

Численное моделирование подавления детонации в газозвеси частиц алюминия в кислороде*

А.В. ФЕДОРОВ, Ю.В. КРАТОВА

Институт теоретической и прикладной механики СО РАН
yulia@itam.nsc.ru: 630090, Новосибирск, Институтская, 4/1

Численно исследованы процессы подавления детонации, распространяющейся в плоском канале, заполненном газозвесью мелких частиц алюминия в кислороде, при взаимодействии с облаком химически инертных частиц. Рассматриваются режимы плоской детонации. Влияние инертных частиц может приводить к изменению детонационной структуры волны и ее скорости. Целью работы ставилось выявить влияние параметров инертной смеси, геометрических параметров облака на режимы распространения детонации.

Вопросы распространения детонации в смеси газа, реагирующих и химически инертных частиц представляет как практический, так и фундаментальный интерес. Впрыск инертных частиц широко исследуется и применяется для подавления газовой детонации. Область взаимодействия гетерогенной детонации с облаком инертных частиц практически не исследована [1].

1. Постановка задачи

Рассмотрим плоский канал, заполненный однородной стехиометрической монодисперсной смесью кислорода и частиц алюминия, а также инертных частиц глинозема (Al_2O_3). Длина облака инертных частиц L (рис.1, а). Слева направо по каналу распространяется плоская стационарная детонационная волна. Возникновение детонационной волны происходит вследствие воздействия взрывной ударной волны на реагирующую смесь частиц алюминия и кислорода. При достаточной амплитуде УВ в облаке формируется плоская пересжатая детонационная волна, которая ослабляется под действием волны разрежения. Длина облака газозвеси выбирается так, чтобы к моменту достижения облака инертных частиц сформированная волна отвечала самоподдерживающемуся режиму, оставаясь при этом плоской. На рис.1, б приведены мгновенные профили давления, отображающие процесс формирования детонационной волны и выход на самоподдерживающийся режим.

Все расчеты проводились для смеси частиц алюминия диаметром 2 мкм при стехиометрической концентрации $\xi_2=0.55$ ($m_2=6 \cdot 10^{-4}$). Параметры инертной смеси варьировались: диаметр инертных частиц - d_3 от 2 до 10 мкм, объемная концентрация - m_3 от 10^{-5} до 10^{-3} . Целью работы ставилось выявить влияние параметров инертной смеси (массовая доля частиц и их размер) на режимы распространения детонации.

*Работа выполнена при финансовой поддержке АВЦП «Развитие научного потенциала высшей школы Министерства образования и науки» на 2011 год, код проекта 2.1.1/11316 и гранта Президента Российской Федерации для государственной поддержки молодых российских ученых МК-393.2011.1.

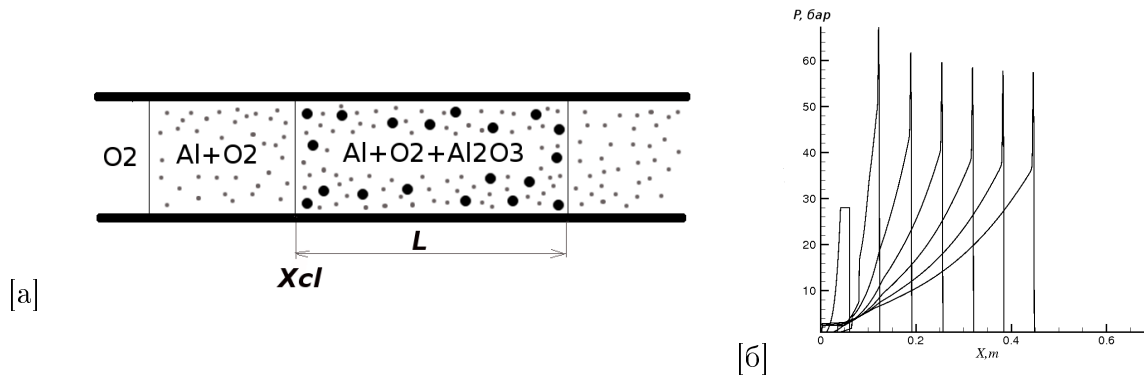


Рис. 1. Схема течения (а). Формирование плоской детонационной волны (б)

2. Методы решения

Математическая модель детонации частиц алюминия в кислороде была развита в [2] и верифицирована путем сравнения с экспериментальными данными. Модель основана на представлениях многоскоростного многотемпературного континуума. Горение частиц алюминия описывается приведенной реакцией, инициируемой после достижения критической температуры воспламенения. Также учитывается неполное сгорание частиц. В работе используются численные технологии, опробованные ранее на ряде задач механики гетерогенных сред: схемы TVD для газа и Джентри-Мартина-Дэйли для частиц [3].

3. Результаты исследования

Итак, рассмотрим взаимодействие плоской детонационной волны с полубесконечным облаком химически инертных частиц. При столкновении с облаком происходит торможение потока, формирование ударной волны, распространяющейся вверх по течению. Будет показано, что в зависимости от параметров облака возможно как подавление детонационного процесса, так и непрерывное распространение детонации с более низкими параметрами, чем исходное течение. Отметим, что в реализации того или иного режима распространения при подавлении детонации большую роль играет сила трения между газом и частицами, а, следовательно, площадь поверхности (диаметр) инертных частиц.

Влияние диаметра частиц инертной смеси

Непрерывное распространение детонации. На рис.2 представлены результаты расчетов для варианта течения по облаку инертных частиц относительно большего размера — 10 мкм и объемной концентрации $m_3 = 6 \cdot 10^{-4}$, при котором реализуется непрерывное распространение детонации. Приведены профили давления и температуры газовой фазы на последовательные моменты времени. Видно, что пиковое давление в детонационной волне уменьшается, но волна продолжает распространяться с постоянной скоростью (1270 м/с) с профилем давления, характерным для плоской ДВ.

Срыв детонации. Рассмотрим вариант облака инертной смеси, параметры которого совпадают с исходной смесью: $d_3 = 2$ мкм, $m_3 = 6 \cdot 10^{-4}$ (равное количество инертных

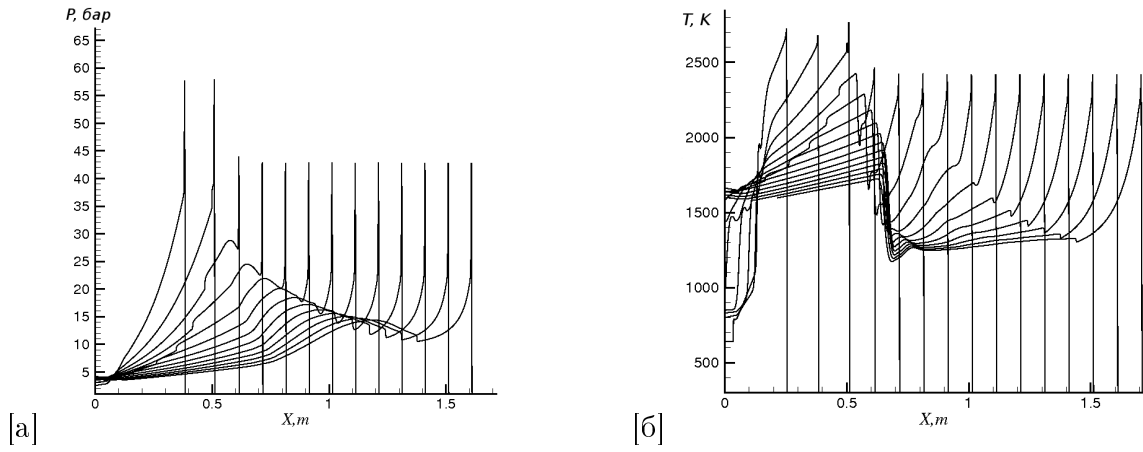


Рис. 2. Взаимодействие плоской детонационной волны с облаком частиц. а) профили давления, шаг по времени 0.08 мс; б) Профили температуры газа; $d_3=10$ мкм, $m_3=6 \cdot 10^{-4}$, $X_{cl}=0.5$ м.

и реагирующих частиц). На рис.3, а, показаны профили давления на последовательные моменты времени. Область, закрашенная серым цветом, показывает первоначальное положение облака инертных частиц. После пика давления при столкновении происходит резкий спад, обусловленный взаимодействием с инертными частицами. Торможение волны, отвод тепла на нагрев более мелких инертных частиц приводит к срыву детонации. По мере распространения волны по облаку скорость его уменьшается: падает от начальных 1550 до 480 м/с на промежутке с момента столкновения с облаком до $x \approx 1.1$ м. Анализ профилей температуры газа показывает (рис.3,б), что взаимодействие с инертными частицами приводит к разрушению детонационной структуры волны: расстояние между ударным фронтом волны и фронтом горения быстро увеличивается.

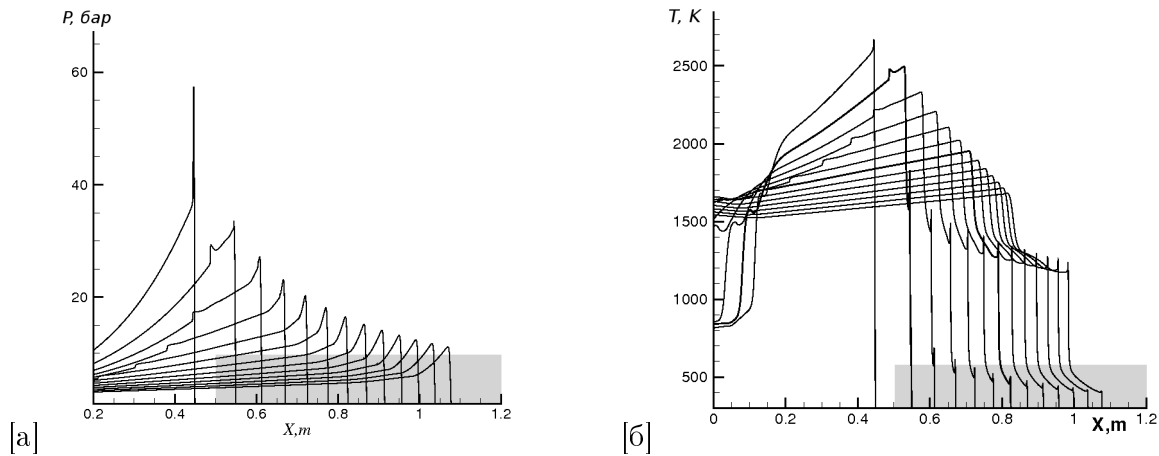


Рис. 3. Взаимодействие плоской детонационной волны с облаком частиц. а) профили давления, б) Профили температуры газа; $d_3=2$ мкм, $m_3=6 \cdot 10^{-4}$, $X_{cl}=0.5$ м.

При прохождении по облаку детонационная волна увлекает за собой инертные частицы. Этот процесс можно проследить на рис.4, где приведены профили плотности инертных частиц на несколько последовательных моментов времени. Сплошной темной линией показан профиль давления на последний момент времени. Начальный профиль

плотности показан штрихпунктирной линией. При столкновении с облаком детонационная волна начинает поджимать облако частиц и сносит его по направлению движения. За фронтом плотность частиц ведет себя немонотонно — формируется второй максимум плотности, хотя гораздо меньший по амплитуде. Со временем поджатие ослабевает и комбинированный разрыв (соответствующий левой границе облака) отстает от ударной волны, второй максимум плотности «размазывается».

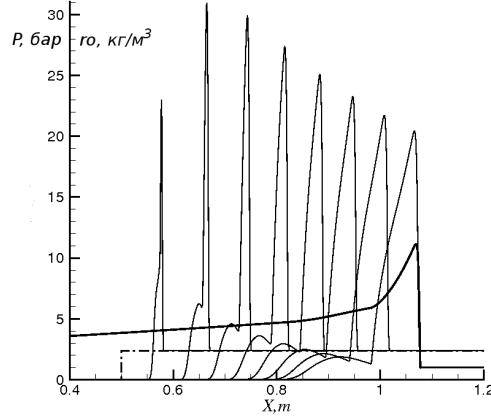


Рис. 4. Кривые серого цвета — профили плотности инертной фазы. Кривая черного цвета — профиль давления на последний момент времени. $d_3=2$ мкм, $m_3=6 \cdot 10^{-4}$, $X_{cl}=0.5$ м.

Влияние объемной концентрации инертных частиц в облаке

На рис.5,а приведены огибающие максимального давления, характеризующие глобальное протекание процесса, для диаметра частиц инертной фазы $d_3=2$ мкм и при варьировании объемной концентрации инертной фазы m_3 от 10^{-5} до $6 \cdot 10^{-4}$. Очевидно, что увеличение объема (массы) частиц в облаке приводит к снижению уровня максимального давления после взаимодействия (кривые 1-3). При этом существует некоторая критическая масса инертных частиц (кривая 4), при которой детонационная волна распространяется неустойчиво некоторое время, а далее происходит срыв. Последующее увеличение инертных частиц в облаке приводит к срыву детонации (кривая 5). На рис. 5,б приведены примеры зависимости дефицита скорости $\eta = D/D_{CJ}$ от объемной концентрации смеси инертных частиц и для диаметров частиц $d=4$ и 10 мкм. Анализ графиков показывает, что увеличение массы и уменьшение диаметра инертных частиц (при равной массе) способствует уменьшению скорости распространения волны в облаке и в конечном итоге к срыву детонационного процесса. Полученные результаты соответствует тенденциям, выявленным при исследованиях подавления газовой детонации инертными добавками [4].

Облако конечной длины

Таким образом, показано, что при взаимодействии волны гетерогенной детонации с полубесконечным облаком инертных частиц возможно как непрерывное распространение детонации, так и срыв в зависимости от объемной концентрации и диаметра инертных частиц в облаке. Следующим вопросом исследования ставилась задача определения

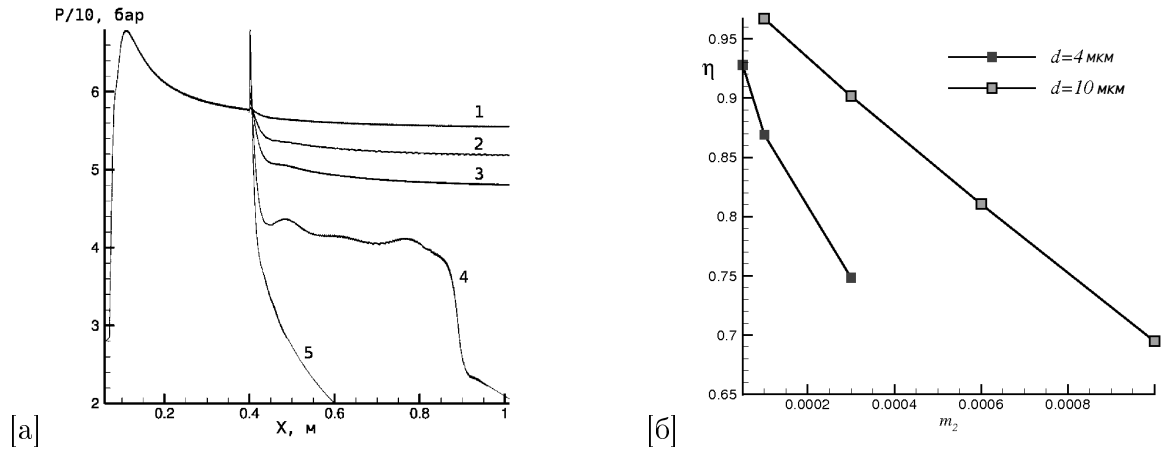


Рис. 5. Влияние объемной концентрации на режим распространения детонации. Огибающие максимального давления (а). $d_3=2$ мкм, m_3 : 10^{-5} (1), $5 \cdot 10^{-5}$ (2), 10^{-4} (3), $3 \cdot 10^{-4}$ (4), $6 \cdot 10^{-4}$ (5). Зависимость дефицита скорости от объемной концентрации инертной фазы для частиц $d=2$ и 4 мкм (б).

критической длины облака, достаточной для подавления детонации. Приведем результаты для инертных смесей, для которых в полубесконечном облаке реализуется срыв детонации. В первом варианте, показанном на рис.6, после выхода из инертного облака не происходит восстановления детонационного процесса. Параметры инертной смеси таковы: $m_3=10^{-3}$, $d=2$ мкм, исходное положение облака от $x=0.5$ до 0.8 м (отмечено серой прямоугольной областью). Приведенные профили плотности инертной фазы (рис.6, а) показывают, что облако сносится вниз по течению. Пиковое значение плотности инертных частиц со временем снижается, облако «размазывается» по пространству. Вследствие этого, волна и после «формального» окончания облака продолжает взаимодействовать с инертными частицами, хотя облако постепенно и отстает от ударного фронта. Анализ распределения давления на последовательные моменты времени (рис.6, б) показывает, что разрушение детонационной структуры продолжается и в итоге волна распространяется в режиме замороженной ударной волны со скоростью 525 м/с ($D/D_{CJ}=0.33$).

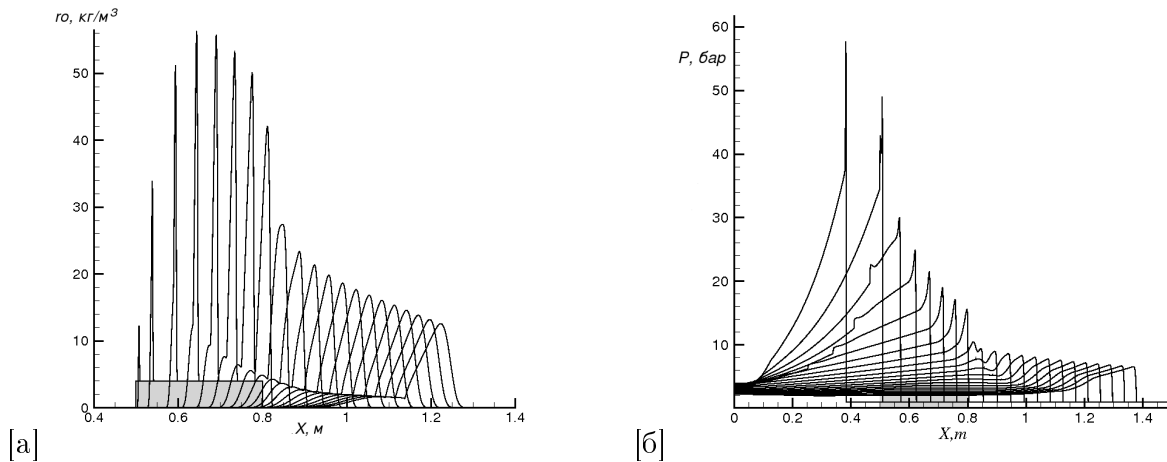


Рис. 6. Срыв детонации при взаимодействии с облаком конечной длины. Профили плотности инертной фазы (а) и давления (б). $m_3=10^{-3}$, $d_3=2$ мкм, $L=0.3$ м.

В случае меньшего содержания частиц в облаке возможно восстановление детонационного процесса (рис.7). Анализ распределения параметров показывает, что взаимодействие с облаком приводит к временному снижению уровня давления и температуры. Скорость волны снижается незначительно, при этом не успевает произойти разделение ударной волны и фронта горения. После выхода волны из облака, детонационная структура волны и ее скорость быстро восстанавливается.

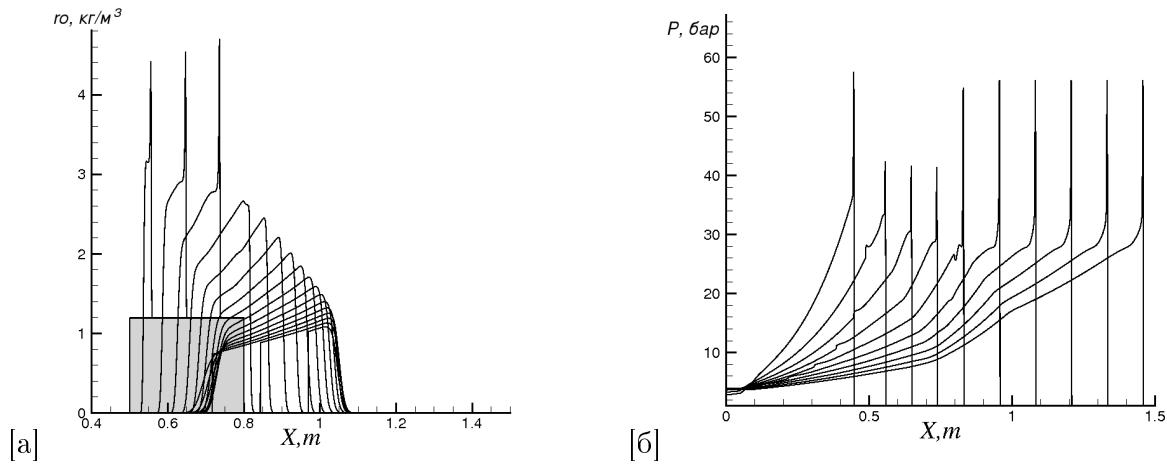


Рис. 7. Восстановление детонации при взаимодействии с облаком конечной длины. Профили плотности инертной фазы (а) и давления (б). $m_3=3 \cdot 10^{-4}$, $d_3=2$ мкм, $L=0.3$ м.

4. Выводы

В рамках трехскоростного трехтемпературного приближения механики реагирующих/инертных гетерогенных сред исследована задача взаимодействия волны гетерогенной детонации, распространяющейся в режиме Чепмена-Жуге, с облаком химически инертных частиц. В случае полубесконечного облака показано существование двух различных режимов в зависимости от содержания частиц в облаке и их диаметра: от непрерывного распространения до срыва детонации. Показано, что существует критическая длина облака инертных частиц, достаточной для подавления детонации.

Список литературы

- [1] Кутушев А. Г., Пичугин О. И. Численное исследование процесса прерывание распространения ДВ в газозвесьях унитарного топлива слоем инертных частиц // Физика горения и взрыва. 1993. N 2 .
- [2] Федоров А. В. Структура гетерогенной детонации частиц алюминия, диспергированных в кислороде // Физика горения и взрыва. 1992. Т. 28. N.3.
- [3] Хмель Т.А. Численное моделирование двумерных детонационных течений в газозвеси реагирующих твердых частиц // Математическое моделирование. 2004. Т.16. N.6.
- [4] Фёдоров А.В., Тропин Д. А., Бедарев И. А. Математическое моделирование подавления детонации водородокислородной смеси инертными частицами // Физика горения и взрыва. 2010. N.3.