

О НЕКЛАССИЧЕСКИХ РЕЖИМАХ ДЕТОНАЦИИ В НИЗКОПЛОТНЫХ ВВ

А.П. Ершов, А.О. Кашкаров, Э.Р. Прууэл, Н.П. Сатонкина, А.В. Пластинин,
В.В. Сильвестров, А.С. Юношев

*Институт гидродинамики им. М.А. Лаврентьева СО РАН,
630090, Новосибирск, Россия*

Одним из крупных интеллектуальных достижений XX века стала классическая модель детонационного процесса Зельдовича – Неймана – Деринга (ЗНД) [1]. С этой теорией, которая завоевала признание задолго до каких-либо экспериментальных подтверждений, связаны многие успехи в исследованиях детонации, а также в практических применениях взрыва. В большинстве учебников, монографий и энциклопедий детонацию сейчас определяют в рамках модели ЗНД, т.е. детонационная волна понимается как комплекс из ведущей ударной волны, за которой следует зона химической реакции. К последней через звуковую поверхность Чепмена – Жуге примыкает область нестационарного течения – волна Тейлора. Характерной сигнатурой ЗНД-процесса является так называемый химпик – спадающий профиль давления в зоне реакции.

По мере развития экспериментальных методов был получен ряд свидетельств в пользу классической теории. Однако в последние годы формируется понимание ограниченности модели ЗНД для твердых гетерогенных ВВ. Например, А.В. Уткин и др. (ИПХФ РАН) наблюдали детонационные волны с конечным превращением во фронте сжатия, в которых химпик существенно ослаблен или вообще отсутствует. Более того, в ряде случаев в зоне реакции давление не падает, а нарастает. В частности, в пористом ВВ четко зафиксированы недосжатые режимы [2], которые, как известно, не могут распространяться посредством ударной волны [1].

В особенности трудности классической модели проявляются для ВВ низкой плотности. Центральное понятие теории ЗНД – ведущая ударная волна – плохо применимо к процессам, происходящим в порошке, при пористости в десятки процентов. Правильнее говорить о волне сжатия, при одномерном осреднении имеющей ширину порядка размера зерна ВВ. В этих условиях агентом распространения волны, по крайней мере в некоторых системах, могут быть струи горячего газа, прорывающиеся по порам из области высокого давления (концепция взрывного горения А.Я. Апина [3]). Этот механизм установлен для разреженных систем плотности порядка $0,5 \text{ г/см}^3$ и ниже [4,5]. Для ВВ насыпной плотности (около 1 г/см^3) имеются данные А.Н. Дремина и др. [6], в которых не усматривается заметных отклонений от режима ЗНД. Однако эти результаты получены около 50 лет назад, при доступном тогда временном разрешении около 0,1 мкс. Представляет интерес их верификация современными методами. В данной работе проведено исследование структуры детонационных волн в тэне, гексогене и октогене при плотности, близкой к насыпной. Измерения проведены доплеровским методом VISAR, разрешение которого составляет несколько наносекунд. Использовались порошки как штатной дисперсности (сотни мкм), так и мелкодисперсные (десятки мкм).

В мелкодисперсных порошках получены режимы типа ЗНД, но с заметной редукцией химпика, что объясняется частичной реакцией во фронте волны. В крупнодисперсном (160 мкм) гексогене амплитуда химпика выше, чем в том же мелкодисперсном ВВ, на профилях скорости заметны пульсации, по-видимому, отражающие структуру порошка. В крупнодисперсном октогене наблюдались как классический профиль ЗНД, так и про-

филь с резкими колебаниями вокруг уровня, соответствующего состоянию Чепмена – Жуге. Наконец, в наиболее чувствительном ВВ – тэне – профиль скорости также представлял собой «полку» на уровне Чепмена – Жуге с наложением резких колебаний, но более высокой частоты (период порядка нескольких нс).

Авторы полагают, что результаты, в особенности для крупнодисперсного тэна, указывают на возможность струйных режимов. На основании этих данных можно ожидать, что струйные режимы не являются экзотически редкими, и целесообразен их систематический поиск.

Работа выполнена при финансовой поддержке Российского фонда фундаментальных исследований (код проекта 15-03-01039).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Зельдович Я.Б., Компанеев А.С.** Теория детонации. М.: ГИТТЛ, 1955.
2. **Kolesnikov S.A., Utkin, A.V. and Ananin A.V.** Non-classical steady-state detonation regimes in TNETB // 13th International Detonation Symposium. Proc. Norfolk, VA, 2006. P. 422–426.
3. **Апин А.Я.** О детонации и взрывном горении взрывчатых веществ. // Доклады АН СССР. 1945. Т. 147. № 5. С. 1141 – 1143.
4. **Бойко М.М., Крамаренко В.Н., Соловьев В.С.** Особенности детонации низкоплотных ВВ с открытой пористостью // В сб. Детонация. Материалы V Всесоюзного Симпозиума по горению и взрыву. Черноголовка: ОИХФ АН СССР, 1977. С. 58-62.
5. **Пинаев А.В., Лямин Г.А.** Низкоскоростная детонация ВВ в вакуумированной пористой среде // Доклады АН. 1992. Т. 325, №3. С. 498-501.
6. **Дремин А.Н., Савров С.Д., Трофимов В.С., Шведов К.К.** Детонационные волны в конденсированных средах. М.: Наука, 1970.