

## ПОЛУЭМПИРИЧЕСКИЙ МЕТОД ОЦЕНКИ ПЕРЕХОДА ВОЛНЫ ГОРЕНИЯ ЧЕРЕЗ ПОВЕРХНОСТЬ КОНТАКТА В СОСТАВНОМ ЗАРЯДЕ

В. Т. Кузнецов

НИИ прикладной математики и механики при Томском государственном университете  
634050 Томск, ichan@niipmm.tsu.ru

Путем сопоставления экспериментальных результатов по устойчивому зажиганию и горению исходных образцов, составляющих огневую цепь пиротехнического заряда, определены критические условия перехода волны горения через поверхность контакта соседних прессовок составного заряда. Методика опробована на 20 зарядах, представляющих собой различные варианты пяти прессовок из пироксилина, дымного ружейного пороха и трех видов пиротехнических смесей. Определены минимальные размеры выступа на поверхности контакта, наличие которого способствует распространению волны горения по всему заряду.

Ключевые слова: зажигание, горение, тепловой поток, пиротехнические смеси, составной заряд.

Устойчивое распространение горения по составному пиротехническому заряду определяется условиями воспламенения поверхности контакта между соседними прессовками. Критические значения параметров перехода волны горения воспламенительного состава зависят от запаса тепла в волне, теплового сопротивления на границе и термокинетических свойств поджигаемого образца [1–3]. В данной работе предлагается инженерная методика оценки возможности перехода волны горения через границу между соседними прессовками, в которой используются результаты экспериментов по устойчивому зажиганию и горению составных частей заряда. В основу методики положена идея о так называемом «оптимальном» режиме зажигания, когда под действием внешнего теплового источника на поверхности образца в момент зажигания реализуются условия, идентичные условиям на поверхности данного образца при стационарном горении [4]. Следовательно, энергию в волне горения, а соответственно, и тепловой поток можно оценить из опытов по зажиганию образца в «оптимальном» режиме.

Рассматривается горение пиротехнического заряда, включающего в себя воспламенительный и основной составы. Предполагается, что в случае плоской границы и идеального теплообмена между соседними прессовками переход волны горения через поверхность контакта возможен, если энергия, необходимая для за-

жигания основного состава ( $N_o$ ), при тепловом потоке, реализуемом в волне горения воспламенительного состава ( $q_b^*$ ), не превышает энергию, необходимую для «оптимального» зажигания воспламенительного состава ( $N_b^*$ ). Значение  $q_b^*$  определяется графически из экспериментальной зависимости  $N(q)$  при минимальном значении энергии, необходимой для устойчивого зажигания воспламенительного состава. Из экспериментальной зависимости времени устойчивого зажигания основного состава от теплового потока при известном значении  $q_b^*$  можно определить время зажигания основного состава ( $t_{ign,o}$ ), а соответственно, и энергию, необходимую для его зажигания:  $N_o = q_b^* t_{ign,o}$ . Таким образом, по экспериментальным зависимостям  $t_{ign}(q)$  для воспламенительного и основного составов можно определить значения  $N_b^*$  и  $N_o$  и по их отношению  $N_b^*/N_o$  судить о возможности перехода волны горения через плоскую поверхность контакта составов заряда. Однако наличие теплового сопротивления на поверхности контакта, например, в результате неплотного соприкосновения прессовок может привести к затуханию горения на границе между соседними прессовками даже при выполнении сформулированных выше условий. Процесс установления стационарной волны горения при переходе через поверхность контакта в данном случае существенно зависит от размера зазора [3]. При этом устойчивому переходу способствует создание условий,

Таблица 1

Характеристики образцов составного заряда

Наименование образца	$\rho$ , кг/м <sup>3</sup>	$a$ , 10 <sup>-8</sup> м <sup>2</sup> /с	$U$ , мм/с	$t_{ign}^*$ , с	$N^*$ , 10 <sup>4</sup> Дж/м <sup>2</sup>
П	1500	6,77	1,4	0,035	2,5
ДРП	1700	14,3	9,0	0,020	5,4
А	1700	806	9,6	0,090 <sup>‡</sup>	58,0 <sup>‡</sup>
В	2350	55	3,2	0,045	11,2
С	1800	704	3,5	0,010 <sup>‡</sup>	50,0 <sup>‡</sup>

Примечание. <sup>‡</sup>Значения параметров получены экстраполяцией экспериментальных данных в область высоких тепловых потоков.

при которых часть поверхности основного состава некоторое время находится в зоне пламени воспламенительного состава. Такие условия можно реализовать, например, за счет формирования выступов на границе раздела составов. Предполагается, что зона пламени воспламенительного состава достаточно широка и температура продуктов горения в ней превышает температуру зажигания основного состава.

Рассмотрим, какие геометрические размеры выступов обеспечивают устойчивый переход волны горения. Пусть на границе раздела на основном составе имеется выступ цилиндрической формы. Исходя из физических представлений о процессе горения минимальная высота выступа определяется соотношением  $h_{\min} = U_B t_{ign,o}$ , где  $U_B$  — скорость горения воспламенительного состава,  $t_{ign,o}$  — время зажигания основного состава при  $q = q_B^*$ . За минимальный диаметр очага распространения пламени в случае цилиндрического выступа с учетом теплоотдачи по боковой поверхности можно взять величину  $d_{\min} = 6,7(at_{ign,o}^*)^{1/2}$  [5], где  $a$  — температуропроводность состава,  $t_{ign,o}^*$  — время зажигания основного состава в «оптимальном» режиме или время тепловой релаксации прогретого слоя. Таким образом, наличие выступа на границе между соседними прессовками может обеспечить в рассматриваемом случае устойчивый переход волны горения.

Предложенную методику проверяли в экспериментах с составными зарядами, представляющими собой различные комбинации из пяти разнородных прессовок с плоской границей раздела и выступом на поверхности контакта основного состава. Часть зарядов была изготовлена с рифленной поверхностью контакта. На рис. 1 представлены различные схемы компоновки заряда. В зависимости от на-

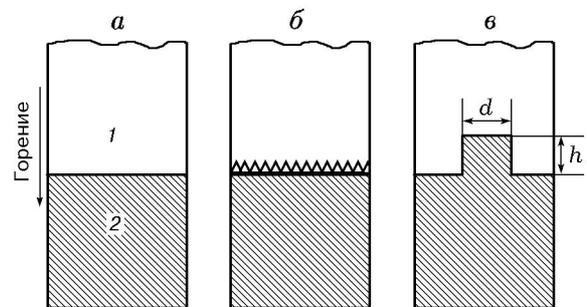


Рис. 1. Схемы составных зарядов:

а — плоская поверхность контакта воспламенительного (1) и основного (2) составов, б — рифленная поверхность, в — выступ на поверхности контакта основного состава

правления горения составы условно разделялись на воспламенительные и основные. Использованы прессовки из дымного ружейного пороха (ДРП), пироксилина № 1 (П) и пиротехнических смесей А, В, С на основе нитратов натрия, стронция и бария с содержанием (по массе) до 60 % порошка магния марки МПФ-3 (составы А, С) и до 40 % порошка титана марки ПТМ(а) (состав В). Для повышения прессуемости образцов использовали различные технологические добавки. Образцы готовили диаметром 15 мм и высотой 20 мм. Заряды с плоской поверхностью контакта изготавливали путем поджатия прессованных образцов с последующей бронировкой боковой поверхности раствором линолеума в ацетоне и сушкой при комнатной температуре в течение трех суток. Заряды с выступом на поверхности контакта изготавливали путем последовательного прессования составов с использованием пуансона, имеющего выступ цилиндрической формы. Диаметр и высоту выступа варьировали в диапазоне 2 ÷ 6 мм. После прессования заряд с

Таблица 2  
Горение зарядов с плоской поверхностью  
границы контакта составов

Состав заряда	Результат эксперимента	$N_B^*/N_0$
П + ДРП	+	0,220
П + А	-	0,004
П + В	-	0,065
П + С	-	0,009
ДРП + П	+	3,552
ДРП + А	-	0,030
ДРП + В	-	0,400
ДРП + С	-	0,060
А + П	+	18,100
А + ДРП	+	10,069
А + В	-	4,500
А + С	+, -	1,130
В+П	+	4,978
В + ДРП	+	1,731
В + А	+, -	0,060
В + С	+	0,120
С + П	+	16,600
С+ДРП	+	6,700
С + А	-	0,710
С + В	+	4,000
А + А	-	1,000

Примечание. + — горение, - — погасание.

выступом на поверхности контакта также бренировали раствором линолеума. Аналогичным образом изготавливали заряды с рифленой поверхностью на границе соседних прессовок. Поверхность пуансона в данном случае имела конические выступы высотой 1 мм с основанием 2 мм. Исходные образцы составного заряда были подвергнуты испытаниям по устойчивому зажиганию под действием светового потока интенсивностью  $(10 \div 300) \cdot 10^4$  Вт/м<sup>2</sup>. Методика испытания процесса зажигания световым потоком подробно изложена в [6]. Результаты исследования приведены на рис. 2, где нанесены экспериментальные данные по зажиганию пяти исходных прессовок. Используя эти данные и полагая, что в «оптимальном» режиме

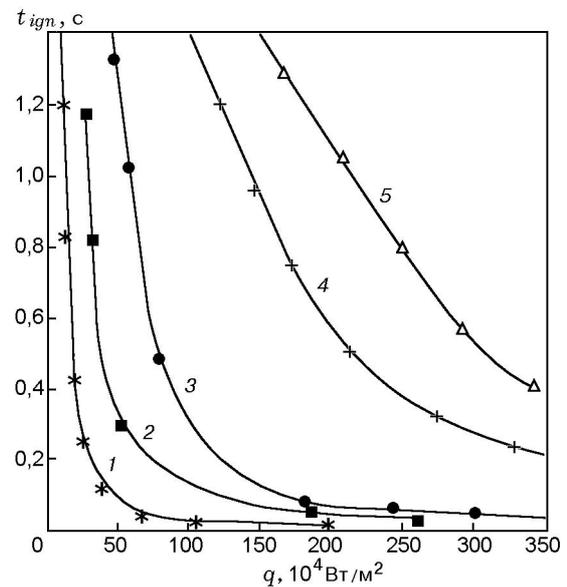


Рис. 2. Зависимость времени зажигания от плотности теплового потока:

1 — пироксилин, 2 — ДРП, 3 — пиросостав В, 4 — пиросостав С, 5 — пиросостав А

энергия, необходимая для устойчивого зажигания, минимальна, определяли критические параметры  $N^*$ ,  $t^*$ ,  $q^*$  для всех составов. Значения критических параметров представлены в табл. 1. Там же приведены данные по плотности ( $\rho$ ), температуропроводности ( $a$ ) прессовок и нормальной скорости горения ( $U$ ), измеренные в воздухе при атмосферном давлении. По своим характеристикам выбранные для исследования составы существенно различаются между собой, и изготовленные из них заряды позволяют охватить широкий диапазон изменения исследуемого фактора. Составные заряды сжигали при комнатной температуре в воздухе атмосферного давления. Воспламенительный состав поджигали нагретой нихромовой спиралью. Проводили визуальное наблюдение за процессом горения. Фиксировался результат: сгорание всего заряда или погасание на границе между воспламенительным и основным составами. Для каждой пары прессовок проведено не менее пяти испытаний. Экспериментальные данные по сжиганию составных зарядов с плоской поверхностью контакта между соседними прессовками представлены в табл. 2. В ней же для каждого заряда приведено отношение энергий, необходимых для устойчивого зажигания его составных частей. Видно, что при  $N_B^*/N_0 > 1$  заряд сгорает полностью; ес-

Таблица 3  
Минимальные размеры выступа на поверхности контакта составов при устойчивом распространении горения по составному заряду

Состав заряда	$d_{\min}$ , мм	$h_{\min}$ , мм	$d_{\min}$ , мм	$h_{\min}$ , мм
	Эксперимент		Расчет	
П+А	6	4	5,7	7,0
П+В	3	4	1,0	0,8
П+С	6	6	5,6	5,2
ДРП+А	6	4	5,7	6,0
ДРП+В	2	2	1,0	0,4
ДРП+С	6	4	5,6	3,0

ли  $N_B^*/N_0 < 1$ , то наблюдается погасание на границе между воспламенительным и основным составами. При  $N_B^* = N_0$  в опытах наблюдали как переход границы волной горения, так и погасание. Исключение составляли заряды П+ДРП и В+С, на результат сжигания которых, возможно, повлияла термостойкая бронировка, а также составы А+В и А+А, при сжигании которых возможно нарушение теплового контакта между соседними прессовками. Погасание между однородными прессовками А+А может быть также связано с отличием микроструктуры заряда на границе раздела прессовок от микроструктуры заряда в целом. Действительно, если вместо плоской поверхности контакта сформировать рифленую, которая позволяет снизить вероятность нарушения теплового контакта между прессовками, то волна горения переходит границу. В опытах устойчивый переход волны горения через рифленую поверхность контакта наблюдали в зарядах А+А, А+В, А+С, В+А. Однако, если энергии зажигания соседних прессовок значительно различаются, то рифления поверхности контакта уже недостаточно для распространения волны горения через границу. Например, рифление поверхности контакта на зарядах ДРП+А, ДРП+В, ДРП+С не способствовало распространению волны горения от воспламенительного состава к основному. Для того чтобы переход оказался возможным, необходимо на поверхности контакта создать выступ из основного состава определенных размеров. Такие заряды были изготовлены с выступом основного состава диаметром 2, 3, 4, 6 мм, высотой 2, 4, 6 мм. Образцы сжигали при комнатной температуре в воздухе атмосферно-

го давления. По результатам не менее 36 испытаний определены минимальные размеры выступа на поверхности контакта для устойчивого распространения горения по составному заряду. Экспериментальные и расчетные значения минимального размера выступа на поверхности контакта приведены в табл. 3. Принимая во внимание возможное отличие в условиях прессования вещества в цилиндрическом выступе и основном заряде, а также тот факт, что огневые испытания проведены на зарядах с дискретными значениями размеров выступа, можно считать удовлетворительным совпадение экспериментальных и расчетных значений минимального размера выступа на поверхности контакта между соседними прессовками составного заряда. Исключение составляют заряды с диаметром выступа порядка 2 мм, где теплофизические характеристики и время зажигания вещества (в выступе) могут отличаться от основного заряда. Таким образом, наличие выступа на поверхности контакта основного состава позволяет обеспечить устойчивое распространение волны горения через границу между воспламенительным и основным составами, характеристики которых (энергия зажигания, скорость горения и теплофизические параметры) существенно различаются.

На основе физических представлений о процессе зажигания и горения конденсированных веществ в работе предложена инженерная методика оценки возможности распространения волны горения через поверхность контакта составного заряда. В основу методики положена идея об «оптимальном» режиме зажигания под действием внешнего теплового источника. Используются экспериментальные данные по

зажиганию и горению исходных образцов составного заряда. Методика опробована на 20 зарядах, состоящих из разнородных прессовок, различающихся между собой энергиями зажигания, скоростями горения и теплофизическими характеристиками. Получено качественное и количественное подтверждение правомерности выдвинутых положений. С целью дальнейшего усовершенствования методики и определения границ ее применимости необходимо расширить диапазон исследуемых систем. Особый интерес представляют пиротехнические заряды с высоким содержанием металла и безгазовые составы. В этом случае для создания «оптимального» режима зажигания потребуются источники нагрева интенсивностью свыше  $10^7$  Вт/м<sup>2</sup>.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. **Ассовский И. Г.** Условия перехода волны горения через поверхность контакта двух топлив // Докл. АН СССР. 1980. Т. 253, № 1. С. 124–128.
2. **Симоненко В. Н., Зарко В. Е., Кискин А. Б. и др.** Устойчивость горения составных металлизированных образцов // Физика горения и взрыва. 1983. Т. 19, № 5. С. 62–64.
3. **Перевалов О. Ю., Кузнецов В. Т., Дик И. Г.** О переходе фронта горения через неидеальный контакт двух газифицирующихся твердых топлив // Физика горения и взрыва. 1993. Т. 29, № 2. С. 28–31.
4. **Аристова З. И., Лейпунский О. И.** О прогреве пороха перед воспламенением // Журн. физики горения и взрывов. 1958. Вып. 2. С. 225–228.
5. **Вилюнов В. Н.** Теория зажигания конденсированных веществ. Новосибирск: Наука, 1984.
6. **Кузнецов В. Т., Марусин В. П., Скорик А. И.** К вопросу о механизме зажигания гетерогенных систем // Физика горения и взрыва. 1974. Т. 10, № 4. С. 526–529.

*Поступила в редакцию 22/1 2002 г.*