

3. E. K. Campbell, J. F. Davidson. Fluids. Combust. Int. Conf. London, 1975, A2/1 — A2/3.
4. Т. В. Виленский, Д. М. Хзмалян. Динамика горения пылевидного топлива. М.: Энергия, 1978.
5. А. П. Баскаков, В. М. Супрун. Химическое и нефтяное машиностроение, 1971, 3.

УДК 662.581 : 536.46

УСТОЙЧИВОСТЬ ГОРЕНИЯ СОСТАВНЫХ МЕТАЛЛИЗИРОВАННЫХ ОБРАЗЦОВ

В. Н. Симоненко, В. Е. Зарко, А. Б. Кискин, В. Д. Гладун,
Л. Я. Кашипов, Н. А. Силин

(Новосибирск)

Вопросы изучения горения составных образцов впервые, вероятно, были поставлены в работе К. К. Андреева [1]. В этой и последующих публикациях [2, 3] изучалось горение гомогенных порохов. Известны также результаты исследования нестационарного горения безгазовых систем [4]. Настоящая работа посвящена экспериментальному определению устойчивости переходных процессов при горении составных гетерогенных образцов: двойных смесей типа окислитель — металл. Такого рода задачи возникают при рассмотрении горения последовательных запрессовок гетерогенных составов, склеенных зарядов и в других приложениях.

Эксперименты проводились с цилиндрическими образцами диаметром 10 и длиной 4 мм, спрессованными под давлением 5000 кгс/см². Зажигание образцов производилось мощным световым потоком от ксеноновой лампы ДКсР-10 000. Для повышения воспроизводимости зажигания и улучшения однородности образцов во все составы сверх 100% были введены сажа 1% и идитол 2%. Подготовка образцов к экспериментам включала тщательное броширование плотно прижатых друг к другу с помощью специальных тисочков спрессованных таблеток исследуемых составов. Для этой цели боковую поверхность образцов последовательно обмазывали слоями линолуна и эпоксидной смолы с наполнителем из окиси магния.

Во время горения составных образцов регистрировались сигналы реактивной силы продуктов сгорания по методике [2], а также записывались сигналы фотодиодов, фиксирующих интенсивность свечения пламени. По изменениям амплитуд сигналов во времени производились классификация и количественная оценка параметров переходных процессов. Качество контакта составных образцов проверялось в опытах по горению таблеток идентичного состава. Во всех испытаниях такого рода переходы осуществлялись без заметных задержек и изменений амплитуд сигналов реактивной силы.

Характеристики переходных режимов горения

Вид перехода	1К/2К	4К/3К	2К/3К	2К/5К	3К/1К	3К/2К	6М/6	7/3	1/3	2/5	6/4	3/1	7/3
$\Phi_{1,2}$	0,7	1,5	1,8	1,3	0,8	0,6	2,9	2,6	1,1	0,9	0,6	0,9	5,3
$\Delta H_{1,2}$	1,7	1,1	0,8	1,2	0,8	1,3	0,3	0,2	1,3	1,5	0,9	0,8	0,1
$t_{п}, c$	0	0	0,1	0,03	0,3	0,3	1	∞	0	0	0,1	0,1	∞
$P, атм$	1	1	1	1	1	1	1	1	10	10	10	10	10

Примечание. 1. Образцы 1, 2, 3 — смеси Mg + NaNO₃, избыток окислителя 0,5; 1; 3 соответственно. 2. Образцы 4, 5, 6 — смеси Mg + Ba(NO₃)₂, избыток окислителя 0,5; 1; 3 соответственно. 3. Образец 7 — перхлорат аммония + салициловая кислота (стехиометрическая смесь). 4. Индекс К — частицы Mg диаметром $d < 200$ мкм, индекс М — частицы (Mg $d < 40$ мкм), без индекса — смесь (50/50) частиц Mg ($d < 100$ и 200 мкм).

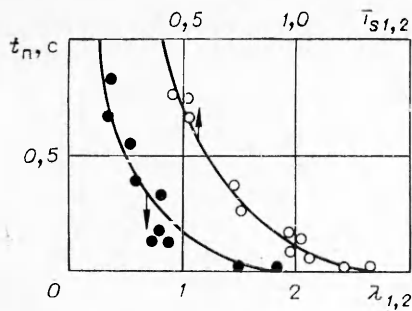


Рис. 1. Время переходного режима горения в зависимости от отношений коэффициентов теплопроводности образцов и температур горячей поверхности.

На рис. 1 показаны отдельные результаты измерений. Из представленных графиков следует, что время переходного процесса (t_n), отсчитываемое от момента начала заметного отклонения (не менее, чем на 5%) сигнала реактивной силы от стационарного уровня, соответствующего горению воспламенителя, до момента установления (с точностью до 5%) стационарного уровня поджигаемой системы, уменьшается с ростом отношений $T_{s1}/T_{s2} = T_{s1,2}$ и $\lambda_1/\lambda_2 = \lambda_{1,2}$. Здесь индекс 1 присвоен воспламенителю, индекс 2 — поджигаемой системе. Часть экспериментальных результатов представлена в таблице. В нее также включены значения отношения избытков энтальпий $\Delta H_{1,2}$ и поверхностных градиентов температур $\varphi_{1,2}$ для стационарных режимов горения, рассчитанные по формулам: $\Delta H = \lambda(T_s - T_0)/u$, $\varphi = \text{ср}(T_s - T_0)/\lambda$. Здесь ср — средняя объемная теплоемкость образца исследуемого состава.

Анализ экспериментальных данных на основе представлений феноменологической теории нестационарного горения Зельдовича — Новожилова показывает, что устойчивость и время переходного процесса должны зависеть от соотношения текущих значений T_s , φ и запаса тепла в прогретом слое ΔH . Конкретный характер поведения горячей системы во времени будет определяться чувствительностью скорости горения к изменению температуры поверхности и начальной температуры T_0 , т. е. видом функций $u(T_s)$ и $u(T_0)$.

Аналитического решения такой нелинейной многопараметрической задачи не существует, поэтому необходимо использовать численные методы. Здесь возникают дополнительные трудности, обусловленные отсутствием развитой теории горения металлизированных систем.

В настоящее время в рамках феноменологического подхода удается сформулировать лишь задачу о горении составных образцов гомогенных топлив с различающимися теплофизическими и теплокинетическими параметрами. В такой постановке не удается отразить особенности реагирования металлического компонента и гетерогенную природу образца, тем не менее результаты решения дают полезную информацию о качественных закономерностях поведения скорости горения при переходе через границу контакта двух составов.

Отличие теплофизических параметров воспламенителя и поджигаемой системы обуславливает возмущение температурного профиля вблизи поверхности контакта и изменения скорости горения. В частности, при $\lambda_1/\lambda_2 < 1$ скорость горения воспламенителя уменьшается, и при достаточно малых значениях $\lambda_{1,2}$ происходит погасание воспламенителя на границе раздела составов. В противоположном случае, при $\lambda_{1,2} > 1$, скорость

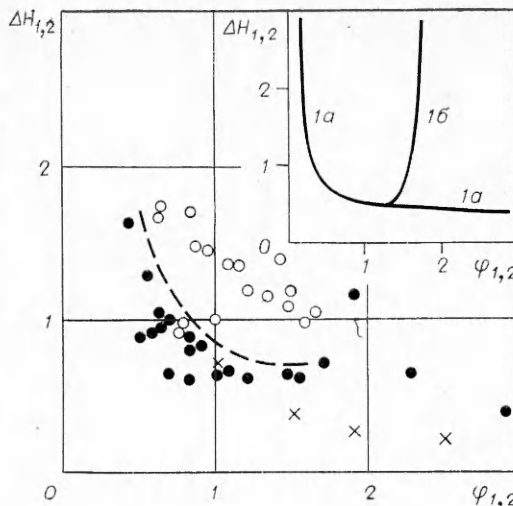


Рис. 2. Карта устойчивости переходных режимов горения.

1а и б — расчетные кривые; эксперимент: O — время переходного режима горения меньше времени релаксации теплового слоя ($t_{\text{рел}}$), ● — время переходного режима горения больше $t_{\text{рел}}$, X — погасание.

горения воспламенителя при подходе к границе раздела увеличивается, запас тепла в системе понижается, и погасание может наступить после перехода фронта через поверхность контакта, т. е. в процессе нестационарного горения поджигаемой системы. Исходя из соображений физической наглядности и общности результатов, представляется целесообразным построить карту устойчивости в координатах $\varphi_{1,2}$, $\Delta H_{1,2}$. В них граница устойчивости переходного процесса горения составного образца изображается линией, состоящей из двух ветвей (см. рис. 2, отрезки *1a* и *1б*). Левая ветвь соответствует погасанию воспламенителя, правая — погасанию поджигаемой системы. Во внутренней области значений $\varphi_{1,2}$ и $\Delta H_{1,2}$ переходы всегда устойчивы, во внешней — реализуется погасание. Положение ветвей зависит от значений кинетических параметров. Так, при уменьшении энергии активации в законе пиролиза $u \sim \exp(-E/2RT_s)$ или коэффициента температурной чувствительности $\beta = \frac{\partial \ln u}{\partial T_0}$ происходит расширение областей устойчивого горения воспламенителя и поджигаемой системы.

На рис. 2 (точки) по экспериментальным данным, включая данные таблицы, построена аналогичная карта устойчивости горения исследованных металлизированных составов. Можно отметить неплохое качественное соответствие расположения экспериментальных и теоретических кривых, особенно при малых (≤ 2) значениях параметра $\varphi_{1,2}$. В области $\varphi_{1,2} > 2$ и $\Delta H_{1,2} > 1$ экспериментальные точки при горении исследованных составов получить не удалось.

В настоящей работе изложены впервые полученные результаты по систематическому исследованию переходных процессов горения составных металлизированных образцов. Очевидно, требуется продолжить изучение физической картины явления нестационарного горения с привлечением методов динамической регистрации скорости горения и визуализации процессов на реагирующей поверхности. Необходимо также совершенствовать теоретическое описание явления с целью учета агломерации и воспламенения частиц металла, физической и химической неоднородности поверхности горения. Решение этих задач должно привести к созданию теоретических основ целевого подбора составов для воспламенения заданных конденсированных веществ.

ЛИТЕРАТУРА

1. Н. К. Андреев, И. Д. Костин. Докл. АН СССР, 1946, 54, 3.
2. В. Н. Симоненко, В. Е. Зарко, А. Б. Кискин. Исследование нестационарных режимов горения баллистических порохов. Препринт № 10. Новосибирск, 1980.
3. В. Н. Маршаков, О. И. Лейпунский. — В кн.: Горение конденсированных и гетерогенных систем. Черноголовка, 1980.
4. А. Г. Струнина, Т. М. Мартемьянова, В. В. Барзыкин и др. ФГВ, 1974, 10, 4.

УДК 662.612.5

ОБРАЗОВАНИЕ ТОКСИЧНЫХ И КАНЦЕРОГЕННЫХ ВЕЩЕСТВ В ПРОЦЕССЕ СГОРАНИЯ СЛАНЦЕВ И СЛАНЦЕВОГО МАСЛА

А. А. Отс, Д. М. Егоров, Ю. М. Лоосаар
(Таллин)

Из разных видов горючих сланцев в качестве энергетического топлива наиболее широко применяется эстонский горючий сланец — кукерсит, сжигаемый в виде пыли. В настоящее время создана также мощная установка с твердым теплоносителем для получения сланцевого масла УТТ-3000 с целью его энергетического и технологического использования.