

А. В. Дворянкин, А. Г. Струнина

К ВОПРОСУ О НЕСТАЦИОНАРНОМ ГОРЕНИИ ТЕРМИТНЫХ СИСТЕМ

На модели термитных систем, разбавленных продуктами реакции, исследован в динамике процесс нестационарного горения по сечению цилиндрического образца. Обнаружен спиновый режим пульсирующего горения. Приведены экспериментальные факты, подтверждающие его реализацию.

Многообразие видов нестационарного распространения фронта реакции, обнаруженных при изучении горения негазифицирующихся и гибридных систем, посвящены экспериментальные [1—12] и теоретические [13—24] работы. В них рассмотрены условия возникновения неоднородных режимов распространения волн горения, их устойчивость, влияние различных факторов на закономерности неустойчивого горения. На данном этапе исследования можно заключить, что все известные до сих пор нестационарные режимы могут реализоваться на одних и тех же системах при варьировании их параметров либо при изменении начальных и граничных условий процесса. Последовательность смены режимов горения проанализирована в [6—9]. Обнаружено, что различные процессы легко поддаются перестройке вблизи границы их устойчивости. Показана возможность управления процессом перестройки.

Обычно при экспериментальном изучении различных режимов о характере горения судят по внешним (видимым на горящей поверхности образца) проявлениям нестационарных эффектов, не учитывая особенности распространения фронта реакции внутри образца. Такой подход достаточно корректен при синфазном перемещении всех точек фронта, имеющем место в случае стационарных и пульсирующих режимов. Вопрос о развитии процесса по сечению образца при неоднородных режимах типа многоточечного (хаотическое появление множества светящихся точек во фронте горения), спинового (вращение светящейся точки по спиралевидной траектории опоясывающей горящий цилиндрический образец), уголкового (упорядоченное движение очагов реакции по поверхности образца прямоугольной формы) и др. остается в основном открытым. Некоторая информация получена анализом следов на шлифах сгоревших образцов [5] и с помощью термопарных измерений в центре и у поверхности образца, горящего в спиновом режиме [8]. Показано, что при спиновом горении негазифицирующихся систем, в отличие от гибридных [1—3], процесс идет не только на поверхности, но и в объеме образца.

Настоящая работа направлена на изучение динамики процесса неоднородного горения по сечению образца и вопросов перестройки различных режимов. Рассматривались термитные составы, инициируемые тепловой волной горящего воспламенителя. Процесс фиксировали кинокамерой «Конвас» и фоторегистратором ФР-11 и анализировали по следам на сгоревших образцах. Временные изменения температуры в волне горения для неоднородных режимов регистрировали вольфрамрениевыми термопарами (обычные и дифференциальные), которые располагали по центру образца на разной высоте.

Кинокадры процессов неоднородного горения термитных систем, стехиометрический состав которых разбавлен продуктами реакции, представлены на рис. 1. Развитие уголкового горения образцов прямоугольной формы изучено в работе [10]. Фотографии образцов, сгоревших в различных режимах, даны на рис. 2 и в работе [6]. Фоторегистрации следов фронта при неоднородных процессах приведены ранее [9, 12]. Дополнив кино- и фотоматериалы рис. 1, 2 показаниями вольфрамрениевых термопар, можно получить картину развития процесса горения в объеме. Показания термопар, зафиксированные на ленте шлейфового

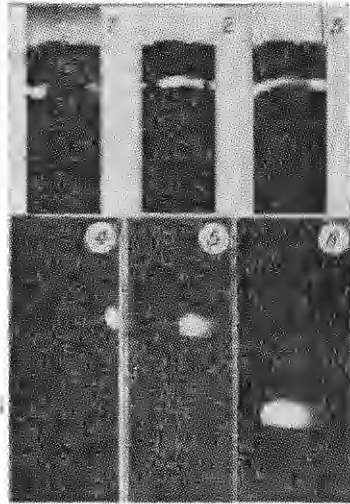


Рис. 1. Горение цилиндрических образцов железозиркониевого термита 60- (1-3) и 72%-го разбавления (4-6) (1-3 — многоточечный режим, 4-6 — спиновый).

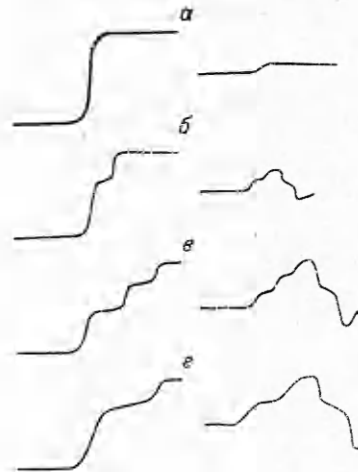


Рис. 3. Термограммы различных режимов горения железозиркониевого термита.

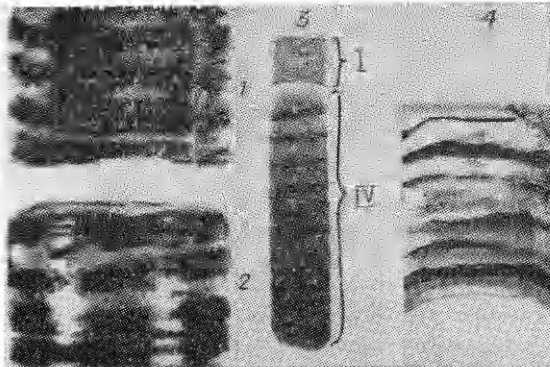


Рис. 2. Образцы железозиркониевого термита (60- и 72%-го разбавления), сгоревшие в различных режимах.

1, 2 — труба (внешний диаметр 25, внутренний 15 мм); 3 — сплошной цилиндр (диаметр 3 мм); 4 — образец с прямоугольным сечением.

осциллографа (в левой части рисунка — обычных, в правой — дифференциальных) при различных режимах горения железозиркониевого термита, спрессованного в цилиндрические образцы ($d = 10$ мм), представлены на рис. 3.

Каждая пара кривых отвечает определенному режиму горения: *а* — стационарному, *б* — пульсирующему, *в* — многоточечному, *г* — спиновому. Термограммы *а*, *б* аналогичны полученным в работе [25] в тех же режимах горения ряда СВС-систем. Для термограмм пульсирующего режима характерно наличие плато, тепловой механизм возникновения которых следующий. Пульсирующее горение — периодическое чередование вспышек и депрессий. Вспышка представляет собой быстрое воспламенение прогретого слоя с резким повышением температуры, рост которой в конечном итоге приостанавливается вследствие увеличивающегося отвода тепла как в сторону несгоревшего вещества, так и в сторону продуктов реакции. Наступает депрессия процесса, глубина которой определяет протяженность плато на обычной термограмме. Тепловой поток в исходную смесь приводит к медленному нарастанию ее температуры и, как следствие, к появлению квазиизотермического участка и на дифференциальной термограмме.

Обращает на себя внимание тот факт, что и при очаговых режимах горения (*в* и *г*) на термограммах существует один или несколько квазиизотермических участков. Можно сказать, что и в этих случаях фронт горения внутри образца перемещается скачками. Реализуется очагово-

Система	d , мм	u , мм/с	v , мм/с	ω , 1/с	v/u	x_s , мм	x_p , мм	x'_p , мм	t_s , с	t_p , с
$2Cr_2O_3 + 3Zr + 2,35ZrO_2$	10	0,4	5,3	1,06	13,3	2,4	2,9	4,24	5,8	5,4
$2Fe_2O_3 + 3Zr + 3,37ZrO_2$	10	0,8	8,8	1,76	11,0	2,9	2,6	2,1	3,5	3,2

пульсирующий режим (спиновый режим пульсирующего горения), когда спирально ввинчивающаяся у поверхности образца плоскость фронта¹, внутри его перемещается скачками. Подтверждением такого механизма служат результаты количественной обработки характеристик спинового режима пульсирующего горения исследованных хромо- и железоциркониевых термитов (см. таблицу, где u — средняя скорость горения образца; v — средняя линейная скорость перемещения спина по спирали; ω — средняя угловая его скорость; x_s — шаг спирали; t_s — время прохождения спином одного витка спирали; x_p — «ширина» пульсации; t_p — период пульсации; x_s и t_s рассчитывали по следам на сгоревших образцах, предварительно определив полное время их горения, x_p и t_p — путем количественной обработки термограмм).

Из таблицы следует, что величина x_s согласуется с x_p , а t_s — с t_p . Итак, можно считать, что за период пульсации очаг реакции на поверхности образца проходит расстояние, равное примерно его периметру. Затем фронт реакции в центре образца скачком перемещается на ширину пульсации, определяя шаг спирали спинового горения.

Количественная обработка результатов кино съемки двумерного спинового горения, проведенная в [7], показала, что очаг реакции движется по поверхности образца железоциркониевого термита со снижающейся скоростью. Это объясняется тем, что процесс двумерного спинового горения протекает при возрастающем радиусе спирали. Анализ следов на сгоревших в очагово-пульсирующем режиме образцах железоциркониевого термита (см. рис. 1 из [6]) и кинокадров 4—6 процесса (см. рис. 1) показывает, что пространственная протяженность очага меняется. По-видимому, это связано не столько с гетерогенностью состава, сколько с меняющейся скоростью движения очага (более широкий след соответствует меньшей скорости горения). Можно предположить, что движение очага реакции за период пульсации идет со снижающейся скоростью, затем фронт реакции внутри образца скачком перемещается, давая начало новому витку спирали.

Если время прохождения очагом реакции каждого витка спирали $t_{об} \approx H/v$ ($H = 2\pi r$ — периметр цилиндрического образца, r — его радиус) равно периоду пульсации фронта в центре образца $t_p = x'_p/u$ (x'_p — ширина пульсации), то будет иметь место устойчивое распространение спинового режима пульсирующего горения. При этом отношение средней линейной скорости перемещения очага реакции по спиральной траектории к средней скорости движения фронта вдоль оси образца равно отношению пути, пройденного спином за один оборот и фронтом горения — за одну пульсацию:

$$v/u = H/x'_p.$$

Вопросам динамики перестройки различных режимов горения посвящены экспериментальные работы [6—9]. Обобщая полученные результаты, удалось сделать следующие выводы:

1) последовательность смены режимов горения термитных систем (при снижении калорийности состава, его начальной температуры либо росте уровня теплопотерь) всегда сохраняется: от стационарного к пульсирующему и далее через многоточечное к спиновому;

¹ Авторами работы [4] предложена геометрическая модель процесса, согласно которой зона реакции при спиновом горении таких систем представляет собой луч, закручивающийся по спирали с постоянной скоростью, а фронт горения — спирально ввинчивающаяся плоскость.

2) переход от стационарного горения к пульсирующему происходит скачком, от пульсирующего к спиновому через область многоточечных режимов;

3) некоторые звенья в этой последовательности режимов могут отсутствовать, однако упорядоченному спиновому горению всегда предшествует многоточечный режим.

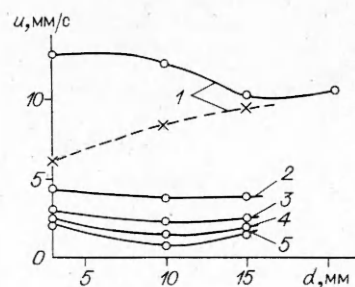
Хорошо иллюстрируют процесс перестройки различных режимов фотографии образцов железозиркониевого термита, сгоревших под воздействием тепловой волны от раскаленного воспламенителя. Последовательность перестройки при горении образцов диаметром 10 мм — от пульсирующего (II) к многоточечному (III) и от последнего к спиновому (IV) — представлена на рис. 1 в работе [6].

Для наглядности проследим за перестройкой режимов горения термитных составов с изменением количества инертного разбавителя (см. сводную таблицу в [11]). Стационарно горящий состав (с постоянной скоростью перемещения фронта горения) с увеличением количества инертного разбавителя начинает гореть в автоколебательном режиме (с пульсирующей скоростью перемещения фронта). Характер движения фронта в центре образца отражен на термограмме рис. 3, б. Дальнейшее увеличение количества инертного разбавителя приводит к тому, что фронт горения разбивается на большое число отдельных светящихся участков, беспорядочно перемещающихся в плоскости фронта (см. рис. 1, I—3). Можно предположить, что аналогично идет процесс и внутри образца. Появление множества пульсирующих участков сказывается на виде термограммы, отражающей динамику фронта в центре образца (см. рис. 3, в). При еще большем количестве инертного разбавителя число светящихся участков (на внешней поверхности и, по-видимому, внутри образца) сокращается вплоть до появления одного устойчиво движущегося по спирали очага. Развивается своеобразный пульсирующий режим спиновое горения — на поверхности образца движущийся очаг (см. рис. 1), в центре — скачки фронта (см. рис. 3, г).

Как установлено ранее [6, 8, 9, 26], многоточечный режим (переходный от пульсирующего к спиновому) реализуется в широком диапазоне определяющих параметров термитных систем. При математическом анализе неоднородных процессов горения, проводимом обычно вблизи границы потери устойчивости стационарным фронтом [20—22], стационарный режим с изменением определяющих параметров сразу перестраивается в спиновый.

Переход от стационарного к спиновому горению, минуя хаотический многоточечный режим, удалось получить в опытах с железозиркониевым термитом 60%-го разбавления, спрессованным в цилиндрические образцы диаметром 3 мм. При этом примерно пятая часть образца высотой 12—17 мм после иницирования горящим воспламенителем сгорала (см. рис. 2, 3) в стационарном режиме (I), остальная — в спиновом (IV). Спиновый режим в этом случае быстро устанавливается, легко реализуется и хорошо воспроизводится. В отличие от описанного выше спинового режима пульсирующего горения, этот режим можно считать стационарным, отвечающим, по-видимому, модели, предложенной в [4]. При горении образцов большего диаметра появляется переходная между пульсирующим и спиновым область многоточечного горения (III на рис. 1 из [6]). С увеличением диаметра образца ширина этой области возрастает. Стабилизация очагово-пульсирующего процесса при большой площади фронта горения, по-видимому, затрудняется. Кроме того, с увеличением диаметра образца снижается роль такого стабилизирующего фактора, как экзотермическая реакция взаимодействия компонентов термитных систем с кислородом воздуха. Влияние этого взаимодействия на ширину области спиновых режимов обнаружено в [8]. Показано, что сильно разбавленные термитные системы, не способные к горению в инертной среде, горят на воздухе в спиновом режиме.

Рис. 4. Средние скорости горения на воздухе (—) и в атмосфере аргона (---) цилиндрических образцов железозиркониевого термита при разбавлении 40 (1), 50 (2), 60 (3), 70 (4) и 72 % (5).



На рис. 4 представлены средние скорости горения (независимо от реализуемого режима) разбавленных железозиркониевых термитных систем, спрессованных в цилиндрические образцы разного диаметра. Анализ представленных результатов позволяет заключить, что влияние экзотермической реакции взаимодействия компонентов термитных систем с кислородом воздуха наиболее существенно при горении сильно разбавленных термитных систем, спрессованных в образцы малого диаметра (самая высокая средняя скорость горения). Именно в этой области параметров удалось экспериментально реализовать переход от стационарного горения к устойчивому спиновому, минуя хаотический многоточечный режим.

Необходимо отметить, что вопрос о стабилизирующем влиянии на процесс очагового горения экзотермической реакции взаимодействия горячей системы с кислородом воздуха тесно связан с вопросом о фильтрации воздуха по порам горящего образца и требует дальнейших экспериментальных и теоретических исследований.

Авторы благодарят В. А. Вольперта за детальное обсуждение результатов работы.

ЛИТЕРАТУРА

1. Мержанов А. Г., Филоненко А. К., Боровинская И. П. // Докл. АН СССР.— 1973.— 208, № 4.— С. 392.
2. Филоненко А. К., Вершинников В. И. Закономерности спинового горения титана в азоте // ФГВ.— 1975.— 11, № 3.— С. 353.
3. Филоненко А. К. // Процессы горения в химической технологии и металлургии.— Черногоровка, 1975.
4. Максимов Ю. М., Пака А. Т., Лавренчук Г. В. и др. Спиновое горение безгазовых систем // ФГВ.— 1979.— 15, № 3.— С. 156.
5. Максимов Ю. М., Мержанов А. Г., Пака А. Т. и др. Режимы неустойчивости горения безгазовых систем // ФГВ.— 1981.— 17, № 4.— С. 51.
6. Струнина А. Г., Дворянкин А. В. // Докл. АН СССР.— 1981.— 260, № 5.— С. 1185.
7. Мержанов А. Г., Дворянкин А. В., Струнина А. Г. // Докл. АН СССР.— 1982.— 267, № 4.— С. 869.
8. Дворянкин А. В., Струнина А. Г., Мержанов А. Г. Некоторые закономерности спинового режима горения термитов // ФГВ.— 1982.— 18, № 2.— С. 10.
9. Струнина А. Г., Дворянкин А. В., Мержанов А. Г. Неустойчивые режимы горения термитных систем // Там же.— 1983.— 19, № 2.— С. 30.
10. Вольперт В. А., Дворянкин А. В., Струнина А. Г. Неоднородное горение образцов прямоугольного сечения // Там же.— 1983.— 19, № 4.— С. 10.
11. Дворянкин А. В., Струнина А. Г., Мержанов А. Г. Устойчивость горения термитных систем // Там же.— 1985.— 21, № 4.— С. 44.
12. Костин С. В., Струнина А. Г., Барзыкин В. В. Экспериментальное исследование переходных процессов горения негазифицирующихся систем в области неустойчивого газового горения // Там же.— 1988.— 24, № 2.— С. 32.
13. Шкадинский К. Г., Хайкин Б. П., Мержанов А. Г. Распространение пульсирующего фронта экзотермической реакции в конденсированной фазе // Там же.— 1971.— 7, № 1.— С. 19.
14. Ивлева Т. П., Мержанов А. Г., Шкадинский К. Г. // Докл. АН СССР.— 1978.— 239, № 5.— С. 1086.
15. Алдушин А. П., Зельдович Я. Б., Маломед Б. А. // Там же.— 1980.— 251, № 5.— С. 1102.
16. Алдушин А. П., Зельдович Я. Б., Маломед Б. А. // Химическая физика процессов горения и взрыва. Горение конденсированных систем.— Черногоровка, 1980.
17. Ивлева Т. П., Мержанов А. Г., Шкадинский К. Г. О закономерностях спинового режима распространения горения // ФГВ.— 1980.— 16, № 2.— С. 3.

18. Алдушин А. П., Маломед Б. А. Феноменологическое описание нестационарных неоднородных волн горения // Там же.— 1981.— 17, № 1.— С. 3.
19. Sivashinsky G. I. // J. App. 1. Math.— 1981.— 40.— P. 432.
20. Вольперт В. А., Вольперт А. И., Мержанов А. Г. // Докл. АН СССР.— 1982.— 262, № 3.— С. 642.
21. Вольперт В. А., Вольперт А. И., Мержанов А. Г. // Там же.— 1982.— 263, № 4.— С. 918.
22. Вольперт В. А., Вольперт А. И., Мержанов А. Г. Применение теории бифуркаций к исследованию нестационарных режимов горения // ФГВ.— 1983.— 19, № 4.— С. 69.
23. Щербак С. Б. Режимы неустойчивого горения образцов безгазовых составов в форме стержней квадратного и кругового сечения // ФГВ.— 1983.— 19, № 5.— С. 9.
24. Margolis S. V., Kaper H. G., Leaf G. K. // Combust. Sci. Technol.— 1985.— 43, N 3.— P. 127.
25. Маслов В. М., Боровинская И. П., Мержанов А. Г. Экспериментальное определение максимальных температур процессов СВС // ФГВ.— 1978.— 14, № 5.— С. 79.
26. Струнина А. Г., Бутакова Э. А., Демидова Л. К. и др. Горение безгазовых смесей при криогенных температурах // Там же.— 1988.— 24, № 2.— С. 99.

п. Черноголовка

*Поступила в редакцию 22/XI 1989,
после доработки — 3/VII 1990*

УДК 614.841.12

Ю. И. Шебеко, А. Я. Корольченко, В. Г. Шамонин, С. Г. Цариченко

О ВЗАИМОСВЯЗИ БАРИЧЕСКОГО ПОКАЗАТЕЛЯ НОРМАЛЬНОЙ СКОРОСТИ ГОРЕНИЯ ГАЗОВОЗДУШНЫХ СМЕСЕЙ И КИНЕТИКИ ТРИМОЛЕКУЛЯРНЫХ РЕАКЦИЙ ВО ФРОНТЕ ПЛАМЕНИ

Путем численного моделирования распространения пламени по метано- и водородовоздушной смеси с учетом переноса и химических реакций изучена связь кинетики тримолекулярных реакций и барического показателя нормальной скорости горения. Показано, что чем ниже константы скоростей тримолекулярных реакций, тем выше величина барического показателя. Для метана барический показатель хотя и растет, но остается отрицательным, а для водорода имеет место смена его знака.

Зависимость нормальной скорости горения газозвушных смесей от давления принято описывать в ряде случаев полуэмпирическим выражением $S_u = S_{u0}(p/p_0)^n$, где S_u , S_{u0} — значения нормальной скорости горения при давлениях p и p_0 соответственно, n — барический показатель [1—3]. Величина n зависит от природы горючего вещества, состава смеси, параметров состояния и других факторов.

В работе [1] предложено следующее эмпирическое правило: если при $p \approx 0,1$ МПа и температуре $T \approx 300$ К и $S_u > 1$ м/с, значение n положительно, при $S_u \leq 1$ м/с $n < 0$. Это положение подтверждено достаточно большим числом экспериментальных данных, хотя детального теоретического обоснования оно все же не получило. В [4] численным моделированием сгорания смесей $H_2 + O_2 + N_2$ различного состава найдено, что барический показатель может изменять знак при $S_u > 1$ м/с. В работе [5] экспериментально показано, что в случае $p \geq 1,0$ МПа и $T \geq 570$ К изменение знака n для стехиометрических водородовоздушных смесей с объемным содержанием водяного пара 5—10 % происходит при $S_u \geq 3$ м/с. Отсюда следует, что эмпирическое правило [1] справедливо, по-видимому, только в диапазоне давлений и температур, близких к нормальному. В то же время возникает вопрос — какими же процессами во фронте пламени определяется знак барического показателя.

Одним из возможных факторов, обуславливающих смену знака n , является изменение с давлением и температурой относительной роли би- и тримолекулярных химических реакций во фронте пламени. Цель настоящей работы — теоретическая проверка этого предположения.