблением поперечных волн, спрямлением траекторий тройных точек и соответствующим уменьшением пиковых давлений (вырождением ячеистой детонации) [5]. При значительном разбросе в размерах частиц (отсутствии доминирующей фракции) режим детонации близок к режиму устойчивого распространения плоской волны ЧЖ. В смесях 3.5 мкм и 1 мкм при массовых долях 0.4/0.6 и 0.3/0.7 p_{\max} уменьшаются до значений порядка 80 атм, а в смесях 2 мкм и 1 мкм при 0.6/0.4 и 0.5/0.5 - до значений, отвечающих структурам ЧЖ (56 атм).

В области субмикронных размеров частиц пиковые давления несколько выше: для частиц 500 нм p_{\max} достигает значений 210 атм (рис. 1б). Эти свойства обусловлены взаимодействием зон релаксации и горения: в более крупных частицах значительная доля периода горения соответствует условиям скоростной и температурной неравновесности фаз, что является сглаживающим фактором формирования профиля давления за фронтом

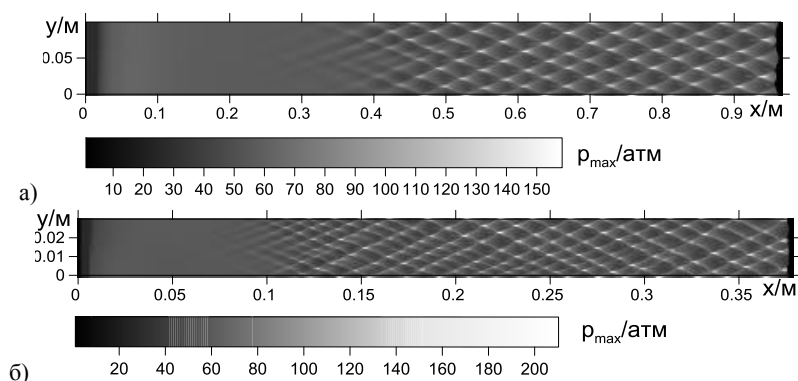


Рис. 1. Ячеистая детонация монодисперсных взвесей алюминия: 2 мкм (а) и 0.5 мкм (б).

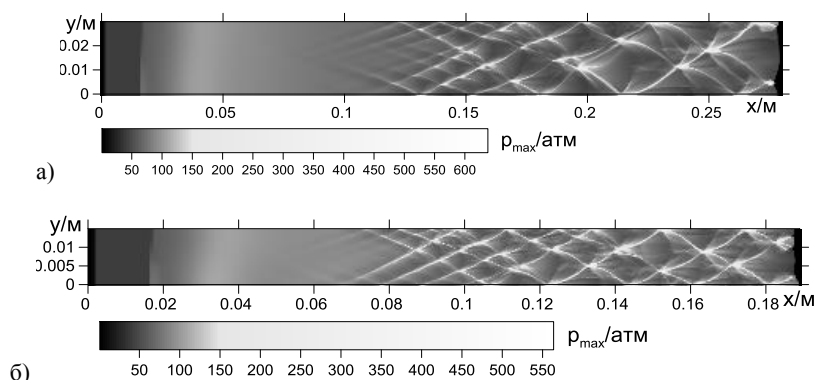


Рис. 2. Ячеистая детонация нанодисперсных взвесей алюминия 200 нм (а) и 80 нм (б).

лидирующей УВ. При переходе к субмикронным частицам характерные времена скоростной и тепловой релаксации уменьшаются пропорционально d^α , где $1.5 < \alpha < 2$, в то время как время горения сокращается пропорционально $d^{0.3}$, т.е. горение при детонации субмикронных частиц протекает в равновесной по скоростям и температурам смеси.

Еще более значительное увеличение пиковых давлений отмечается в расчетах детонации нанодисперсных взвесей. Горение наноразмерных частиц описывается аррениусовской реакцией с более высоким значением энергии активации (60 кДж/моль), чем микроразмерных (32 кДж/моль). Это обуславливает некоторые особые свойства ячеистой детонации: значительную перестройку поперечных волн по мере развития малых возмущений на фронте, нарушение регулярности ячеистых структур и укрупнение ячейки (рис. 2), а также повышение амплитуды пульсаций параметров течения. Последнее согласуется с данными экспериментов [6], где для нанопорошка алюминия (100 нм) отмечено значительное возрастание пульсаций давления за фронтом спиновой детонации, в сравнении с микродисперсным порошком (1.6 мкм). В расчетах пиковые давления при столкновениях поперечных волн достигают значений 560 атм для 80 нм, 572 атм для 100 нм, 638 атм для 200 нм, что на порядок и более превышает давления ЧЖ.

Возможность многократного усиления взрывного воздействия в ячеистой детонации по сравнению с волнами ЧЖ следует принимать во внимание для оценки взрывоопасности при проектировании объектов производства и хранения порошков алюминия.

Благодарности. Работа выполнена при поддержке РФФИ (проекты 15-07-06581 и 16-08-00778).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Федоров А.В., Фомин В.М., Хмель Т.А. Волновые процессы в газозвесах частиц металлов, Новосибирск: Параллель, 2015.
2. Федоров А.В., Хмель Т.А. Математическое моделирование детонации алюминиевой пыли в кислороде с учетом скоростной неравновесности частиц // ФГВ. 1997. Т.33. № 6. С.80-91.
3. Fedorov A.V., Khmel T.A. Detonation structures in gas suspensions of submicron and nano aluminum particles//In: Nonequilibrium Processes in Physics and Chemistry. V. II. / Ed. by A.M. Starik and S.M. Frolov. – M.: TORUS-PRESS. 2016. P. 341-351.
4. Федоров А.В., Хмель Т.А. Численное моделирование формирования ячеистой гетерогенной детонации частиц алюминия в кислороде // ФГВ. 2005. Т. 41. №4. С.84-98.
5. Федоров А. В., Хмель Т. А. Формирование и вырождение ячеистой детонации в бидисперсных газозвесах частиц алюминия// ФГВ. 2008. Т.44. № 3. С.109-120.