

Скорость взаимодействия малоактивного окислителя  $J_2O_5$  с горючим или продуктами его пиролиза, вероятно, очень мала, и поэтому последние могут выступать в роли инертного разбавителя. Это подтверждается тем (рис. 6), что даже максимальная скорость горения смесей иодноватого ангидрида (размер частиц 60—100 мкм) с ПММА ( $\alpha = 1$ ) значительно ниже скоростей горения аналогичных смесей с  $NH_4ClO_4$  и на порядок меньше, чем у смесей с  $NH_4JO_4$ . Поскольку температура пламени  $NH_4JO_4$  относительно мала, даже небольшое количество разбавителя может привести к резкому падению скорости горения. В этом случае становится понятным, почему составы с крупным периодом аммония, имеющим малую удельную поверхность, горят быстрее составов с мелкими  $NH_4JO_4$ .

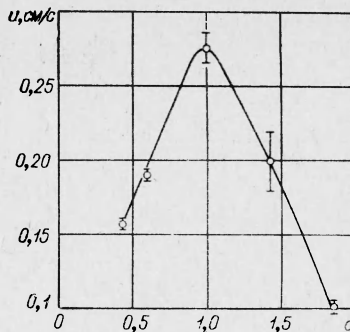


Рис. 6. Зависимость  $u(\alpha)$  смесей  $J_2O_5$  с ПММА при  $p=40$  ат.

Поступила в редакцию  
23/VI 1974

#### ЛИТЕРАТУРА

1. К. К. Андреев. Термическое разложение и горение взрывчатых веществ. М., «Наука», 1966.
2. Н. Н. Бахман, А. Ф. Беляев. Горение гетерогенных конденсированных систем. М., «Наука», 1967.
3. В. Д. Алешин, Б. С. Светлов, А. Е. Фогельзанг. ФГВ, 1970, 6, 4, 432.
4. А. Е. Фогельзанг, В. Я. Аджемян, Б. С. Светлов. Докл. АН СССР, 1971, 191, 6, 1296.
5. Е. Т. Денисов. Константы скорости гомолитических жидкофазных реакций. М., «Наука», 1971.
6. С. А. Цыганов, Н. Н. Бахман. ЖФХ, 1966, 40, 11, 2854.
7. А. Е. Фогельзанг, В. Я. Аджемян, Б. С. Светлов. В сб. Горение и взрыв. М., «Наука», 1972.
8. G. A. McD. Gummings, A. R. Hall. 10-th Symposium (International) on Combustion The Combustion Institute, 1965.
9. J. Combourieu, G. Moreau a. o. AIAA J., 1970, 3, 594.

УДК 536.46

### ВЛИЯНИЕ СВЕТОВОГО ПОТОКА НА СКОРОСТЬ НЕСТАЦИОНАРНОГО ГОРЕНИЯ В ПЕРЕХОДНЫХ ПРОЦЕССАХ

В. Е. Зарко, В. Н. Симоненко, К. П. Куценогий  
(Новосибирск)

Непосредственное измерение мгновенной скорости горения предоставляет экспериментаторам новые возможности в области исследования механизма горения конденсированных веществ. Изучение перехода от зажигания к самоподдерживающемуся распространению фронта пламени, перехода с одного стационарного режима на другой, характера горения при периодическом и импульсном тепловых воздействиях на горящий образец — вот далеко не полный перечень экспериментальных задач, требующих своего решения. В настоящей работе сообщаются результаты экспериментов по измерению нестационарной скорости горения в переходных процессах при зажигании и при сбросе

светового потока. Опыты проводились при атмосферном давлении в среде азота и воздуха на образцах нитроглицеринового пороха Н с добавкой 1% сажи (Н+1%С) диаметром  $10 \div 16$  мм и длиной  $4 \div 10$  мм.

В большинстве экспериментальных и теоретических работ до недавнего времени исследовался только режим «устойчивого» зажигания [1]. При этом подразумевалось, что если в момент воспламенения убрать внешнее тепловое воздействие, система способна обеспечить самораспространение волны горения. Однако в опытах по зажиганию баллистических составов удалось установить, что существуют критические величины тепловых потоков [2, 3]. При нагреве пороха большими, чем критический, потоками воспламенение не переходит в стационарное горение, имеет место погасание. Кроме того, как оказалось, и при устойчивом зажигании, если не прекращать во-время действие внешнего теплового потока, также происходит погасание [4, 5]. Для объяснения сложного характера зажигания и выяснения причин, обуславливающих устойчивость горящей системы в переходных процессах, необходимо иметь сведения о поведении нестационарной скорости горения в этих условиях.

Измерение массовой скорости горения пороховых образцов проводилось с помощью емкостного датчика микроперемещений, подробно описанного в [6]. По первому способу непосредственно регистрировалось изменение (убыль) массы образца, откуда с помощью графического дифференцирования по известной площади горящей поверхности вычислялась скорость горения. Данный способ позволяет уверенно фиксировать относительно плавные изменения скорости, но не обеспечивает требуемого временного разрешения в экстремальных условиях — при резкой смене внешнего теплового потока и т. п. Более подробная информация о нестационарной скорости горения может быть получена с помощью измерения реактивной силы оттекающих от поверхности продуктов горения. Известно, что при изменении агрегатного состояния меняется количество движения потока вещества [7], а это обуславливает появление реактивной силы, направленной по нормали к поверхности раздела фаз. Если далее газообразные продукты вступают в химические реакции, приводящие к изменению температуры и молекулярного веса, то суммарную реактивную силу  $F$ , действующую на поверхность раздела, можно рассчитать по формуле

$$F(t) = [m(t)]^2 \cdot \left( \frac{1}{\rho_r} - \frac{1}{\rho} \right) \simeq [m(t)]^2 \cdot \frac{RT_r}{pM}, \quad (1)$$

Здесь  $m = \rho u$  — массовая скорость горения пороха;  
 $\rho_r$  и  $\rho$  — плотность газа и конденсированного вещества;  
 $T_r$  — температура (максимальная) газа;  $p$  — давление;  
 $M$  — молекулярный вес продуктов горения.

Из (1) следует, что линейная скорость горения  $u \sim \sqrt{F}$ , т. е. по изменению реактивной силы можно судить о характере поведения скорости горения. Преимуществом такого способа регистрации  $u$  является исключение операции графического дифференцирования, служащей источником дополнительных ошибок при обработке экспериментальных данных. Достоинства этого способа заключаются в высокой наглядности и простоте интерпретации, а также в повышенной чувствительности метода, поскольку непосредственно измеряемая величина связана квадратичной зависимостью с искомой. Для регистрации реактивной силы датчик микроперемещений необходимо повернуть на прямой угол относительно вертикали. При этом сила веса образца должна гаситься реакцией опор. В холостых опытах при отработке методики было показано, что при установке образцов длиной до 10 мм начальный вес вы-

зывает смещение нулевой линии при записи реактивной силы не более 1 мм при общем уровне сигнала 50÷80 мм.

Точно так же было доказано отсутствие заметного влияния на запись полезного сигнала воздействий от внешнего теплового потока и горячих газообразных продуктов горения (применялись эффективные системы экранировки и обтюрации). Относительная точность измерения реактивной силы составляла 5÷10%. Абсолютная градуировка датчика в режиме измерения силы  $F$  не производилась, поэтому экспериментальные данные обрабатывались в относительных единицах по сравнению с известным стационарным уровнем. Соответственно опыты проводились в постановке, включающей выход горячей системы на стационарный режим. Следует отметить приближенный характер зависимости  $u \sim \sqrt{F}$ , поскольку при записи (1) не учитывалась двухфазность потока продуктов горения пороха. Произвести этот учет в настоящее время практически невозможно из-за отсутствия соответствующих экспериментальных данных, однако можно достаточно обоснованно полагать, что возникающая методическая ошибка мала по величине и частично компенсируется при описанном способе обработки опытных результатов. Полоса частот системы регистрации, определенная по способу, описанному в [6] (датчик+электронный преобразователь+магнитоэлектрический прибор), была не менее 300 Гц. Запись исследуемых параметров процесса производилась на шлейфовом осциллографе марки Н-105.

Лучистый нагрев пороховых образцов осуществлялся с помощью излучательной печи (источники — угольная дуга и ксеноновая лампа). Равномерность освещения на площади сечения образца, оцененная с помощью фотодиода, работавшего в линейном режиме, была не менее 15%. Значения световых потоков, приводимые ниже, даны без учета на отражение от реагирующей поверхности и на поглощение в продуктах горения. Величины тепловых потоков варьировались в пределах 1,5÷10 кал/(см<sup>2</sup>·с). При анализе результатов пороха Н+1% С считался практически непрозрачным для излучения. Основанием для этого служит то, что по данным [2] эффективная глубина поглощения излучения при зажигании не превышает 80÷90 мкм и она должна быть еще меньшей при реагировании поверхностного слоя. Форма светового импульса задавалась последовательной работой шторного и центрального авиационного затворов. Время открытия (закрытия) шторного затвора не превышало 0,03 с, время закрытия центрального — 0,002 с. Последнее определялось с помощью фотодиода, устанавливаемого на месте образца.

**Выход скорости горения после воспламенения на стационарный режим при непрерывном облучении горячей поверхности характеризуется следующими особенностями.** Для анализа поведения нестационарной скорости горения при различных уровнях потока излучения воспользуемся обобщенным графиком временного хода изменения реактивной силы (рис. 1, 1, 2). В момент воспламенения происходит резкий рост нестационарной скорости горения. Время до-

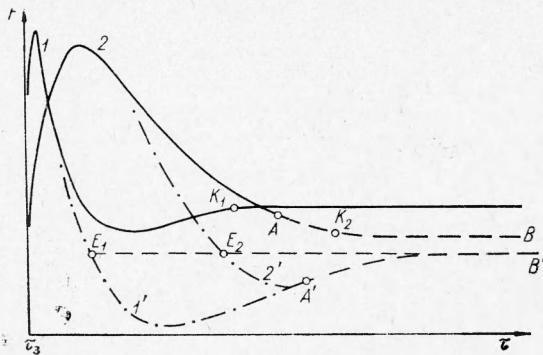


Рис. 1. Характер изменения реактивной силы при переходе от воспламенения к горению.

1, 2 — режим непрерывного облучения, потоки больше и меньше 4 кал/(см<sup>2</sup>·с) соответственно;  $K_1, K_2$  — достижение 90% стационарного уровня;  $AB$  — колебания с частотой 16–20 Гц;  $1', 2'$  — режим с отключением светового потока в момент воспламенения (уровень потоков прежний);  $E_1, E_2$  — переход через стационарный уровень;  $A'B'$  — колебания с частотой 16–20 Гц.

Таблица 1

Характеристики перехода от зажигания к горению при непрерывном облучении (среда — воздух)

Параметры	Единицы измерения	$q$ , кал/(см <sup>2</sup> ·с)					
		8	6	4	3	2	1.5
$u_{\max}$	мм/с	—	2	1,8	1,6	1,5	1,4
$u_{\min}$	»	1,2	1,1	1,0	1,0	0,95	0,85
$u_{\text{ст}}$	»	1,5	1,3	1,2	1,0	0,95	0,85
$\tau_{\max}$	с	0,03	0,04	0,06	0,1	0,1	0,2
$\tau_{\text{ст}}$	»	0,4	0,4	0,5	0,6	0,6	0,8
$\nu$	Гц	—	—	—	18÷20	18÷20	18÷20

Примечание.  $\tau_{\max}$  — время достижения максимальной скорости горения;  $\tau_{\text{ст}}$  — время достижения уровня стационарной скорости.

стижения максимума скорости зависит от величины действующего потока, оно тем больше, чем меньше значение потока. Затем наблюдается относительно плавное понижение до некоторого минимального уровня ( $u_{\min}$ ), равного или несколько меньшего уровня стационарной скорости горения ( $u_{\text{ст}}$ ) при данном тепловом потоке ( $q$ ). Последнее имеет место лишь при потоках  $\geq 4$  кал/(см<sup>2</sup>·с). Усредненные характеристики параметров исследуемого переходного процесса при горении на воздухе приведены в табл. 1. Практически  $\tau_{\text{ст}}$  определялось по моменту, когда скорость горения отличалась от стационарной не более, чем на 5%. Соответственно для реактивной силы это означало разницу в 10% (точки  $K$  на рис. 1).

Параметры горения регистрировались по обоим описанным выше методикам. В частности, скорость стационарного горения измерялась по записям убыли массы. Характер изменения нестационарной скорости в основном изучался по регистрациям реактивной силы. Поскольку главной целью исследований на данном этапе было установление качественных закономерностей и подробной физической картины явления, полная статистическая обработка опытных данных не производилась.

При облучении пороха потоками  $\geq 4$  кал/(см<sup>2</sup>·с) выход скорости горения на стационарный уровень происходит без заметных колебаний. При действии меньших потоков в переходном процессе и последующем горении под светом регистрируются почти регулярные пульсации переменной амплитуды, достигающие 10÷15% величины скорости горения в данный момент времени. Частота пульсаций  $\nu = 18 \div 20$  Гц.

Изучение поведения нестационарной скорости горения при непрерывном облучении образца дает возможность классифицировать опыты по сбросу светового потока в различные моменты после воспламенения. Для использовавшихся в экспериментах значений тепловых потоков время достижения максимальной скорости горения (см. табл. 1) составляет 0,03÷0,2 с, а время установления стационарного режима — 0,4÷0,8 с. Указанные времена относятся к опытам с максимальным и минимальным световыми потоками соответственно. Таким образом, эксперименты с прекращением облучения через 0,02÷0,05 с после воспламенения можно трактовать как самостоятельный выход горячей системы на режим горения (погасания) без действия света, а с отсечкой облучения через 0,6÷0,9 с — как переход с одного стационарного режима на другой.

Изучение поведения скорости горения при прекращении действия теплового потока сразу после воспламенения проводилось с помощью следящей системы, отсекающей световой поток по достижении наперед заданной температуры на облучаемой поверхности. Получить нулевые времена задержки потока излучения практически невозможно, по-



этому для анализа отбирались осциллограммы согласно сформулированному выше правилу. Характерной особенностью кривой изменения скорости горения является непрерывное понижение после прохождения максимального значения (см. рис. 1, 1', 2'). Глубина спада скорости зависит от величины поджигающего потока. Она тем больше, чем больше поток. Скорость спадает практически до нулевого уровня<sup>1</sup> при потоках  $\geq 4$  кал/(см<sup>2</sup>·с). Если зажигание производится в азоте, за этим следует полное погасание пороха. На воздухе погасание при потоках  $\leq 10$  кал/(см<sup>2</sup>·с) зарегистрировать не удается — скорость горения начинает постепенно возрастать и по истечении 0,5÷1,0 с достигает стационарного уровня. При этом наблюдаются аналогичные упоминавшимся выше колебания с частотой 16÷20 Гц.

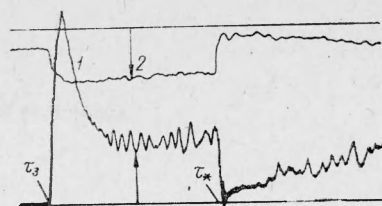


Рис. 2. Осциллограмма записи реактивной силы и потока излучения ( $q=2,6$  кал/(см<sup>2</sup>·с).

1 — реактивная сила; 2 — суммарный световой поток (дуга+пламя);  $\tau_z$  — зажигание;  $\tau_*$  — отключение внешнего светового потока.

**Поведение скорости при переходе с режима горения при облучении на режим самоподдерживающегося горения** имеет следующие качественные закономерности. При отключении внешнего нагревающего потока мгновенная скорость горения резко падает (рис. 2, 1) до уровня, зависящего от величины первоначального потока. При действии потоков, превышающих  $\sim 3,5$  кал/(см<sup>2</sup>·с), происходит спад скорости практически до нуля, при меньших потоках — до некоторого конечного значения, тем большего, чем меньше величина потока. В среде азота вслед за понижением скорости до нулевого уровня непременно реализуется погасание пороха. Если опыты проводятся на воздухе, полное погасание при потоках  $\leq 10$  кал/(см<sup>2</sup>·с) не наблюдается. Некоторые характеристики переходного процесса при горении в воздушной среде приведены в табл. 2. Особенностью поведения кривой скорости горения в опытах на воздухе является постепенный рост с некоторого минимального уровня до стационарного. Вначале он происходит без заметных колебаний, а затем с колебаниями значительной амплитуды (до 30% значения скорости в данный момент). Приближенные значения времен перехода скорости горения с минимального на стационарный уровень приведены в строке  $\tau_{нд}$ . Примерная частота колебаний скорости ( $\nu$ ) в переходном процессе и в режиме самоподдерживающегося горения составляет 16÷20 Гц. Темп изменения (спада) скорости горения специ-

Таблица 2

Характеристики перехода с режима горения при облучении на режим самоподдерживающегося горения (среда — воздух)

Параметры	Единицы измерения	$q$ , кал/(см <sup>2</sup> ·с)						
		9	7	5	4	3	2	1,5
$u_{ст}$	мм/с	1,55	1,4	1,3	1,2	1,0	0,95	0,85
$u'_{ст}$	»	0,75	0,75	0,75	0,75	0,75	0,75	0,75
$u_{min}$	»	0	0	0	0,1	0,20	0,30	0,35
$\tau_{нд}$	с	1,5	1,3	1,0	0,9	0,7	0,5	0,5
$\nu$	Гц	17÷19	17÷19	18÷20	17÷19	16÷18	16÷18	16÷18

Примечание.  $u_{ст}$  — скорость при облучении,  $u'_{ст}$  — скорость без облучения;  
 $u_{min}$  — минимальное значение скорости.

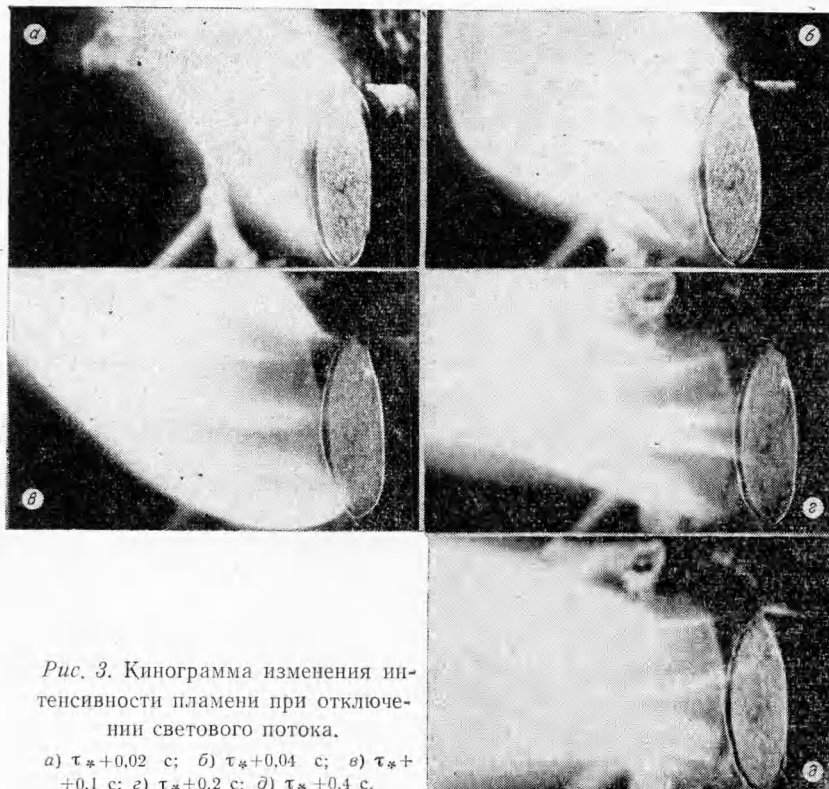
<sup>1</sup> Практический нулевой уровень задается чувствительностью способа измерения.

ально не измерялся. Однако из имеющихся осциллограмм видно, что в условиях отсекаания светового потока центральным затвором  $\sim 50\%$  полного перепада скорости происходит за время не более 0,01 с.

### Обсуждение результатов

Проведенные в настоящей работе измерения нестационарной скорости горения позволяют объяснить ранние результаты, полученные с помощью термпарных измерений [8] и в режиме «да—нет» [5] и построить физически более обоснованную феноменологическую картину поведения горячей системы в переходных процессах.

Глубокие спады скорости горения при отсечках светового потока полностью согласуются с замеченным в аналогичных условиях сильным понижением с последующим затяжным подъемом температуры в газовой фазе вблизи реагирующей поверхности [8]. Важную дополнительную информацию о характере реагирования пороха при переходе с режима горения при облучении на режим самоподдерживающегося горения удается получить с помощью фото- и киносъемки. Из рассмотрения кинограммы процесса перехода (рис. 3) следует, что непосредственно сразу (съемка велась камерой «Конвас-автомат» с частотой 50 кадр/с) после отключения светового потока интенсивность газовыделения с поверхности резко падает, пламя начинает «всплывать» вверх из-за конвекции (поверхность горения расположена вертикально). Через 0,3÷0,5 с начинается постепенное повторное разгорание пламени. При этом наблюдается картина струйного истечения с поверхности, активное реагирование происходит в локальных областях диаметром несколько миллиметров. Описанное поведение пороха соответствует опы-



там на воздухе при действии потоков, превышающих критический ( $\sim 4$  кал/(см<sup>2</sup>·с)).

Если аналогичные опыты производятся в азоте, происходит погасание пороха, и представляется возможность исследования структуры поверхности погашенного образца. Характерной особенностью погасшей поверхности является сплошная сетка пузырей, имеющих стенку  $\sim 1$  мкм и диаметр 100 мкм и более. Точно такую же картину дают цветные снимки поверхности образцов пороха, сделанные при импульсной подсветке через 0,02–0,05 с после отсечки светового потока в опытах на воздухе, когда наблюдается повторное разгорание. Образование слоя относительно крупных пузырей на реагирующей поверхности можно связать с резким понижением скорости горения и соответствующим ему нарушением массового баланса, поскольку при быстром изменении действующего теплового потока вследствие большой инерционности теплового слоя в приповерхностном слое пороха реализуются аномально высокие скорости газовой выделения.

Необходимо заметить, что горение не прекращается мгновенно при сбросе светового потока, спад скорости горения (см. рис. 2) происходит в два этапа; вначале резко на большую величину (40–50% разности уровней), затем более плавно понижается до минимального уровня. Это согласуется и с визуальными наблюдениями за изменением интенсивности газового пламени (неполное исчезновение пламени над поверхностью). В опытах на воздухе дальнейшее развитие реакций горения обеспечивается за счет дополнительного тепловыделения, которое может происходить как гетерогенно (на поверхности), так и в газовой фазе (полупродукты разложения пороха) при диффузионном и конвективном подводе кислорода. Экспериментальные данные с достаточной убедительностью свидетельствуют о влиянии окислительной среды на устойчивость переходных процессов при горении нитроглицеринового пороха, однако относительная роль и механизм взаимодействия реакций в конденсированной и газовой фазах остаются до сих пор невыясненными и требуют дальнейших исследований.

Интересно сопоставить расчетную величину прогретого до воспламенения слоя с экспериментально определяемой толщиной приповерхностного слоя, выгорающего с повышенной начальной скоростью. Анализировались опыты с мгновенным после воспламенения отключением светового потока. Толщину слоя находили из записей убыли массы образца по величине сгоревшей навески пороха в момент перехода нестационарной скорости горения через стационарный уровень. Эта экспериментальная процедура проиллюстрирована на рис. 1 (точки  $E$  на кривых 1' и 2'). Расчет прогретого слоя  $h$  проводился по формуле  $h = \sqrt{a \cdot \tau_z}$  [2], где  $a$  — температуропроводность конденсированной фазы,  $\tau_z$  — время нагрева. В пределах погрешностей измерений расчетные и экспериментальные величины совпали. Например: при  $q = 2,7$  кал/(см<sup>2</sup>·с)  $h_{\text{расч}} = 0,41$  мм,  $h_{\text{эксп}} = 0,48$  мм; при  $q = 4,3$  кал/(см<sup>2</sup>·с)  $h_{\text{расч}} = 0,26$  мм,  $h_{\text{эксп}} = 0,27$  мм; при  $q = 5,2$  кал/(см<sup>2</sup>·с)  $h_{\text{расч}} = 0,22$  мм,  $h_{\text{эксп}} = 0,20$  мм.

Измерения нестационарной скорости горения в целом, как нам кажется, подтверждают феноменологию Зельдовича—Новожилова: мгновенная скорость горения следит за изменением поверхностного градиента температуры, устойчивость переходного процесса в основном зависит от перераспределения тепла в прогретом слое конденсированной фазы. Вместе с тем некоторые экспериментальные факты не находят пока простого объяснения в рамках теплового подхода. Неясна до конца природа критического потока при зажигании. Из общих соображений следует, что величина этого потока должна быть приблизительно равна тепловому потоку, имеющему место в стационарном горении ( $\sim 8 \div 10$  кал/(см<sup>2</sup>·с) при 1 атм для нитроглицеринового пороха). Однако экспериментальная величина меньше в 2,5–3 раза. Согласно ран-

ним представлениям при зажигании потоками, больше критического [2, 3], должен реализоваться режим вынужденного пиролиза. Тем не менее, по крайней мере до потоков величиной  $10 \text{ кал}/(\text{см}^2 \cdot \text{с})$ , наблюдаемый характер зажигания остается качественно неизменным (ускоренное начальное выгорание, синхронное появление светящегося пламени).

Наблюдения за выходом скорости горения на стационарный режим после зажигания и после отсечки светового потока свидетельствуют о наличии собственных колебаний скорости с характерной частотой  $15 \div 20 \text{ Гц}$ . В то же время рассчитанная по толщине теплового слоя собственная частота колебаний пороха должна равняться  $\sim 6 \text{ Гц}$ . Экспериментальное значение превышает ее в 3 раза, и это может служить указанием на необходимость уточнения толщины зоны прогрева, определяющей собственные колебания теплового профиля. Не исключено также, что на регистрируемую частоту колебаний скорости горения оказывает влияние локальный характер реагирования на горящей поверхности, который легко заметить на фото- и киограммах.

Целью дальнейших исследований должно явиться количественное сопоставление экспериментальных и расчетных данных по нестационарной скорости горения. Это потребует расширения класса исследуемых веществ и диапазона условий проведения испытаний. Вместе с тем очевидно, что только комплексное применение различных методик может дать полную и объективную информацию о процессах горения.

Авторы считают своим долгом отметить большую роль В. Ф. Михеева, под руководством которого начиналась разработка методики и проводились первые измерения нестационарной скорости горения.

*Поступила в редакцию  
20/IX 1974*

#### ЛИТЕРАТУРА

1. A. G. Merzhanov, A. E. Averson. Comb. Fl., 1971, 16, 1.
2. В. Ф. Михеев. Канд. дисс., ИХКиГ, Новосибирск, 1970.
3. В. Е. Зарко, В. Ф. Михеев и др. В сб. Горение и взрыв. М., «Наука», 1972, с. 34.
4. T. J. Ohlemiller, L. H. Caveny et al. XIV Symp. on Comb., Pittsburgh, Pennsylvania, 1973, p. 1297.
5. В. Ф. Михеев, Ю. В. Левашов. ФГВ, 1973, 9, 4, 506.
6. В. Ф. Михеев, С. М. Борин. ФГВ, 1973, 9, 2, 327.
7. Милфис, Бэер, Райян. РТК, 1972, 10, 10, 22.
8. В. Е. Зарко. Канд. дисс., ИХКиГ, Новосибирск, 1971.

УДК 536.46:536.516.2

### О ТОЧНОСТИ ИЗМЕРЕНИЯ ПЛОСКИМИ ЗОНДАМИ ТЕМПЕРАТУРНЫХ ПРОФИЛЕЙ ПРИ ГОРЕНИИ ПОРОХОВ

*Ю. В. Чернов  
(Москва)*

До последнего времени основным средством экспериментального исследования температурных профилей прогретого слоя твердых топлив и аналогичных им аблирующих материалов остаются плоские П-образные металлические зонды (термопары и термометры сопротивления). Поскольку теплофизические характеристики зондов и исследуемых ма-