
О НЕИДЕАЛЬНОЙ (НИЗКОСКОРОСТНОЙ) ДЕТОНАЦИИ ТВЕРДЫХ ВЗРЫВЧАТЫХ ВЕЩЕСТВ

Б. С. Ермолаев¹

Нет удачного определения неидеальной детонации. Как правило, к неидеально детонирующим взрывчатым веществам (ВВ) относят те материалы, которые демонстрируют сильную зависимость скорости детонации от размеров заряда и свойств оболочки. Однако в основе этих зависимостей лежит скорость химического превращения, и поэтому определение неидеальной детонации должно опираться на зависимость характеристик детонации именно от скорости химического превращения.

Хорошо известные примеры неидеальных свойств детонации — это критический диаметр детонации и зависимость скорости детонации от диаметра заряда. Особый интерес представляют взрывчатые материалы, которые при уменьшении диаметра заряда демонстрируют большой дефицит скорости детонации, составляющий десятки и более процентов. Теоретическая обработка этих данных является

¹Институт химической физики им. Н. Н. Семёнова Российской академии наук, boris.ermolaev@yahoo.com



одним из основных способов получения информации о скоростях химического превращения в детонационной волне. Для такой обработки используется соответствующий газодинамический код, в который нужно ввести уравнение состояния продуктов детонации и формальное уравнение кинетики химического превращения. Большое разнообразие уравнений, используемых разными авторами, и доминирование американского, чрезмерно формализованного, инженерного подхода при написании уравнения кинетики являются минусами современного состояния. Уравнение Ли и Тарвера и их модификации, включающие более дюжины подгоночных коэффициентов [1], обычно применяются для описания конкретного ВВ, но зачастую оказываются непригодными для того же ВВ при изменении плотности или при расширении данных, например при одновременном рассмотрении нормальной и низкоскоростной детонации.

Для низкоскоростной детонации в качестве модели кинетики идеально подходит модель взрывного горения, предложенная в свое время А. Я. Апиным [2]. Для взрывчатых материалов модель дает линейную зависимость скорости реакции от давления. Если на одном графике представить нормальную и низкоскоростную ветви скорости детонации в зависимости от диаметра заряда, можно выделить две ситуации, показанные на рис. 1. На рис. 1, *a* на примере тротила (ТНТ) показана типичная ситуация для бризантных ВВ: низкоскоростная ветвь, которую можно получить лишь при слабом инициировании в определенном диапазоне диаметров заряда, и над ней ветвь нормальной детонации. На рис. 1, *б* на примере нитрата аммония (НА) дана типичная ситуация для слабых ВВ и смесей (например, ТНТ/НА 50/50). Теоретический анализ [4] позволяет воспроизвести график рис. 1, *б*, если принять, что скорость реакции растет линейно с давлением. Чтобы воспроизвести график рис. 1, *a*, зависимость скорости реакции от давления должна содержать два слагаемых: $M = G [P + f(P)^3]$. Слагаемое с показателем степени 1 отвечает за взрывное горение. Слагаемое с показателем 3 доминирует при давлениях выше 2,5–3 ГПа.

Примерно такое же разделение взрывчатых материалов на две группы наблюдается при анализе зависимости критического диаметра или скорости детонации в заряде заданного диаметра от плотности заряда. «Идеальные» материалы дают снижение критического диаметра и рост скорости при увеличении плотности (за исключением участка вблизи TMD (theoretical maximum density)), неидеальные материалы демонстрируют рост критического диаметра и зависимость с максимумом для скорости детонации. Чтобы объяснить неидеальное поведение в зависимости от диаметра заряда и плотности, необходимы неформальные модели химического превращения, учитывающие ключевые свойства зоны реакции детонационной волны, модели такого же уровня, которые разработаны для области ракетных давлений.

Материалы, у которых выделение энергии контролируется смешением реагентов (к примеру, дымный порох, пиротехнические смеси, смеси перхлората и нитрата аммония с горючим), как правило, детонируют в неидеальном режиме. Хотя в области ракетных давлений многие из этих материалов горят с высокой скоростью, слабая зависимость скорости реакции от давления приводит к тому,

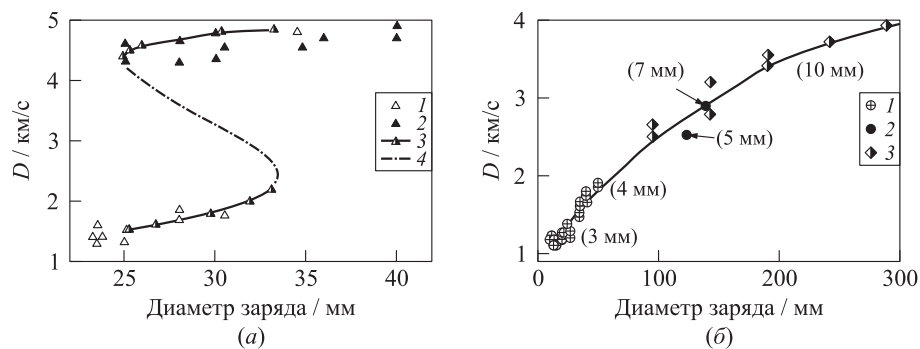


Рис. 1 Зависимость скорости детонации от диаметра заряда: (а) тротил в бумажной оболочке ($\rho_0 = 950 \text{ кг/м}^3$), опыты при ослабленном (1) и нормальном (2) инициировании [3] и расчетная зависимость (3 — стационарный режим; 4 — нестационарный режим); (б) нитрат аммония, пористые гранулы, в стальных трубках (цифры в скобках — толщина стенок): 1 — 690 кг/м^3 ; 2 — 690 ; 3 — 850 кг/м^3

что в детонационной волне скорость реакции оказывается низкой, а размеры зоны реакции большими. Как следствие, скорость детонации дымного пороха, измеренная в опытах, оказалась вдвое ниже величины, полученной в термодинамическом расчете [5]. Аналогичная ситуация наблюдается для пиротехнической смеси на основе перхлората калия [6].

Скорость детонации смесевых композиций на основе перхлората аммония (ПХА) резко снижается при увеличении относительной начальной плотности выше $0,75\text{--}0,8$, и при плотности около $0,85$ приближается к значению $2\text{--}2,2 \text{ км/с}$, измеренному при детонации чистого ПХА [7]. Устойчивый детонационный режим и отсутствие зависимости от диаметра заряда в прочной стальной оболочке получено в диапазоне от 10 до 50 мм . Эти смеси представляют интерес для использования режима низкоскоростной детонации в импульсных метательных устройствах.

Зерна пироксилинового пороха не разрушаются при низкоскоростной детонации благодаря высокой прочности и особенностям пространственной структуры фронта волны, при которой воспламенение зерен происходит по газофазному механизму до начала уплотнения и роста массовой скорости течения к-фазы. Скорость химического превращения, определяемая произведением скорости послойного горения, экстраполированной из области артиллерийских давлений, на удельную поверхность зерен, оказывается очень низкой. Как следствие, для выхода детонации на установившийся режим требуются заряды метровой длины [8].

Горение алюминия в детонационных волнах, несмотря на большое число исследований, остается серьезной проблемой. Как добавка к бризантным ВВ алюминий, скорее всего, горит за пределами зоны реакции детонационной волны. Добавка алюминия к перхлорату или нитрату аммония заметно увеличивает скорость детонации. Теоретическая обработка опытных данных по зависимости скорости

детонации от диаметра заряда для смесей с разным содержанием и размером частиц алюминия могла бы, на первый взгляд, дать надежную информацию о скорости горения алюминия в детонационных волнах. Использовалась модель двухстадийной реакции (разложение окислителя с последующим горением алюминия в продуктах разложения окислителя). Расчеты показали [9], что разложение окислителя ускоряется даже при 2%-ной добавке мелкодисперсного алюминия; как следствие, массив экспериментальных данных не удается обработать с единым набором входных данных по скоростям превращения. И снова для успешного продвижения нужны неформальные модели горения применительно к детонационным волнам.

Литература

1. Уртъев П. А., Тарвер К. М., Грин Л. Р. Низкоскоростной удар и инициирование LX-10 // Хим. физика, 1995. Т. 14. № 12. С. 78.
2. Апин А. Я. О детонации и взрывном горении взрывчатых веществ // Докл. АН СССР, 1945. Т. 50, С. 285.
3. Парфенов А. К., Воскобойников И. М. О малой скорости детонации в порошкообразных ВВ // ФГВ, 1969. Т. 5. С. 347.
4. Ermolaev B. S., Khasainov B. A., Presles H. N. A generalized dependence of detonation velocity on charge diameter including low velocity detonation // Europyro — 34th Pyrotechnical Seminar (International) Proceedings. 2007. Vol. 1. P. 323–337.
5. Ермолаев Б. С., Беляев А. А., Викторов С. Б. и др. Неидеальные режимы дефлаграции и детонации дымного пороха // Хим. физика, 2010. Т. 29. № 5. С. 48–60.
6. Долгобородов А. Ю., Ермолаев Б. С., Шевченко А. А. и др. Горение и детонация механо-активированных смесей алюминия с перхлоратом калия // Хим. физика, 2015 (в печати).
7. Мартынюк В. Ф., Сулимов А. А., Чамров В. А. и др. Структура детонационного фронта смесей окислитель – инертное горючее // Хим. физика, 1983. № 10. С. 1435.
8. Ермолаев Б. С., Мартынюк В. Ф., Беляев А. А., Сулимов А. А. Низкоскоростные режимы детонации зерненого пироксилинового пороха // Хим. физика, 2014. Т. 33. № 6. С. 64.
9. Ермолаев Б. С., Комиссаров П. В., Соколов Г. Н., Борисов А. А. К теории неидеальной стационарной детонации тройных смесей нитрометан + перхлорат аммония + алюминий // Хим. физика, 2012. Т. 31. № 9. С. 55.

