

КРАТКИЕ СООБЩЕНИЯ

К ИССЛЕДОВАНИЮ
СТАТИСТИЧЕСКОЙ ПРИРОДЫ ЗАЖИГАНИЯ
ГЕТЕРОГЕННОЙ СМЕСИ
ИМПУЛЬСНЫМ СВЕТОВЫМ ИЗЛУЧЕНИЕМ

Л. М. Видавский, С. П. Розов, И. И. Короткевич
(Москва)

В работе [1] показано, что характер критических условий зажигания световым излучением в импульсном режиме для ряда реакций СВС может изменяться в зависимости от тепловыделения. Для сильноэкзотермических реакций имеется резко выраженный порог зажигания: значение критической энергии воспроизводится в узких пределах (2—3%). При сравнительно небольшой экзотермичности воспроизводимость ухудшается, что не удается объяснить только погрешностью измерений. В этом случае на существенно большем отрезке $[E_1, E_r]$ расположены значения энергии E_i ($1 \leq i \leq r$), при которых результат воздействия на мишень не однозначен. В то же время вне отрезка однозначность результата воздействия соблюдается: отсутствие зажигания при $E < E_1$, зажигание при $E > E_r$. Поэтому можно предположить, что зажигание реакции световым импульсом — это случайное событие, вероятность (p) которого изменяется от 0 до 1 на отрезке $[E_1, E_r]$. В настоящей работе на примере модельной реакции экспериментально изучена связь между зажиганием и энергией воздействующего импульса E .

Выбор модельной реакции в рамках данной задачи должен отвечать двум требованиям: не слишком высокий уровень энергии E_r , чтобы не превышались экспериментальные возможности источника световых импульсов, и достаточная протяженность отрезка $\Delta E = E_r - E_1$ для проведения серии наблюдений с энергиями $E_1, \dots, E_i, \dots, E_r$. Поскольку с уменьшением экзотермичности реакции одновременно возрастают значения ΔE и E_r , таким противоречивым требованиям не соответствует какая-либо конкретная реакция. В связи с этим в качестве модельной выбрана реакция образования диборида титана из порошков простых веществ, имеющая низкий уровень E_r и небольшое значение ΔE . С целью увеличения ΔE искусственно понижалось удельное тепловыделение реакции введением в реакционную смесь инертной добавки (диборид титана). Оптимальное количество добавки выбиралось на основании предварительных опытов, в которых находились оценочные значения \bar{E}_r и $\bar{\Delta E}$ в зависимости от мольного состава смеси, характеризуемого величиной $x = \text{TiB}_2 / (\text{Ti} + 2\text{B})$. Ниже приведены экспериментальные результаты по оценке зависимостей $\bar{\Delta E} = \bar{\Delta E}(x)$ и $\bar{E}_r = \bar{E}_r(x)$.

x	0,0	0,2	0,4	0,5
$\bar{\Delta E}$, Дж	0,5	3,2	3,9	3
\bar{E}_r , Дж	4,4	11	41	52

E , Дж	n	m	$h=m/n$	p	E , Дж	n	m	$h=m/n$	p
8,47	26	1	0,038	0,074	12,8	31	25	0,81	0,76
9,54	51	10	0,19	0,18					
10,6	38	12	0,32	0,36	13,8	31	25	0,81	0,90
11,7	50	32	0,64	0,57	14,9	11	11	1,00	0,96

Видно, что при $x > 0,2$ существенно возрастает уровень \bar{E}_r , а величина $\Delta \bar{E}$ увеличивается незначительно. Поэтому в качестве модельного выбран процесс $Ti + 2B + 0,2TiB_2 = 1,2TiB_2$.

Из смеси порошков компонентов готовились таблетки-мишени квадратного сечения (площадь 1 см^2 , высота $0,2-0,4 \text{ см}$, плотность $2,35 \pm \pm 0,08 \text{ г/см}^3$). Зажигание мишеней и измерения энергии проводились по методике [1]. В эксперименте наблюдалась частота зажигания световым импульсом, значение энергии которого (E) фиксировалось с точностью $\pm 0,05$ Дж. Соответствующие средние значения энергии E и частоты зажигания приведены в таблице, где n — число опытов, m — число зажиганий при данном значении E . В случае модельной реакции частота зажигания изменяется практически от 0 до 1, если энергия импульса возрастает от $E_i = 8,47$ до $E_r = 14,9$ Дж. Подобная зависимость («кривая эффекта» по терминологии [2]) связывает вероятность случайного события (зажигания) с неслучайной величиной — энергией импульса. Представляет интерес найти аналитическое выражение для «кривой эффекта» по эмпирическим данным $h = h(E)$.

Для этого следует выбрать один из видов сглаживающей функции, приемлемость которой проверяется посредством статистического критерия согласия. В данном случае в качестве сглаживающей рассматривается интегральная функция Гаусса

$$p(E) = (\sigma \sqrt{2\pi})^{-1} \int_{-\infty}^E \exp \left[-\frac{(t - \mu)^2}{2\sigma^2} \right] dt,$$

где t — переменная интегрирования. Параметры μ и σ определяются методом наибольшего правдоподобия. В силу того, что вероятность зажигания при фиксированном значении энергии подчиняется биномиальному закону распределения [2], функция правдоподобия может быть записана в следующем виде:

$$L = \prod_{i=1}^r p_i^{m_i} (1 - p_i)^{(n-m)_i},$$

где p_i — значение гауссовой функции при энергии E_i . Для нахождения максимума L удобнее использовать логарифмическую функцию правдоподобия, максимум которой можно найти методом крутого восхождения [3] с применением ЭВМ; оценки дают значения $\mu = 11,33$, $\sigma = 1,976$. Вычисленные значения вероятности p приведены в таблице.

Согласованность сглаживающей функции с эмпирической проверяется посредством критерия χ^2 (обоснование см. в [2])

$$\chi^2 = \sum_{i=1}^r (m_i - n_i p_i)^2 (n_i p_i - n_i p_i^2)^{-1}.$$

Найденное значение $\chi^2 = 5,54$ близко к $f = 5$, где $f = (r - 2)$ — число степеней свободы. Это свидетельствует о хорошем (с точки зрения критерия χ^2) согласии между сглаживающей функцией и эмпирической зависимостью.

Проведенный эксперимент показал, что вероятность зажигания зависит от энергии инициирующего импульса, причем зависимость можно описать интегральной кривой Гаусса. Предположительно такую зависимость можно связать со следующими причинами: неоднородность свойств мишени, возникающая в результате прессования; кинетические затруднения реакции при переходе из жидкого очага [1] в зону горения (с участием твердой фазы); разрыв сплошности среды, который может возникнуть в мишени за счет термических напряжений. Полученные результаты позволяют подобрать соответствующую теоретическую модель процесса зажигания.

Авторы выражают благодарность А. Н. Корнилову за полезное обсуждение и помощь в статистической обработке результатов.

Поступила в редакцию
9/VII 1980

ЛИТЕРАТУРА

1. И. И. Короткевич, Г. В. Хильченко и др. ФГВ, 1981, 17, 5.
2. Б. Л. Ван дер Варден. Математическая статистика. М.: ИЛ, 1960.
3. И. П. Ашмарин, Н. Н. Васильев, В. А. Амбросов. Быстрые методы статической обработки и планирования экспериментов. Л.: Изд-во ЛГУ, 1971.

ИССЛЕДОВАНИЕ ЗАКОНОМЕРНОСТИ ГОРЕНИЯ ТРОЙНЫХ СМЕСЕЙ ГОРЮЧЕЕ — ВОЗДУХ — РАЗБАВИТЕЛЬ В ОКРЕСТНОСТИ ТОЧКИ ФЛЕГМАТИЗАЦИИ

*Ю. Н. Шебеко, А. Я. Корольченко, А. В. Иванов
(Балашиха)*

Зависимость концентрационных пределов распространения пламени от содержания разбавителя в горючей смеси представляет собой характерную кривую, ограничивающую некоторую область, называемую областью воспламенения [1]. Точка, в которой смыкаются верхняя и нижняя ветви кривой флегматизации, называется точкой флегматизации. За исключением некоторых веществ (например, водорода, метана), точка флегматизации для большинства органических соединений соответствует богатым смесям. Насколько известно авторам, детального объяснения этого эффекта не найдено.

Исследования закономерностей горения тройных смесей горючее — воздух — разбавитель в окрестности точки флегматизации проведены в [2, 3]. В работе [2] найдено, что при разбавлении горючих смесей органических веществ азотом, двуокисью углерода и водяным паром адиабатическая температура горения в точках флегматизации приблизительно постоянна и $\approx 1400\text{—}1450\text{ К}$. Важная закономерность обнаружена в работе [3], где показано, что для тройных смесей *n*-алканы (*n*-спирты) — воздух — азот точкам флегматизации приблизительно соответствуют смеси, стехиометрические по отношению к сгоранию до CO и H₂O, а величина адиабатической температуры горения $T_{ад}^{CO}$ при сгорании до CO и H₂O в этих точках заключена в пределах 1300—1400 К.

Настоящая работа посвящена проверке закономерностей, найденных в [3], для более широкого круга органических горючих веществ и флегматизаторов. Концентрация горючего в смеси, стехиометрической по