

ПУЛЬСАЦИОННЫЙ РЕЖИМ ГОРЕНИЯ АЗИДОЭТАНОЛА

А. К. Копейка

Институт горения и нетрадиционных технологий Одесского государственного университета,
270100 Одесса, Украина

Обнаружен пульсационный режим при горении азидоэтанола в нетермостатируемых трубках из стекла. Получены зависимости скорости горения азидоэтанола от внешнего давления. Характерной особенностью этой зависимости является наличие скачка скорости при переходе нормального горения в пульсационный режим. Определены периоды пульсаций скорости горения азидоэтанола при различных значениях внешнего давления. Дано качественное объяснение наблюдаемому явлению.

Для всех ранее изученных жидких взрывчатых веществ (ВВ) отмечается, что нормальное горение при повышении внешнего давления переходит в пульсационный режим. При этом для различных ВВ в зависимости от величины давления, при котором осуществляется смена режимов, происходит либо потухание, либо турбулизация горения [1].

В случае горения азидоэтанола (АЭ) в трубках из стекла переход нормального горения в пульсационный режим был обнаружен при понижении внешнего давления. Такая последовательность в смене режимов горения для других органических азидов [2] и некоторых ВВ [3] в подобных условиях ранее не наблюдалась. В работе [4] были определены предельные условия перехода нормального горения в пульсационный режим, но сам режим не исследовался.

В настоящей работе приведены результаты экспериментальных исследований пульсационного горения АЭ, влияния внешнего давления на скорость горения и период пульсаций. Опыты проводили при давлениях ниже атмосферного в воздушной среде по методике, изложенной в [4].

В ходе экспериментов установлена следующая картина горения АЭ: при давлении, близком к атмосферному, АЭ горел в турбулентном режиме; по мере уменьшения внешнего давления турбулентное горение сменялось нормальным, которое затем переходило в пульсационное. При дальнейшем снижении давления горение достигало естественного предела и прекращалось.

Визуальные наблюдения и киносъемка показали, что горение АЭ в пульсационном режиме, в отличие от нормального горения, про-

текало с закипанием поверхностного слоя ВВ, после которого следовало резкое увеличение скорости горения — вспышка. Это увеличение скорости сопровождалось искривлением поверхности фронта горения и звуковым эффектом (хлопок). Перед вспышкой видимый фронт пламени практически останавливался, а граница раздела фаз продолжала перемещаться вдоль трубки. По-видимому, в данном случае происходило накопление продуктов испарения АЭ. Это значит, что скорость испарения АЭ при определенных условиях может превышать скорость химической реакции разложения паров ВВ. После вспышки горение не прекращалось, но скорость его была существенно меньше. Промежутки времени с относительно малой линейной скоростью горения чередуются с интервалами, когда скорость горения рез-

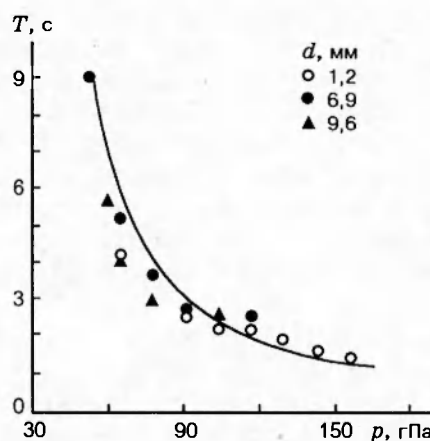


Рис. 1. Зависимость периода пульсаций скорости горения азидоэтанола от внешнего давления для трубок различного диаметра

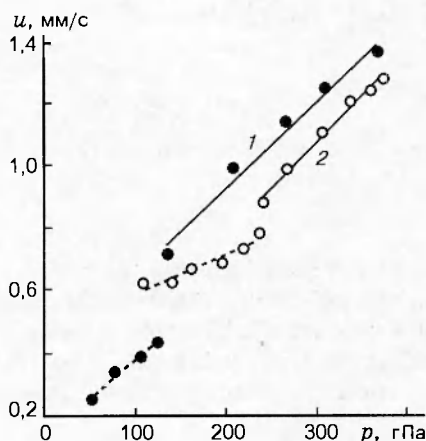


Рис. 2. Зависимость скорости горения азидоэтанола от внешнего давления:

$d = 6,2$ (1), $1,2$ мм (2), штриховая линия — пульсационное горение

ко увеличивается. Пульсации скорости горения регулярно повторяются с периодом $1 \div 9$ с и имеют четко выраженный релаксационный характер. Из зависимости периода пульсаций от внешнего давления видно (рис. 1), что с понижением давления период пульсаций увеличивается.

Влияние внешнего давления на скорость горения АЭ исследовали для трубок различного диаметра. На рис. 2 представлены экспериментальные зависимости скорости горения от давления для двух значений диаметра трубок. Как и для других ВВ, скорость горения АЭ линейно увеличивается с ростом давления. Но в пульсационном режиме, особенно при малых значениях диаметра трубок, эта зависимость слабее, чем в случае нормального горения. При переходе горения из нормального режима в пульсационный наблюдается скачок скорости, и чем больше диаметр трубки, тем резче падает скорость. Интересно отметить, что если в нормальном режиме скорость горения увеличивается с ростом диаметра трубки, то в пульсационном она, напротив, уменьшается.

Переход нормального горения в пульсационный режим при горении АЭ в трубках из стекла можно объяснить прогревом конденсированной фазы АЭ теплом, передающимся по стенкам впереди фронта горения [4]. Эффективность этого прогрева тем выше, чем меньше скорость горения [1]. Поэтому переход нормального горения в пульсационный режим на-

блюдается именно с понижением внешнего давления. Кроме того, с понижением давления температура кипения АЭ уменьшается. Все это способствует тому, что при определенном значении давления становится возможным закипание слоя жидкого АЭ конечной толщины. Увеличение (вследствие закипания) площади, с которой происходит испарение, вызывает, в свою очередь, рост поверхности фронта горения. Скорость горения увеличивается до критического значения, при котором происходит нарушение устойчивости горения по механизму обратной связи, предложенному в работе [5]. Оценки критической скорости в случае горения АЭ подтверждают возможность применения такого подхода для объяснения нарушения устойчивости его горения. Критическое значение скорости стационарного горения ВВ можно рассчитать по формуле

$$u_{кр} = \frac{\sqrt{p_0 \rho'}}{\rho},$$

где p_0 — внешнее давление, ρ' — плотность продуктов горения, ρ — плотность конденсированной фазы АЭ. Эта формула получена из уравнения для массового потока продуктов разложения, отходящих от фронта горения ВВ, с учетом критического условия $p = 2p_0$ [5]. Как следует из данных расчета, в случае горения АЭ значение $u_{кр}$ должно находиться в интервале $0,9 \div 3$ см/с в зависимости от величины внешнего давления ($50 \div 200$ гПа). Анализ кинограмм процесса горения АЭ в пульсационном режиме позволил оценить скорость горения АЭ. Она резко увеличивалась после закипания и достигала в момент пульсаций значений ≥ 2 см/с. Однако неограниченному росту скорости горения препятствует тепловая инерционность конденсированной фазы АЭ. Поскольку характерное время прогрева конденсированной фазы ($a/u^2 \approx 0,2$ с, где a — температуропроводность, u — линейная скорость горения АЭ) больше времени сгорания кипящего слоя АЭ ($\approx 1 \cdot 10^{-2}$ с), определенного из эксперимента, для образования нового кипящего слоя потребуется время, в течение которого АЭ будет гореть относительно медленно. Наличие такого сдерживающего фактора, как тепловая инерционность конденсированной фазы АЭ, обуславливает существование колебаний скорости горения и их релаксационный характер.

Таким образом, проведенные исследования показали, что в определенных условиях возмо-

жен переход нормального горения АЭ в пульсационный режим, который не является переходным режимом между областями нормального и турбулентного горения. Качественный анализ наблюдаемого явления позволяет сделать вывод, что причина нарушения устойчивости горения в данном случае имеет не гидродинамическую, а тепловую природу.

ЛИТЕРАТУРА

1. **Андреев К. К.** Термическое разложение и горение взрывчатых веществ. М.: Наука, 1966.
2. **Кожух М. С., Сергеев В. В.** Предельные условия горения некоторых органических азидов // Физика горения и взрыва. 1977. Т. 13, № 5. С. 690–697.
3. **Марголин А. Д., Маргулис В. М., Похил П. Ф.** Влияние теплопроводящих стенок на гидродинамическую устойчивость горения жидких ВВ // Физика горения и взрыва. 1968. Т. 4, № 3. С. 426–428.
4. **Копейка А. К., Головкин В. В., Золотко А. Н., Канашин С. П.** Предельные условия горения β -азидоэтанола в нетермостатируемых трубках // Физика горения и взрыва. 1996. Т. 32, № 4. С. 25–31.
5. **Беляев А. Ф.** К вопросу об условиях стационарного режима горения взрывчатых веществ // Докл. АН СССР. 1940. Т. 28. С. 715.

*Поступила в редакцию 23/IX 1997 г.,
в окончательном варианте — 6/X 1997 г.*