

## ФИЗИЧЕСКИЕ МЕХАНИЗМЫ ВЫСОКОЭНТАЛЬПИЙНОГО ИНИЦИИРОВАНИЯ

А.П. Ершов, А.О. Кашкаров, Э.Р. Прууэл

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

Традиционно принято выделять два основных способа инициирования детонации вторичных взрывчатых веществ (ВВ). Инициирование ударными волнами – это быстрый (микросекундный) процесс, требующий мощного воздействия на вещество. Таким воздействием может быть, например, взрыв детонатора или удар быстро летящей пластины. Другой полюс – поджигание ВВ, когда после весьма слабого воздействия происходит переход горения в детонацию, естественно, за более длительное время, например, порядка миллисекунд. Между тем заслуживает внимания промежуточный третий вариант, в котором на порошок ВВ воздействует высокоэнтальпийный поток газа с давлением торможения в сотни атм [1 – 3]. При таком инициировании возможно развитие детонации за время порядка 10 мкс, в габаритах стандартного детонатора, причем не требуется прочной оболочки. Процесс начинается со стадии быстрого конвективного горения, причем начальная скорость волны около 1 км/с. Кинетика горения вещества, известная из литературы, не обеспечивает наблюдаемого быстрого развития процесса. Для успешного развития детонации необходимо ускорение примерно на порядок.

В данной работе рассмотрены различные механизмы интенсификации реакции. Результаты расчетов по двухфазной газодинамической модели сравнивались с данными синхротронной диагностики (набором распределений плотности в волне и движением переднего фронта волны). Имеется три возможных механизма, способных в начальной стадии инициирования увеличить скорость брутто-реакции:

- Дробление частиц ВВ, как при компактировании порошка, так и при воздействии на зерна ВВ аэродинамической нагрузки фильтрующегося через поры потока. В отличие от последующих механизмов, эффект достигается благодаря росту поверхности контакта фаз, без ускорения реакции на поверхности. Для учета эффекта дробления использовались данные [4].
- Форсирование горения ВВ за счет теплового потока из газовой фазы, который может заметно превышать поток при обычных условиях горения. Применительно к ракетным двигателям этот эффект называют эрозионным горением. Тепловой поток к твердой фазе и влияние вдува продуктов горения учитывались согласно известной корреляция Кутателадзе – Леонтьева [5].
- Сдвиговая неустойчивость испаряющейся границы зерен ВВ, приводящая к отрыву и быстрому сгоранию микроскопических объемов газа [3]. Этот механизм, по предложению Л.А. Лукьянчикова, будем называть абляционным.

Из-за сложности процесса заранее не ясно, каким механизмам следует отдать предпочтение. Поэтому отбор вероятных механизмов проводился путем сравнения расчетных результатов с данными эксперимента. Хотя в начальном состоянии все упомянутые механизмы могут обеспечить требуемое ускорение реакции, каждый из них приводит к своей динамике волны.

Расчеты показали, что каждый из рассмотренных отдельных механизмов интенсификации горения сам по себе не описывает результаты эксперимента. Из возможных комбинаций наиболее близкое согласие дал одновременный учет абляции и дробления. Расчетные профили плотности близки к экспериментальным. Удовлетворительно вос-

производится кинематика фронта волны. В целом получено приемлемое согласие расчетов с экспериментом.

Таким образом, наиболее убедительное объяснение быстрого перехода горения в детонацию при высокоэнтальпийном инициировании – включение двух процессов, ускоряющих реакцию: абляции (быстрого горения при срыве испаряющегося слоя на поверхности частиц за счет сдвиговой неустойчивости) и дробления частиц (в том числе из-за аэродинамических нагрузок), увеличивающего удельную поверхность порошка.

Авторы считают своим долгом отметить, что работа в данном направлении была начата по инициативе профессора Л.А. Лукьянчикова (1936–2013). Изложенные результаты проясняют природу процесса, который Леонид Александрович исследовал более 50 лет.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Беляев А.Ф., Садовский М.А., Тамм И.И.** Применение закона подобия при взрывах к явлению передачи детонации // Журнал прикладной механики и технической физики. 1960. № 1. С. 3–17.
2. **Андреев В.В., Ершов А.П., Лукьянчиков Л.А.** Двухфазная низкоскоростная детонация пористого ВВ // Физика горения и взрыва. 1984. Т. 20, № 3. С. 89–93. Theoretical Foundations of Fogging due to Vapor Condensation, Moscow: Khimia, 1966.
3. **Ершов А.П., Кашкаров А.О., Лукьянчиков Л.А., Прууэл Э.Р.** Инициирование детонации пористого ВВ высокоэнтальпийным потоком газа // Физика горения и взрыва. 2013. Т. 49, № 1. С. 91–105.
4. **Беляев А.Ф., Боболев В.К., Коротков А.И., Сулимов А.А., Чуйко С.В.** Переход горения конденсированных систем во взрыв. М: Наука, 1973.
5. **Кутателадзе С.С., Леонтьев А.И.** Тепло-массообмен и трение в турбулентном пограничном слое. М.: Энергия, 1972.