

А. А. Борисов, О. В. Шарыпов

## К ВОПРОСУ О МЕХАНИЗМЕ ВОЗНИКНОВЕНИЯ СПОНТАННЫХ ВЗРЫВНЫХ ПРОЦЕССОВ

Изучение процессов в химически неравновесных газовых системах в режиме самовоспламенения (или в условиях, близких к этому режиму) обнаруживает ряд характерных закономерностей, касающихся механизма спонтанного взрывного инициирования горючей смеси. В частности, в [1] при исследовании самопроизвольного зарождения детонации (по градиентному механизму) показано, что оно имеет место лишь для определенного диапазона размеров очага воспламенения (локальной неоднородности температуры или состава, т. е. тем самым — периода индукции реагирующей смеси). При этом конечное возмущение однородного состояния считается заданным и, как правило, связывается с внешними воздействиями. Цель данной статьи — описание механизма спонтанной генерации макронеоднородностей в результате усиления определенной части спектра бесконечно малых возмущений (микроскопических флуктуаций) в однородной неравновесной системе.

В [2] впервые приведена модель эволюции длинноволновых возмущений малой, но конечной амплитуды в реагирующих средах. В [3] аналогичным методом получено эволюционное уравнение, справедливое для широкого спектра длин волн в одно- и в двухфазных системах с произвольной одноступенчатой реакцией. В случае химически неравновесной газовой смеси оно имеет вид

$$\left[ N - \frac{\delta}{\partial y} \right] \left\{ 2 \frac{\partial u}{\partial t} - v \frac{\partial^2 u}{\partial y^2} + \frac{\partial u^2}{\partial y} \right\} - \delta \frac{\partial u}{\partial y} = o(\varepsilon^2), \quad (1)$$

где  $u(t, y)$  — возмущение массовой скорости (давления или плотности) среды;  $t$  — время;  $y$  — пространственная координата;  $v$  — динамическая вязкость (в общем случае — эффективный коэффициент диссипации энергии возмущений);  $\delta$  и  $N$  связаны с законом кинетики конкретной химической реакции;  $\varepsilon$  — малый параметр. Уравнение (1) записано в сопровождающей системе координат (для волн, бегущих в одном направлении) с точностью до членов второго порядка малости включительно; при выводе используются предположения о малости: а) амплитуды возмущения  $\left( u, \frac{\partial u}{\partial y}, \frac{\partial^2 u}{\partial y^2} \sim \varepsilon \right)$ ; б) изменения профиля возмущения при прохождении расстояния порядка длины волны  $\left( \frac{\partial u}{\partial t} \sim \varepsilon^2, v \sim \varepsilon \right)$ ; в) дисперсии скорости звука и неравновесности реакции ( $|\delta| \sim \varepsilon, N \sim \varepsilon^0$ ).

Все величины в уравнении (1) безразмерны с помощью комбинаций параметров  $C_t, \tau, \rho_0$  («замороженная» скорость звука, характерное время химического процесса и невозмущенная плотность среды). Согласно (1), в случае преобладания накачки энергии длинноволновых ( $\lambda > \lambda^*$ ) бесконечно малых возмущений (за счет тепловыделения реакции) над диссипацией будет иметь место их экспоненциальное усиление [3]; возмущения с  $\lambda < \lambda^*$  будут затухать (в соответствии с результатами [1]).

Численное моделирование решения уравнения (1) для однородного тривиального начального условия с «шумом» демонстрирует формирование егладенной пилообразной структуры, имеющей определенную длину волны ( $\approx \sqrt{2\lambda^*}$ ) и представляющей собой последовательность слабых ударных волн, форсирующих реакцию. Учитывая существование аналогичного решения, распространяющегося во встречном направлении,

можно ожидать, что столкновения ударных волн приведут к формированию очагов интенсивного тепловыделения. Другими словами, в системе самопроизвольно возникнут макронеоднородности температуры (периода индукции), которые могут привести при определенных условиях к спонтанному взрывному (детонационному) режиму.

Заметим, что критическая длина волны неустойчивых возмущений  $\lambda^* \sim \tau$ , т. е. существует достаточно большое значение  $\tau$ , при котором исходное однородное состояние системы, занимающей ограниченную область, является устойчивым. В этом случае реакция произойдет за время порядка  $\tau$ , и процесс не будет спонтанно ускоряться за счет перехода к взрывному режиму.

Благодаря случайному характеру бесконечно малых возмущений, их стохастичности как в пространстве, так и во времени, изложенный детерминированный подход, строго говоря, нуждается в синтезировании с вероятностным описанием возникновения зародышей самовоспламенения [4]. Стохастический механизм может играть существенную роль, если интенсивность и спектр внешних и внутренних флуктуаций (шумов) таковы, что реакция системы на них сравнима с ее фактическим отклонением от однородного состояния.

В [1] отмечено, что критическая энергия спонтанного инициирования детонации  $E_c$  (в системах вблизи порога самовоспламенения) оказывается на несколько порядков меньше обычных значений критической энергии ударного инициирования, например зарядом конденсированного ВВ. При этом под критической энергией инициирования здесь понимается избыточная внутренняя энергия системы с заданной температурной неоднородностью по сравнению с энергией однородно нагретой среды.

Приведенное в настоящей работе описание механизма самопроизвольного возникновения макронеоднородностей позволяет предположить, что значение  $E_c$ , понимаемое в смысле [1], может быть еще ниже (ниже значения, полученного в [1]) ввиду отсутствия принципиальной необходимости искусственного создания макроскопического очага воспламенения и в идеале асимптотически стремиться к нулю. Это не противоречило бы никаким фундаментальным принципам, а лишь подчеркивало бы узко прикладной (зависящий от конкретного способа инициирования) характер величины  $E_c$ .

Авторы признательны профессору В. В. Митрофанову за полезное обсуждение при подготовке рукописи. Работа проводилась при поддержке международного фонда Дж. Сороса «Культурная инициатива».

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Фролов С. М. Эффекты неидеальности при зарождении и распространении взрыва: Дис. ... д-ра физ.-мат. наук.— М., 1992.— 393 с.
2. Борисов А. А. Длинноволновые возмущения в реагирующих средах // Исследования по гидродинамике и теплообмену: Сб. науч. статей.— Новосибирск, 1976.— С. 94—95.
3. Борисов А. А., Шарыпов О. В. О формировании волны пузырьковой детонации // Изв. СО АН СССР. Сер. техн. наук.— 1990.— Вып. 2.— С. 50—59.
4. Федотов С. И. Флуктуации и автоколебания в химически реагирующих системах: Дис. ... д-ра физ.-мат. наук.— Екатеринбург, 1933.— 207 с.

г. Новосибирск

Поступила в редакцию 9/III 1993