

СПИНОВЫЙ РЕЖИМ ГОРЕНИЯ БЕНГАЛЬСКОЙ СВЕЧИ

Спиновый режим горения — интересное, уникальное явление, обнаруженное недавно [1—4]. В этом режиме химическая реакция локализуется в сравнительно небольшом объеме — «голове» спина, вращающемся по спирали вокруг оси цилиндрического образца горючего вещества. Направление движения (левостороннее, правостороннее) зависит от условий зажигания. Ранее спиновое горение наблюдалось для ряда процессов самораспространяющегося высокотемпературного синтеза и некоторых термитных систем. Ниже сообщается о спиновом распространении экзотермической реакции в пространстве при горении хорошо известного пиротехнического изделия — бенгальской свечи. Авторам не известны работы, в которых был бы описан данный режим горения бенгальской свечи.

Свеча представляет собой отрезок железной проволоки с равномерно нанесенным пиротехническим составом. Типичные рецептуры составов и процедура изготовления приведены в [5, 6]. Использовались коммерческие и собственного изготовления свечи. Диаметр проволоки коммерческой свечи 1,3 мм, толщина нанесенного слоя $\Delta \approx 1,35$ мм. Длина проволоки l с нанесенным слоем в среднем равна 120 мм.

При зажигании такой свечи возбуждался спиновый режим горения. Одноголовый спин распространялся в течение всего процесса горения. Но в некоторых случаях очаг погасал, видимо, из-за неоднородности состава или толщины пиротехнического слоя, но затем реиницировался через короткий промежуток времени (менее 1 с). После прохождения волны горения на сгоревшей свече видны характерные волнистые следы вихревого движения головы спина. Продольная скорость горения свечи (вдоль оси образца) $U = l/t \approx 2$ мм/с. Частота вращения очага горения для коммерческих свечей составляла $\nu \approx 1$ с⁻¹. Круговая скорость движения головы спина, если ее отнести к диаметру середины толщины слоя, $U_s \approx \pi d \nu = 8,4$ мм/с, т. е. $U_s/U \approx 4$. Среднее число оборотов равно 60, шаг спирали (расстояние по образующей между точками прохождения двух ближайших очагов) составляет 2 мм. Светящийся очаг горения имел диаметр ~ 1 мм, что соответствует толщине нанесенного слоя и шагу спирали.

Эксперименты со свечами собственного изготовления по методике [5] (массовый состав, %: нитрат бария — 52, алюминиевая пудра — 6, порошок железа — 30, декстрин — 12; диаметр частиц не больше 100 мкм) показали, что при $\Delta = 1,5$ мм спиновый режим распространения экзотермической реакции переходит в стационарное горение вдоль оси проволоки с кольцевым фронтом пламени. При $\Delta \leq 0,5$ мм наблюдается срыв горения. Спиновый режим горения существует в диапазоне $\Delta = 0,5 \div 1,5$ мм. Отметим, что увеличение доли алюминия в составе ведет к более интенсивному горению и сужению области существования спинового горения.

Ниже приведены исследовавшиеся ранее реакционные системы [1—4, 7, 8], геометрия использовавшихся образцов и полученные характеристики спинового горения.

1. Реакционные системы: а) горение Ti, Hf, Zr в атмосфере азота; б) Ti + Al, Ti + (FeV), Ti + V, Ti + C, Hf + V, Ti + V + Fe, Ti + V + Al, Ti + V + Cu, TiO₂ + Al + C; в) термитные смеси Fe — Zr, Cr — Zr; г) бенгальские свечи (настоящая работа).

2. Геометрия образцов: а) цилиндрические образцы; б) горючий состав, нанесенный на металлический отрезок проволоки (настоящая работа).

3. Диаметр образца 5—30 мм; толщина нанесенного слоя (наст. работа) 0,5—1,5 мм.
4. Частота вращения 0,1—2 с⁻¹.
5. Линейная скорость горения $U = 1 \div 10$ мм/с.
6. Круговая скорость движения головы спина (3—15) U .
7. Шаг спирали 0,5—2,5 мм.

Видно, что характеристики горения бенгальской свечи близки к характеристикам спинового горения в других системах. Области значенных параметров, в которых наблюдается данный режим, сравнительно узки.

Кратко механизм спинового горения бенгальской свечи сводится к следующему. В обычных системах при уменьшении скорости тепловыделения в волне горения за счет снижения скорости химической реакции или увеличения теплотерь фронтальное горение прекращается. Наступает предел распространения горения. Однако в некоторых условиях горение может продолжаться, если существует механизм рекуперации тепла, т. е. эффективный возврат тепла из области продуктов горения к исходному веществу. Такой механизм рекуперации реализуется при спиновом горении бенгальской свечи.

Тепло из твердофазных продуктов горения поступает в исходное вещество не только обычным путем — тепловым потоком по вектору распространения очага горения, но и в поперечном направлении, параллельном оси образца (продукты горения → исходное вещество) или опосредованно через металлическую проволоку (продукты горения → проволока → исходное вещество). Коэффициент температуропроводности железной проволоки в 10—100 раз больше коэффициента температуропроводности пиротехнического состава. Время прогрева исходного вещества оказывается зависимым от периода вращения головы спина, т. е. от диаметра спирали, по которой он движется. Из-за поперечной (относительно вектора U_s) рекуперации тепла максимальная температура в голове спина выше термодинамической (равновесной) температуры горения. Это приводит к спиральному движению очага горения по протретому слою, созданному предыдущим витком.

В заключение отметим следующее. Ранее переход от стационарного распространения волны горения к спиновому режиму осуществлялся путем изменения состава смеси, давления или температуры [2, 4, 7]. В настоящей работе переход осуществлялся изменением размерных характеристик системы — вариацией толщины нанесенного слоя. Новизна заключается также в том, что в отличие от исследованных однородных цилиндрических образцов бенгальская свеча — это гетерогенная система (горючее вещество — проволока).

ЛИТЕРАТУРА

1. Мержанов А. Г., Филоненко А. К., Боровинская И. П. Новые явления при горении конденсированных систем // Докл. АН СССР.— 1973.— 208, № 4.— С. 892—894.
2. Филоненко А. К. Нестационарные явления при горении гетерогенных систем, образующих тугоплавкие продукты // Процессы горения в химической технологии и металлургии.— Черноголовка: ОИХФ АН СССР, 1975.— С. 258—273.
3. Margolis S. B. The transition to nonsteady deflagration in gasless combustion // Prog. Energy Combust. Sci.— 1991.— 17, N 2.— P. 135—162.
4. Merzhanov A. G., Khaikin B. I. Theory of combustion waves in homogeneous media // Ibid.— 1988.— 14.— P. 1—98.
5. Солодовников В. М. Пиротехника.— М.; Л.: Оборонгиз, 1938.
6. Weingart G. W. Pyrotechnics.— Brooklyn; N. Y.: Chem. Publ. Co., 1947.
7. Филоненко А. К. Спиновое горение титана при пониженном давлении // ФГВ.— 1991.— 27, № 6.— С. 41—45.
8. Струнина А. Г., Дворянкин А. В., Мержанов А. Г. Неустойчивые режимы горения термитных систем // ФГВ.— 1983.— 19, № 2.— С. 30—36.

г. Новосибирск

Поступила в редакцию 7/XII 1992