

ГОРЕНИЕ БЕЗГАЗОВЫХ СИСТЕМ ПРИ КРИОГЕННЫХ ТЕМПЕРАТУРАХ

*А. Г. Струнина, Э. А. Бугакова, Л. К. Демидова,
В. В. Барзыкин
(Черноголовка)*

Исследование закономерностей горения безгазовых систем при изменении начальной температуры T_0 в криогенной области, изучение влияния T_0 на закономерности переходных режимов горения составных зарядов¹ представляет интерес в связи с расширением круга практических задач, связанных, в частности, с освоением космического пространства. Теоретический анализ влияния T_0 на горение порохов (в рамках определенных предположений) впервые проведен в работах [1, 2]. Исследованы предельные условия горения при понижении T_0 . Показана возможность существования некоторой критической начальной температуры, ниже которой стационарное горение невозможно.

Известные в литературе экспериментальные работы, посвященные изучению закономерностей горения при криогенных температурах, выполнены в основном на газовых системах [3, 4] либо на порохах [5, 6], в то время как безгазовые системы не рассматривались. Закономерности переходных процессов горения составных зарядов при изменении T_0 не изучены.

В данной работе представлены экспериментальные данные, полученные на термитных системах при снижении T_0 вплоть до затухания горения, и результаты численного счета по влиянию T_0 на закономерности переходных процессов горения безгазовых систем.

Эксперимент проводился по следующей схеме. Реакционный столбик с исследуемым и контрольным образцами помещался в фарфоровый сосуд, вдоль внутренних стен которого располагались витки змеевика с циркулирующим по нему хладагентом (этиловым спиртом), поступающим из термостата с охлаждающей баней, в которую помещался сухой лед или жидкий азот. Начальная температура образца регистрировалась на потенциометре типа КСП по показаниям термопары. Средняя скорость горения исследуемого образца определялась по регистрограмме осциллографа Н-105, фиксирующего перегорание проволочек или показания вольфрам-рениевых термопар, впрессованных в исследуемый образец на разной высоте. Визуальные наблюдения велись через прозрачную крышку. Для достижения температур ниже температуры замерзания хладагента (380 К) на дно фарфорового сосуда заливался жидкий азот.

Исходная смесь и готовилась и запрессовывалась по методике [7]. Исследуемый образец воспламеняли тепловым потоком от горящего порошка циркония, определенная навеска которого помещалась на верхний торец цилиндрического образца. Оценка степени отклонения температуры образца от начальной под влиянием теплового потока воспламенителя показала, что за время горения термита (высота цилиндрической таблетки 1 см) незначительно (меньше, чем на 10% относительно начальной) успевает прогреться лишь тонкий (~0,5 мм) слой таблетки, контактирующий с воспламенителем.

В качестве исходных выбраны хромово- и железо-циркониевые термиты, характеристики горения которых при комнатной температуре изучены в [8, 9]. Для реализации критических T_0 , ниже которых исследуемая система не горит, использовали значительное разбавление исходных компонентов продуктами реакции, существенно снижая экзотермичность процесса. Независимо от характера горения (стационарный, пульсирующий, очаговый [10]) за скорость горения брали среднюю скорость перемещения фронта горения вдоль оси цилиндрического образца.

¹ В составном запрессованном заряде каждый предыдущий по ходу перемещения фронта горения является воспламенителем для последующего.

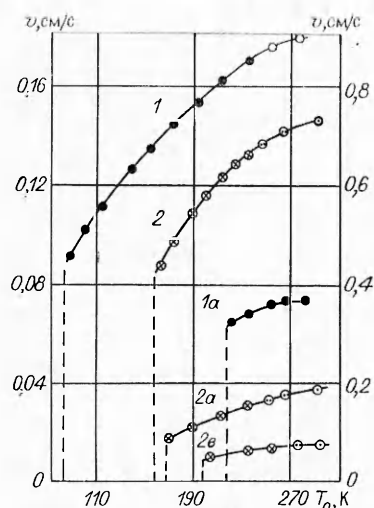


Рис. 1. Зависимость средней скорости горения железо-циркониевого (○ — автоколебательное, ● — очаговое горение) и хромово-циркониевого (⊙ — устойчивое, ⊚ — автоколебательное, ⊗ — очаговое) термитов от начальной температуры.

Количество инертной добавки сверх 100%: 1 — 150, 1а — 186, 2 — 60, 2а — 40, 2в — 0.

ных штриховыми вертикальными прямыми. При температурах ниже критической система оказывается не способной к самоподдерживающемуся горению и, даже если инициирование произошло, затухает на какой-либо высоте образца.

Зависимость $v(T_0)$ можно охарактеризовать коэффициентом $\beta = \frac{(\ln v_2) - (\ln v_1)}{T_2 - T_1}$ по аналогии с температурным коэффициентом скорости горения в области стационарных режимов.

Зависимость $\beta(T_0)$ для всех исследованных термитных систем приведена на рис. 2. Коэффициент β возрастает по мере снижения T_0 , причем более существенно для разбавленных составов в области очагового режима горения². Этот эффект, связанный, по-видимому, с тем, что термитные системы в области низких температур горят в существенно нестационарном режиме, необходимо учитывать при практическом их использовании.

Визуальные наблюдения в процессе горения и анализ следов на сгоревших образцах [12] позволили выделить области различных режимов горения. Каждая из представленных на рис. 3 кривых является границей между реализуемыми областями горения исследуемых систем (m — процент разбавления исходных компонентов продуктами реакции). Кривая 1 разграничивает область стационарного I и пульсирующего горения II, кривые 2, 2а разграничивают области II и очагового горения III, кривые 3 и 3а предельные. В областях IV горение не реализуется. Анализ результатов, представленных на рис. 3, показывает, что диапазон T_0 , при которых горение проходит в очаговом режиме, значительно шире, чем в пульсирующем.

Величины критических начальных температур $T_{кр}$ для исследованных систем представлены на рис. 4. Значения T_r получены при комнатной температуре с помощью вольфрам-рениевой термопары по методике [13]. С уменьшением калорийности системы (снижение T_r) зависимость $T_{кр}(T_r)$ усиливается. Для менее калорийного железо-циркониевого тер-

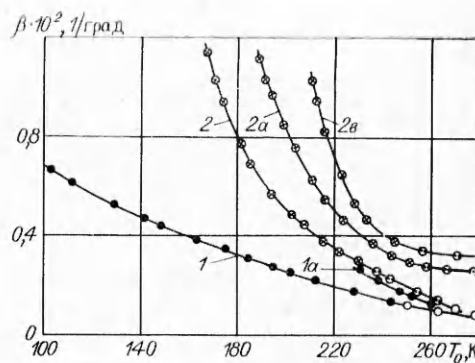


Рис. 2. Зависимость коэффициента β от начальной температуры (обозначения аналогичны рис. 1).

На рис. 1 представлены значения средних скоростей горения при различной начальной температуре. Хромово-циркониевому термиту отвечает ось скоростей, расположенная справа, а железо-циркониевому — слева. Общим для изученных термитных составов является падение v по мере снижения T_0 вплоть до некоторых критических значений, отмечен-

² Температурный коэффициент скорости горения газифицирующихся систем в области устойчивых режимов возрастает с увеличением T_0 [6, 11].

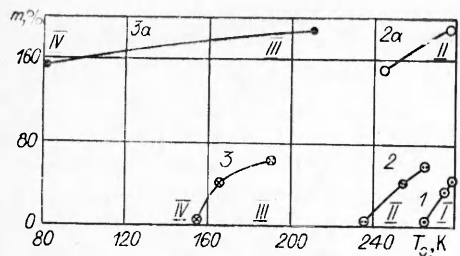


Рис. 3. Области реализации различных режимов горения (обозначения аналогичны рис. 1).

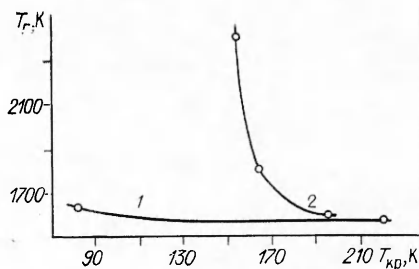


Рис. 4. Зависимость $T_{кр}(T_r)$.
1 — железо-циркониевый термит; 2 — хромово-циркониевый.

мита незначительное изменение T_r ведет к существенному изменению $T_{кр}$.
Задача о перемещении фронта горения по составному заряду, где каждый предыдущий по ходу движения фронта выступает в роли воспламенителя для последующего, математически сформулирована в [14]. Анализ результатов численного счета в области устойчивого горения позволил выделить два основных режима инициирования — индукционный и сжигания, различающиеся соотношением временных характеристик процесса (время задержки зажигания t_1 , время выхода на установившееся горение поджигаемой системы t_2) и характером изменения нестационарной скорости горения в переходный период. В [15—17] численным счетом и экспериментально изучено влияние различных параметров на закономерности переходного периода. Ниже представлены результаты теоретического исследования влияния T_0 . В последующем предполагается провести и экспериментальные исследования.

Скорость перемещения фронта горения по воспламенителю (область отрицательных x) и поджигаемой системе (область положительных x), согласно результатам численного счета задачи [14], представлена на рис. 5. Здесь v' — адиабатическая скорость горения поджигаемой системы при комнатной начальной температуре; x' — ширина ее прогреваемого слоя. Снижение начальной температуры ведет, как видим, к росту амплитуды колебаний нестационарной скорости горения в переходном периоде и затягиванию всего процесса установления стационарного горения поджигаемой системы в обоих режимах инициирования. Аналогично развитию переходного процесса при комнатной температуре [17] горение составного заряда в области криогенных начальных температур при индукционном режиме отличается более вялым характером (более длительный переходный период).

Изменение временных характеристик процесса с изменением начальной температуры представлено на рис. 6, где t' — время сгорания

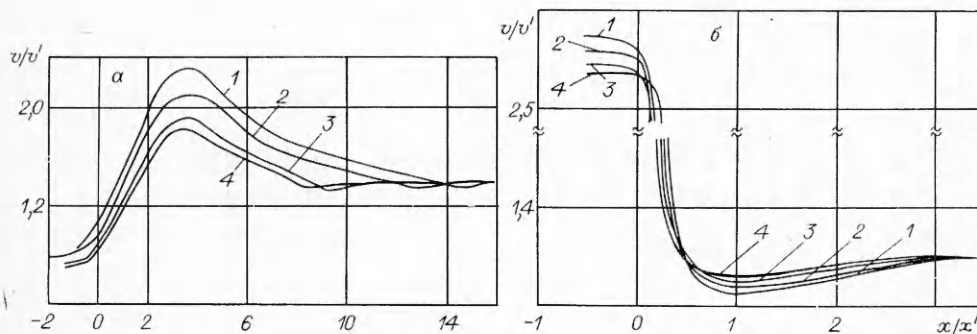


Рис. 5. Изменение с координатой нестационарной скорости горения в индукционном режиме инициирования при различных начальных температурах; $E = 0.3 \times 10^6$ кал/моль, $k_0 = 0.1 \cdot 10^6$ 1/с, $a = \lambda/c\rho = 1.33 \cdot 10^{-3}$ см²/с, Q (при $x < 0$) = 1300 кал/см³, Q (при $x > 0$) = 2000 кал/см³.

T_0 , К: а) 1 — 170, 2 — 200, 3 — 310, 4 — 390; б) 1 — 150, 2 — 200, 3 — 290, 4 — 350.

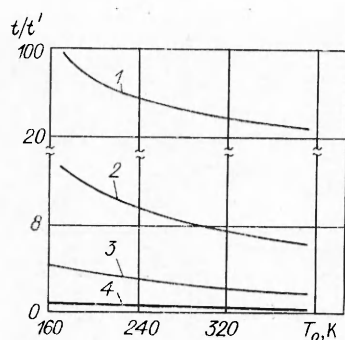


Рис. 6. Временные характеристики переходного процесса горения при индукционном режиме иницирования (1, 2) и режиме сжигания (3, 4). 1, 4 — время задержки; 2, 3 — время выхода на установившееся горение.

прогретого слоя поджигаемой системы в адиабатических условиях при комнатной температуре. Времена зажигания и выхода на установившееся горение в обоих режимах иницирования по мере снижения T_0 возрастают, причем в области криогенных температур более значительно. При любом T_0 время задержки зажигания при индукционном режиме оказывается значительно больше времени выхода на установившееся горение, а при режиме сжигания существенно меньше. Разница между характерными временами по мере снижения начальной температуры возрастает.

В заключение следует отметить, что экспериментально на модельных системах удалось определить критические начальные температуры, ниже которых сильно разбавленные термитные системы не горят. В процессе исследования проанализирована смена режимов горения по мере снижения T_0 . Теоретическое изучение влияния начальной криогенной температуры на закономерности переходных режимов горения составных зарядов показало, что уменьшение T_0 ведет к росту амплитуды колебаний нестационарной скорости горения в переходном периоде и затягиванию всего процесса установления стационарного горения поджигаемой системы.

ЛИТЕРАТУРА

1. Зельдович Я. Б. ЖЭТФ, 1942, 12, 498.
2. Зельдович Я. Б. ПМТФ, 1964, 3, 126.
3. Кондриков Б. Н. ФГВ, 1969, 5, 1, 51.
4. Глазкова А. П., Зенин А. А., Балесин А. А. Archiwun procesow spalania, 1970, 262.
5. Зенин А. А., Лейбуцкий О. И., Марголин А. Д. и др. Докл. АН СССР, 1966, 169, 3, 619.
6. Зенин А. А., Нефедова О. И. ФГВ, 1967, 3, 1, 45.
7. Ермаков В. И., Струнина А. Г., Барзыкин В. В. ФГВ, 1978, 14, 4, 211.
8. Дворянкин А. В., Струнина А. Г., Мержанов А. Г. ФГВ, 1982, 18, 2, 10.
9. Дворянкин А. В., Струнина А. Г., Мержанов А. Г. ФГВ, 1985, 21, 4, 44.
10. Струнина А. Г., Дворянкин А. В., Мержанов А. Г. ФГВ, 1983, 19, 2, 30.
11. Похил П. Ф., Нефедова О. И. Докл. АН СССР, 1959, 129, 3, 635.
12. Струнина А. Г., Дворянкин А. В. Докл. АН СССР, 1981, 260, 5, 1185.
13. Маслов В. М., Боровническая И. П., Мержанов А. Г. ФГВ, 1976, 12, 5, 703.
14. Струнина А. Г., Мартемьянова В. Т., Барзыкин В. В. и др. ФГВ, 1974, 10, 4, 518.
15. Струнина А. Г., Ермаков В. И., Барзыкин В. В. ФГВ, 1978, 14, 4, 42.
16. Ермаков В. И., Струнина А. Г., Барзыкин В. В. ФГВ, 1978, 14, 6, 36.
17. Струнина А. Г., Ермаков В. И., Аверсон Э. А. ФГВ, 1979, 15, 4, 78.

Поступила в редакцию 22/V 1986

МЕХАНИЗМ САМООЧИСТКИ ОТ ПРИМЕСНОГО КИСЛОРОДА ПРИ ГОРЕНИИ СМЕСИ ПОРОШКОВ МОЛИБДЕНА И БОРА

В. Н. Блошенко, В. А. Бокый, А. Г. Мержанов
(Черноголовка)

В работе [1] с целью изучения механизма самоочистки от примесного кислорода при получении тугоплавких соединений методом самораспространяющегося высокотемпературного синтеза исследовано изменение состояния примесного кислорода в исходной шихте при вакуумном отжиге