

Здесь

$$\Omega = \kappa / (1 + k/\beta). \quad (8)$$

С математической точки зрения записанные уравнения формально совпадают с уже решенной задачей (2), только вид критического параметра в данном случае иной.

Из выражения (8) видно, что теплотери на излучение будут незначительными, если параметр  $k$  мал по сравнению с  $1/\beta$ .

Критические условия воспламенения частицы металла, записанные в виде  $\Omega = \text{const}$ , где  $\Omega$  определяется из (8), позволяют в явной форме учесть теплотери на излучение. Из (3), (6), (8) видно, что критическая температура воспламенения является функцией размера частицы, причем с увеличением размера эта зависимость усиливается. Из этого, в частности, следует, что полученная в экспериментах независимость критической температуры воспламенения алюминия от размера [2—4] говорит о том, что алюминий в этих экспериментах окислялся по дробному закону, немного более слабому, чем параболический.

*Комсомольский-на-Амуре  
вечерний политехнический  
институт*

*Поступила в редакцию  
14/X 1974*

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Б. И. Хайкин, В. Н. Блошенко, А. Г. Мержанов. ФГВ, 1970, 5, 4.
2. Ю. В. Фролов, П. Ф. Похил, В. С. Логачев. ФГВ, 1972, 8, 2.
3. П. Ф. Похил, А. Ф. Беляев и др. Горение порошкообразных металлов в активных средах, М., «Наука», 1972.
4. Г. Н. Маркштейн, 1963, РТК, 1, 3.

УДК 662.581

### ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ПРОЦЕССА ЗАЖИГАНИЯ БЕЗГАЗОВЫХ СИСТЕМ ВОЛНОЙ ГОРЕНИЯ

*В. И. Ермаков, А. Г. Струнина, В. В. Барзыкин*

Теоретическое изучение основных закономерностей зажигания и следующих за ним нестационарных процессов горения безгазовых систем, поджигаемых горящим воспламенителем, проведено в работе [1].

В данной работе излагаются результаты экспериментального исследования этих закономерностей. Зажигание безгазовых систем волной горения экспериментально не изучалось. Экспериментальных работ по изучению процессов нестационарного горения известно очень мало и проведены они в основном на газифицирующихся системах типа пороха Н [2—4]. Такое положение объясняется значительными трудностями, возникающими при исследовании нестационарных процессов горения. В первую очередь это относится к переходным режимам от зажигания к горению и с одного режима горения на другой. Изучение же перехода от зажигания к горению безгазовых систем осложняется дополнительными трудностями, связанными с возможностью возникновения автоколебательных режимов горения [5, 6].

**Выбор системы.** Изучение процессов зажигания безгазовых систем волной горения проводилось на термитных составах. Термиты относят-

Таблица 1

## Особенности горения некоторых термитных систем

Состав	Размер частиц горючего, мкм	Процент добавки сверх 100 %	Примечание
$3\text{FeO} + 2\text{Al}$	7	$\text{Al}_2\text{O}_3$ : 23 27 31	Растекание шлаков Пульсирующее горение [5, 6] Появление «спинового» горения [8]
$\text{Fe}_2\text{O}_3 + 2\text{Al}$	7	$\text{Al}_2\text{O}_3$ : 29 32 36 40 43	Растекание шлаков Фронт горения ровный То же Слабо пульсирующее горение «Спиновое» горение
$\text{Cr}_2\text{O}_3 + 2\text{Al}$	5	$\text{Al}_2\text{O}_3$ : 0 20 26	Фронт горения ровный То же Фронт горения с частыми пульсациями
$\text{Cr}_2\text{O}_3 + 2\text{Al}$	7	$\text{Al}_2\text{O}_3$ : 0 15 20	Фронт горения ровный То же Пульсирующее горение
$3\text{CuO} + 2\text{Al}$	7	$\text{Al}_2\text{O}_3$ : 36	Пульсирующее горение с большим количеством дыма
$3\text{CaSO}_4 + 8\text{Al}$	7	$\text{Al}_2\text{O}_3$ : 0	Горение сопровождается выделением большого количества дыма
$2\text{Fe}_2\text{O}_3 + 3\text{Ti}$	<20	$\text{TiO}_2$ : 30 39 40	Фронт горения ровный То же Пульсирующее горение
$2\text{Cr}_2\text{O}_3 + 3\text{Ti}$	<20	$\text{TiO}_2$ 32 44	Затухающее горение Горение с пламенем

ся к пиротехническим составам, широко применяемым (вследствие их простоты и компактности) в современных летательных аппаратах и ракетно-космической технике [7]. К ним, как и к другим элементам пироавтоматики, предъявляют жесткие требования по обеспечению минимального разброса рабочих характеристик. Одной из причин этого разброса (особенно при малых размерах системы) может быть различие в протекании нестационарных процессов (зажигание и переходные режимы горения). В связи с этим изучение процессов инициирования реакции термитов волной горения представляется весьма актуальным. Сжигание образцов (диаметром  $10^{-2}$  м и высотой  $1,0 \cdot 10^{-2}$ – $1,3 \cdot 10^{-2}$  м), спрессованных из различных термитных порошков, позволило выяснить некоторые особенности их горения. Результаты представлены в табл. 1.

Для изучения процессов зажигания волной горения были отобраны такие системы, которые: 1) не имели газообразных продуктов при горении; 2) не меняли заметно в ходе опыта размер и форму образцов; 3) имели ровный (с минимальными пульсациями) фронт горения. Такими оказались хромоалюминиевый, железоалюминиевый и железотитановый термиты. Эти системы интересны для исследования еще и потому, что существенно различаются в скоростях горения<sup>1</sup>. В табл. 2 приведены также адиабатические температуры горения  $T$  выбранных термитных систем<sup>2</sup> и коэффициент температуропроводности  $a$ , полу-

<sup>1</sup> Скорости горения определялись по фоторегистрации.

<sup>2</sup> Адиабатические температуры горения рассчитывались с использованием (и экстраполяцией в область температур выше температуры плавления) значений термодинамических характеристик соответствующих компонент исследуемых систем [10].

Т а б л и ц а 2

## Теплофизические параметры и основные характеристики горения

Система	Диаметр частиц горючего, мкм	Процент добавки сверх 100 %	T, К	Скорость горения в Аг; $v \cdot 10^2$ , м/с	$a \cdot 10^7$ м <sup>2</sup> /с*	$x' \cdot 10^5$ , м
Cr <sub>2</sub> O <sub>3</sub> + 2Al	5	0	2370	0,77	3,33	4,3
		7,5	2340	0,49	1,95	3,98
		15	2220	0,34	1,85	5,44
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub> + 2Al	7	32	2400	0,23	2,67	11,56
		36	2370	0,18	2,47	13,5
		40	2240	0,1	2,11	21,1
2Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub> + 3Ti	<20	31	2035	0,1	4,6	46,0
		35	2030	0,08	4,3	53,75
		39	2025	0,06	3,99	66,5

ченный по методу В. С. Волькенштейн [9]. Сравнение адиабатических температур горения с температурами плавления исходных и конечных продуктов реакций показывает, что при горении все компоненты, кроме окиси хрома и окиси алюминия в наиболее разбавленных хромоалюминиевом и железоалюминиевом термитах, находятся в расплавленном состоянии.

## Постановка и проведение эксперимента

Опыты по изучению закономерностей зажигания выбранных термитных составов горящим воспламенителем проводились в соответствии с теоретическими исследованиями [1] для случая, когда кинетические параметры воспламенителя и поджигаемой системы равны, а тепловые эффекты разные. Для этого достаточно взять составы обеих реагирующих систем, отличающихся лишь количеством инертного разбавителя.

Исходная смесь готовилась следующим образом. Вначале все компоненты в течение 14—16 ч выдерживались в сушильном шкафу при температуре 120°C. Затем они помещались в закрытый стеклянный сосуд и тщательно перемешивались механической мешалкой до получения однородно окрашенной смеси. Исследования, проведенные под микроскопом, показали, что в готовой смеси частицы горючего равномерно распределены среди меньших по размеру частиц окислителя.

Готовая термитная смесь запрессовывалась в цилиндрические образцы с удельным весом  $1,86 \cdot 10^{-2} \div 1,96 \cdot 10^{-2}$  Н/м<sup>3</sup>. Диаметр образцов  $10^{-2}$  м. Высота таблеток воспламенителя и поджигаемой системы подбиралась согласно теоретической модели, описанной в [1]. В математической постановке задачи [1] предполагалось, что воспламенитель и поджигаемый образец в виде двух полубесконечных цилиндров приведены в контакт друг с другом. Для анализа закономерностей процесса зажигания волной горения эта модель наиболее проста, так как не осложняется рассмотрением граничных условий на торцах цилиндров. Использовать очень высокие образцы в эксперименте не представляется возможным из-за неравномерности плотности запрессованной таблетки и трудностей проведения самого эксперимента. Поэтому подбирались оптимальная высота образцов — не слишком большая, чтобы избежать указанных недостатков, и не слишком малая, чтобы горение системы успевало выйти на стационарный режим.

Чтобы исключить влияние воздушной прослойки на развитие исследуемого процесса<sup>1</sup>, образцы воспламенителя и поджигаемой системы прессовались совместно. Поскольку термитные составы воспламеняются трудно [11, 12], то воспламенитель инициировался тепловым потоком от горячей смеси Ti+В или Ti+С, которая, в свою очередь, воспламенялась от раскаленной спирали. Перемещение волны горения фиксировалось фоторегистратором ФР-11 с увеличением на пленку в 1,3—1,7 раза.

Опыты проводились при атмосферном давлении в воздухе (для железоалюминиевого термита) и в аргоне (для хромоалюминиевого и железотитанового термитов). Измерение скоростей горения исследуемых термитных систем в различных средах показало, что среда не оказывает существенного влияния на процесс их горения.

**Результаты эксперимента.** При теоретическом исследовании вопроса о зажигании безгазовой системы горящим воспламенителем [1] было выделено два основных режима развития процесса (индукционный и режим «сжигания»), различающиеся по соотношению характерных времен переходного периода и по виду временной зависимости нестационарной скорости горения в переходной области. В работе [1] показано, что для случая, когда воспламенитель и поджигаемая система различаются лишь тепловыми эффектами, индукционный режим зажигания реализуется, если скорость и температура горения воспламенителя меньше скорости и температуры горения поджигаемой системы, а режим «сжигания» — при обратном соотношении скоростей и температур горения.

Чтобы реализовать для этого случая индукционный режим зажигания в эксперименте, необходимо иметь в составе воспламенителя большее количество инертного разбавителя, чем в поджигаемой системе. Тогда при равных кинетических параметрах обеих реагирующих систем скорость и температура горения воспламенителя будут ниже. Режим «сжигания» должен реализоваться, если количество инертной добавки в воспламенителе меньше. Используемые в эксперименте составы воспламенителей и поджигаемых систем приведены в табл. 3.

Нестационарная скорость горения исследованных термитных систем в переходной области для обоих режимов зажигания представлена на рис. 1—3. Здесь  $v'$ ,  $x'$  — стационарная скорость горения и ширина подогретой зоны поджигаемой системы. Количество прогретых зон, укладываемых в образце длиной 0,01 м при его стационарном горении, отмечено вертикальными прямыми. Точность определения скорости раз-

Таблица 3

Система	Процент разбавления			
	Индукционный режим		Режим «сжигания»	
	воспламенитель	поджигаемый образец	воспламенитель	поджигаемый образец
Cr <sub>2</sub> O <sub>3</sub> + 2Al	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> : 15	0	0	15
	7,5	0	0	7,5
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub> + 2Al	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> : 40	32	32	40
	36	32	32	36
2Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub> + 3Al	TiO <sub>2</sub> : 39	31	31	39
	39	35	35	39

вития процесса для каждого опыта ~15%. Величина скорости горения колеблется и в воспламенителе (при подходе к поджигаемой системе), и в поджигаемой системе при выходе на стационарный режим горения. При теоретическом исследовании [1] такие колебания (для рассматриваемого случая равных кинетических параметров и разных тепловых эффектов) отмечались лишь в поджигаемой

<sup>1</sup> Существенная роль этого влияния будет показана ниже.

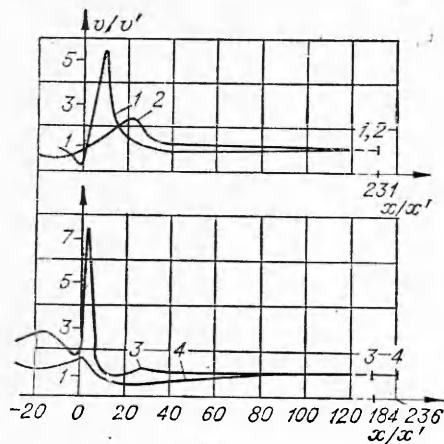


Рис. 1. Изменение скорости горения хромоалюминиевого термита в индукционном режиме (1, 2) и режиме «сжигания» (3, 4).

1 — 15 и 0%; 2 — 7,5 и 0,4%; 3 — 0 и 15%; 4 — 0 и 7,5%. (Здесь и далее первая цифра — воспламенитель, вторая — поджигаемая система).

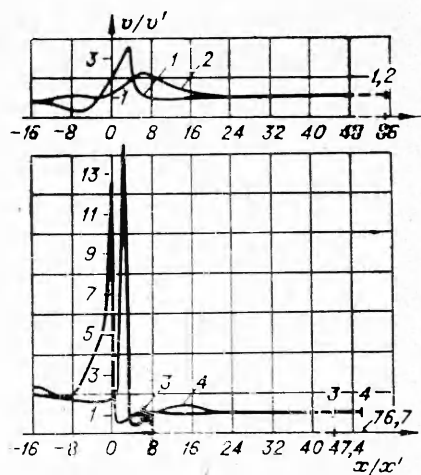


Рис. 2. Изменение скорости горения железоалюминиевого термита в индукционном режиме (1, 2) и режиме «сжигания» (3, 4).

1 — 40 и 32%; 2 — 36 и 32%; 3 — 32 и 40%; 4 — 32 и 36%.

системе. Несовпадение экспериментальных и теоретических результатов<sup>1</sup> объясняется, по-видимому, не учтенным в расчете фактором влияния на скорость горения соотношения теплофизических параметров воспламенителя и поджигаемой системы.

Различия в характере изменения нестационарной скорости горения в индукционном режиме и режиме «сжигания» следующие. В индукционном режиме скорость горения в поджигаемой системе плавно нарастает и медленно снижается, приближаясь к своему стационарному значению. Максимум скорости горения поджигаемой системы достигается на некотором расстоянии от границы раздела с воспламенителем. В режиме «сжигания» у самой границы раздела реагирующих систем наблюдается резкий подъем скорости горения с последующим резким снижением ее до значений, меньших стационарных скоростей горения. Аналогичные результаты были получены при теоретическом исследовании вопроса о зажигании безгазовых систем волной горения [1].

В табл. 4 приведены характерные значения времен переходного периода для обоих режимов зажигания всех исследованных термитных систем. Здесь за  $t_1$  принималось время от конца горения

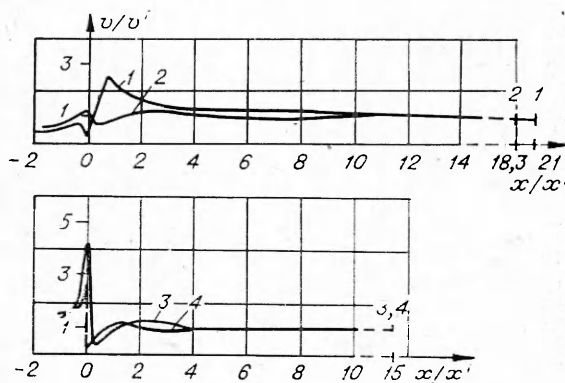


Рис. 3. Изменение скорости горения железотитанового термита в индукционном режиме (1, 2) и режиме «сжигания» (3, 4).

1 — 39 и 31%; 2 — 39 и 35%; 3 — 31 и 39%; 4 — 35 и 39%.

<sup>1</sup> Необходимо отметить, что в связи с отсутствием надежных кинетических данных сравнение теоретических результатов с экспериментом может быть лишь качественным.

Таблица 4

## Основные характеристики переходных режимов горения

Система	Разбавитель, %	$t_1$ , с	$t_2$ , с	$x^* \cdot 10^2$ , м
$\text{Cr}_2\text{O}_3 + 2\text{Al}$	0; 15	0,14	0,68	0,27
	0; 7,5	0,14	0,55	0,22
	15; 0	0,31	0,28	0,26
	7,5; 0	0,03	0,29	0,32
$\text{Fe}_2\text{O}_3 + 2\text{Al}$	32; 40	0,13	3,2	0,3
	32; 36	0,53	1,41	0,27
	40; 32	0,69	0,74	0,23
	36; 32	0,76	0,57	0,24
$2\text{Fe}_2\text{O}_3 + 3\text{Ti}$	31; 39	0,08	8,14	0,38
	35; 39	0,06	4,85	0,26
	39; 31	0	5,45	0,66
	39; 35	0,01	2,77	0,24

\* Первая цифра — воспламенитель, вторая — поджигаемая система.

термита  $t_1$  в обоих режимах близко к нулю. Объясняется это, по-видимому, тем, что из-за большой ширины прогретой зоны этого термита к моменту сгорания последних слоев воспламенителя в поджигаемой системе фронт горения уже формируется. При теоретическом исследовании [1] были получены аналогичные соотношения между характерными временами переходного периода в обоих режимах зажигания. В табл. 4 приведены также размеры переходной области  $x^*$  для всех исследованных термитных систем ( $x^*$  — расстояние, на котором в поджигаемой системе устанавливается стационарная скорость горения).

В практике использования воспламенителей для зажигания трудновоспламеняемых систем [11] при работе с широко распространенными

воспламенителя до начала перемещения фронта горения в поджигаемой системе;  $t_2$  — время от начала перемещения фронта горения в поджигаемой системе до установления в ней стационарного режима горения (когда отклонение нестационарной скорости горения от стационарного значения для конкретного опыта не превышает  $\sim 7\%$ ). Как видно из табл. 4, в индукционном режиме зажигания время индукции  $t_1$  сравнимо с временем установления стационарного режима горения  $t_2$ . В режиме «сжигания» время индукции может быть намного меньше времени установления стационарной скорости горения в системе. Только при горении медленно горящего железотитанового

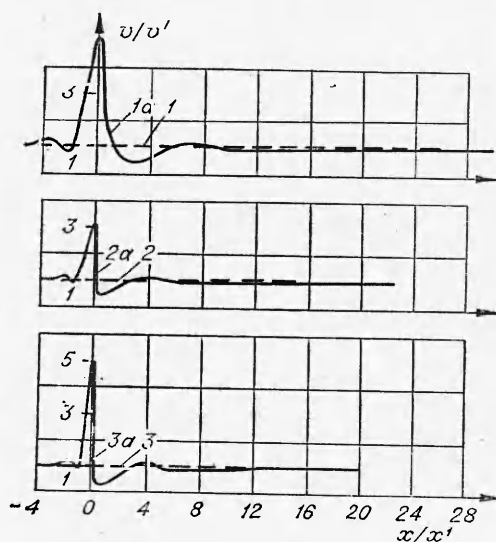


Рис. 4. Изменение скорости горения железотитанового термита, спрессованного совместно (1, 2, 3) и раздельно (1а, 2а, 3а)  
1, 1а — 31 и 31%; 2, 2а — 35 и 35%; 3, 3а — 39 и 39%.

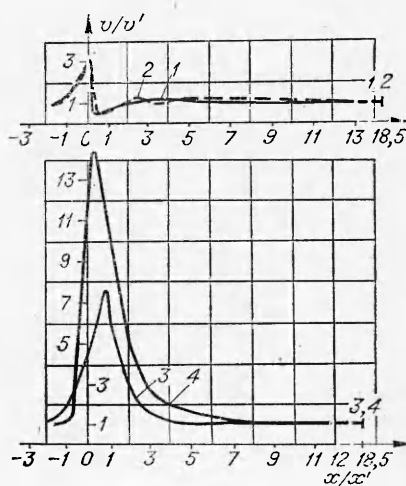


Рис. 5. Изменение скорости горения железотитанового термита 35/35, спрессованного раздельно.  
Ширина воздушной прослойки, м: 1 —  $1 \cdot 10^{-4}$ ; 2 —  $3 \cdot 10^{-4}$ ; 3 —  $7 \cdot 10^{-4}$ ; 4 —  $17 \cdot 10^{-4}$ .

ми пиротехническими замедлителями [7], а также с зарядами больших размеров реагирующую систему составляют обычно из двух или нескольких отдельно запрессованных образцов, находящихся в контакте друг с другом. При распространении фронта горения по такой системе образующаяся в месте контакта отдельных образцов воздушная прослойка приводит к появлению переходных режимов горения, что особенно ощутимо, если размеры системы малы. В связи с этим было проведено изучение процессов зажигания термитных систем горящим воспламенителем из того же термитного состава при отсутствии (совместное прессование) и наличии (раздельное прессование) воздушной прослойки различной толщины. (Имеется в виду толщина воздушной прослойки между запрессованными образцами воспламенителя и поджигаемой системы до начала опыта.)

Результаты исследования представлены на рис. 4, 5. В качестве воспламенителя в опытах использовался тот же состав, что и в поджигаемой системе, но стационарная скорость горения в последней при раздельном прессовании устанавливалась после некоторого переходного периода. Представляет интерес тот факт, что с увеличением толщины воздушной прослойки (рис. 5) происходит смена режимов зажигания (от «сжигания» к индукционному режиму). Если прослойка достаточно велика, то возможно затухание горения.

ОИХФ АН СССР

Поступила в редакцию  
17/II 1975

#### ЛИТЕРАТУРА

1. А. Г. Струнина, Т. М. Мартемьянова и др. ФГВ, 1974, 10, 4.
2. В. М. Михеев, С. М. Борин. ФГВ, 1973, 9, 2.
3. В. М. Михеев, Ю. В. Левашов. ФГВ, 1973, 9, 4.
4. Ю. С. Рязанцев. Докт. дис., М., ИПМ АН СССР, 1974.
5. К. Г. Шкадинский, Б. И. Хайкин, А. Г. Мержанов. ФГВ, 1971, 7, 1.
6. А. Г. Мержанов. Теория безгазового горения. Препринт ОИХФ АН СССР, Черноголовка, 1973; *Archiwum procesow spalania*, 1974, 5, 1, 2—39.
7. Вспомогательные системы ракетно-космической техники. М., «Мир», 1970.
8. А. Г. Мержанов, А. К. Филоненко, И. П. Боровинская. Докл. АН СССР, 1973, 208, 4, 892.
9. В. С. Волькенштейн. Скоростные методы определения теплофизических характеристик материалов. Л., «Энергия», 1971.
10. К. Е. Уилкс, Ф. Е. Блок. Термодинамические свойства 65 элементов, их окислов, галогенидов, карбидов, нитридов. М., «Металлургия», 1965.
11. А. А. Шидловский. Основы пиротехники. М., «Машиностроение», 1973.
12. В. П. Стовбул, В. В. Барзыкин. Теория и технология металлотермических процессов. Под ред. Г. В. Самсонова, Новосибирск, «Наука», 1974, с. 31—37.

УДК 541.124

### КИНЕТИКА РЕАКЦИЙ ПРИ РАСПРОСТРАНЕНИИ АЦЕТИЛЕНО-КИСЛОРОДНОГО ПЛАМЕНИ

*В. Я. Басевич, С. М. Когарко, В. С. Посвянский*

Известно лишь ограниченное число решений кинетических уравнений для условий нормального распространения пламени. В работе [1] приводится упрощенное решение системы уравнений баланса вещества с диффузионным членом и ступенчатым подъемом температуры (в зоне прогрева до некоторой точки температура равна начальной, затем становится равной конечной температуре горения). Решение получено на примере метано-кислородного пламени. В настоящей работе тем же