

Н. Г. Альков, В. Н. Матвеев, А. А. Тулунов

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИЗУЧЕНИЕ РАСПРОСТРАНЕНИЯ ФРОНТА ГОРЕНИЯ ПО ПОВЕРХНОСТИ КОНДЕНСИРОВАННОГО ВЕЩЕСТВА ОТ ПЕРВОНАЧАЛЬНОГО ОЧАГА ГОРЕНИЯ

Представлены экспериментально полученные значения скорости распространения фронта горения конденсированного вещества в глухом зазоре в зависимости от высоты зазора и среднего давления. Установлено, что фронт горения может распространяться как монотонно (что характерно для относительно высоких значений давления и зазора), так и в результате появления и развития дополнительных очагов горения на некотором удалении от основного фронта горения. При низких уровнях давления, главным образом при малой высоте зазора, наблюдалось неустойчивое распространение фронта горения по поверхности конденсированного вещества.

Распространение фронта горения по поверхности конденсированного вещества определяется совокупностью механизмов передачи тепла в поверхностный его слой и реализованным источником тепловой энергии. При распространении горения по открытой поверхности, в том числе в глухих зазорах, от первоначально созданного очага горения в условиях отсутствия других источников подвода тепла следует рассматривать два механизма [1]: конвективная передача тепла, обусловленная движением газа над поверхностью конденсированного вещества, которое генерируется оттекающими продуктами сгорания из области над горячей поверхностью, и излучение от газообразных продуктов сгорания, сосредоточенных в этой области. Значимость того или иного механизма определяется условиями организации сжигания образца.

В работе [2] предложена модель распространения фронта горения, основанная на анализе прогрева поверхностного слоя вещества под действием излучения из области, занимаемой продуктами сгорания над горячей поверхностью. На основе численного решения задачи о зажигании конденсированного вещества в рамках твердофазной модели [3] показано, что скорости распространения фронта горения в этом случае хорошо соответствуют таковым при горении небронированных образцов в бомбах с инертной атмосферой, характеризующимся образованием конической поверхности горения. Расчетами показано, что скорость распространения горения по поверхности вещества типа пороха H в зависимости от внешних условий $u = 0,01 \div 0,2$ м/с. Эта величина зависит от геометрических размеров зоны, занимаемой излучающими продуктами сгорания, давления среды p и особенно от температуры t продуктов сгорания.

С целью определения действительных значений скорости распространения фронта горения по поверхности образца из пороха H при различных условиях и проверки предложенной в [2] модели распространения горения проведены эксперименты, результаты которых изложены в данной работе.

Использовалась установка, состоящая из цилиндрической камеры-ресивера (диаметр $d = 140$, длина $l = 260$ мм), снабженной соплом с вскрывающейся мембраной. К ресиверу присоединена плоская камера (высота $h = 44$, ширина $\Delta = 22$, $l = 200$ мм), имеются прозрачное окно ($\Delta = 35$, $l = 156$ мм) из плексигласа и герметизируемые отверстия для выводов электрозапала и термопар. Образец пороха H ($\Delta = 20$, $h = 10$, $l = 108$ мм) располагался в плоской камере и боковой поверхностью прижимался к прозрачному окну. Электрозапал в виде спирали накалывания размещался на исследуемой поверхности образца вблизи торца, обращенного в сторону ресивера. В большей части экспериментов на поверхности образца в его средней части размещались две термопары из хромель-алюмеля с толщиной спая 5—9 мкм на расстоянии

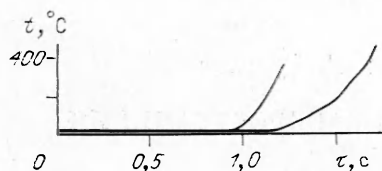


Рис. 1. Характерные кривые термопарных измерений при зазоре $h = 5$ мм и $p = 2,35$ МПа.

60 мм одна от другой по длине образца. С целью организации контролируемого зазора над поверхностью образца использовались специальные сменные вставки в плоскую камеру, устанавливаемые в верхней части ее полости.

Перед экспериментом камеры наполнялись инертным газом до заданного уровня давления. В процессе эксперимента регистрировались изменения давления в ресивере и плоской камере, температура поверхности образца в двух сечениях и синхронно проводилась киносъемка процесса распространения фронта пламени камерой ЛКС-2 через прозрачное окно. Опыты проводились при комнатной температуре образца для ряда зазоров над зажигаемой поверхностью пороха высотой 5,19 и 32 мм и давлении в камере 0,55—5,45 МПа.

Для определения скорости распространения фронта горения u по поверхности образца использовались показания термопар и кинограммы. Величина u на основе термопарных измерений определялась по разности времен достижения определенного значения температуры поверхности образца в местах установки термопар и, таким образом, характеризовалась некоторым средним значением, реализующимся в средней области образца. В качестве температуры зажигания пороха принимались $t = 180 \div 240$ °С, однако полученные средние скорости распространения $u_{\text{ср}}$ в этом диапазоне температур отличались несущественно, в результате приняты значения $u_{\text{ср}}$, соответствующие $t = 200$ °С.

Характерные показания термопарных измерений представлены на рис. 1 и позволяют качественно судить о достоверности регистрации температуры поверхности в диапазоне ее изменения при прогреве поверхности образца.

Кинограммы процесса давали качественную картину и количественную информацию о процессе развития зажигания. О зажигании поверхности судили по появлению и развитию светящихся областей на поверхности образца, а скорости распространения горения определялись как в виде средних величин на фиксированной базе (с помощью специальных меток на прозрачном окне), соответствующей расположению термопар, так и в виде «мгновенных» значений, определяемых по кадрам (рис. 2).

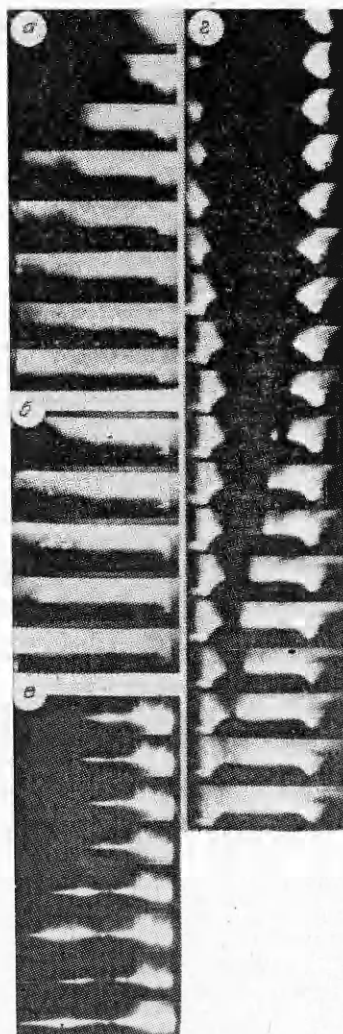
Значения средних скоростей распространения фронта горения по поверхности образца, определяемые указанными выше способами, и аппроксимирующие их кривые для принятых величин зазоров представлены на рис. 3.

Анализ результатов показал, что в целом (за исключением отдельных опытов при высоте зазора $h = 5$ мм) значения $u_{\text{ср}}$, полученные по показаниям термопар и кинограмм, соответствуют друг другу. Скорость распространения фронта горения для одного значения h растет с повышением давления и при постоянном p уменьшается с увеличением h .

Качественный анализ результатов киносъемки показал характерные особенности развития процесса распространения горения в зависимости от условий эксперимента. Во-первых, монотонное движение светящегося фронта наблюдается не всегда и в большей степени соответствует высоким уровням давления в камере и величинам зазора (см. рис. 2, а). В большинстве случаев развитие горения сопровождается появлением одного или нескольких очагов на некотором удалении от основного фронта горения (в среднем 15 мм). Дальнейшее развитие горения в опытах при относительно больших p и h характеризуется

Рис. 2. Типичные фрагменты кинограмм.

a — монотонное продвижение фронта пламени, $h = 19$ мм, $p = 4,0$ МПа; *b* — появление дополнительных очагов горения, их развитие и соединение, $h = 19$ мм, $p = 4,1$ МПа; *в* — неустойчивое горение, $h = 5$ мм, $p = 1,7$ МПа; *г* — возгорание противоположного запалу конца образца, $h = 32$ мм, $p = 3,0$ МПа.



увеличением этих очагов и их объединением с основным фронтом (см. рис. 2, *b*).

Во-вторых, при $h = 5$ мм светящийся фронт движется неустойчиво: достаточно быстро появляется свечение над поверхностью образца впереди основного фронта, которое далее затухает (см. рис. 2, *в*). При этом отсутствует свечение непосредственно на поверхности образца, характерное для устойчивого очага горения. Складывается впечатление, что свечение идет при сгорании продуктов газификации пороха на удалении от его поверхности. «Мгновенные» скорости распространения такого фронта достигают 1 м/с. Такое неустойчивое распространение соответствует низким уровням давления.

В-третьих, при $h = 32$ мм распространение фронта горения идет в большинстве случаев монотонно, однако после формирования зоны горения в начале образца в ряде случаев появляется устойчивый очаг горения на противоположном его конце (см. рис. 2, *г*).

Если по полученным данным невозможно установить связь между появлением очагов горения в средней части образца и механизмом передачи тепла в его поверхность, то очаг горения в конце образца, по-видимому, связан с развитием циркуляционного течения продуктов сгорания в зазоре. Это утверждение подтверждено в эксперименте с $h = 32$ мм, в котором в средней части верхней пластины имелась продольная перегородка. Перегородка разрушила складывавшуюся ранее структуру циркуляционного течения и, соответственно, зажигание удаленного торца образца. Однако дополнительный очаг горения сформировался на поверхности образца в районе перегородки на расстоянии 23 мм от основного фронта горения.

Анализ полученных результатов показывает, что повышение давления и уменьшение зазора приводит к интенсификации течения в зазоре, связанного с его заполнением. При обработке результатов для выяснения ведущих механизмов передачи тепла в поверхность образца использованы термопарные измерения. Для этого на основе приближенного решения одномерного уравнения теплопроводности решалась обратная задача прогрева поверхностного слоя образца для определения теплового потока (рис. 4). Результаты решения показывают, что тепловой поток в начальный период прогрева $q = (1,5-4) \cdot 10^5$ Вт/м² и с течением времени уменьшается в среднем на $(0,5-1) \cdot 10^5$ Вт/м² в зависимости от p и h . При приближении фронта горения к любой из термопар q начинает возрастать и в момент зажигания увеличивается в $\sim 2-3$ раза по сравнению с минимальным значением, реализующимся в данном опыте. Чем больше h , тем больше возрастает q и длиннее период времени от минимума до момента зажигания.

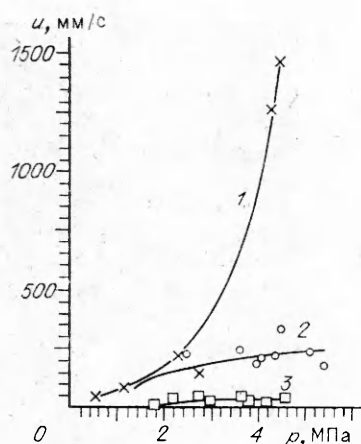


Рис. 3. Экспериментальные значения и аппроксимирующие их зависимости скорости распространения фронта горения по поверхности образца от давления.
 h , мм: 1 — 5, 2 — 19, 3 — 32.

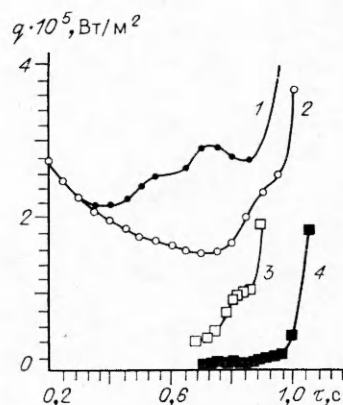


Рис. 4. Тепловые потоки, действующие на термопары, $h = 19$ мм и $p = 3,7$ МПа.
 1, 2 — полные тепловые потоки, падающие на первую и вторую термопары соответственно; 3, 4 — их радиационные составляющие.

На основании измерений температуры поверхности образца и давления в камере можно предположить, что период уменьшения теплового потока характеризуется главным образом развитием конвективной передачи тепла в поверхность образца, при этом уменьшение q обусловлено повышением температуры поверхности и снижением интенсивности заполнения газом зазора. Дальнейшее повышение q естественно связано с подходом фронта горения к точке поверхности образца, в которой расположена термопара, и существенным вкладом в процесс теплоотдачи излучения из зоны, занимаемой горячими продуктами сгорания. Протяженность области существенного вклада излучения в суммарный тепловой поток соизмерима с высотой зоны излучения, т. е. с высотой зазора, что подтверждается результатами расчетов потока тепла излучением на основе соотношений из [2] и измеренных средних скоростей распространения фронта горения (см. рис. 3).

Расчеты теплового излучения и экспериментальные значения теплового потока, определенного по термопарным измерениям, хорошо согласуются по характеру изменения и основным параметрам (продолжительность воздействия и уровень величин). Отсюда следует, что в экспериментах реализуются вполне сопоставимые интенсивности теплопередачи в результате конвекции и излучения, причем конвективный механизм теплопередачи существен на начальной стадии развития зажигания и обеспечивает предварительный прогрев поверхностного слоя конденсированного вещества, а передача тепла излучением становится ведущей в области, соизмеримой с высотой зоны излучения, в период, предшествующий непосредственно зажиганию. Механизм конвективной передачи тепла связан главным образом с заполнением зазора газом при повышении давления.

Таким образом, в работе получены экспериментальные значения скорости распространения фронта горения по поверхности пороха H в глухом зазоре протяженностью 108 мм и высотой 5, 19 и 32 мм при $p = 0,55 \div 5,45$ МПа. Установлено, что горение может распространяться как монотонно от первоначального очага (что характерно при относительно высоких уровнях давления и высоте зазора), так и в результате развития дополнительных очагов горения на некотором удалении от основного фронта. При относительно малых p наблюдается неустойчивый характер распространения фронта зажигания, реализующийся главным образом при небольшой высоте зазора. Совокупность экспериментальных результатов и расчетных оценок позволяет сделать вывод о под-

тверждении предложенной ранее модели распространения фронта горения по поверхности конденсированного вещества в результате поглощения его поверхностью излучения из области, занимаемой газообразными продуктами сгорания над его горячей поверхностью.

ЛИТЕРАТУРА

1. Андреев К. К. Термическое разложение и горение взрывчатых веществ.— М.: Наука, 1966.
2. Альков Н. Г., Макаров В. Б. // Материалы IX Всесоюз. симпозиума по горению и взрыву. Горение конденсированных систем.— Черноголовка: ОНХФ АН СССР, 1989.— С. 8.
3. Вилюнов В. Н. Теория закипания конденсированных веществ.— Новосибирск: Наука, 1984.

г. Москва

Поступила в редакцию 10/VII 1990,
после доработки — 29/VII 1991

УДК 662.612.2

О. П. Коробейничев, Н. Е. Ермолин, А. А. Чернов,
И. Д. Емельянов

СТРУКТУРА ПЛАМЕНИ, КИНЕТИКА И МЕХАНИЗМ ХИМИЧЕСКИХ РЕАКЦИЙ В ПЛАМЕНИ СМЕСЕВОГО СОСТАВА НА ОСНОВЕ ПЕРХЛОРАТА АММОНИЯ И ПОЛИБУТАДИЕНОВОГО КАУЧУКА

С помощью метода зондовой масс-спектрометрии исследована структура пламени гомогенизированного смешанного состава на основе перхлората аммония с размером частиц < 50 мкм и полибутадиенового каучука с концевыми карбоксильными группами с соотношением компонентов, близким к стехиометрическому при давлении 0,08 атм. Определены профили температуры и концентраций 17 стабильных компонентов в пламени. Проведено моделирование структуры пламени рассматриваемого и ранее исследованного смешанных составов на основе решения системы дифференциальных уравнений, описывающих течение реагирующего многокомпонентного газа с учетом теплопроводности и диффузии, а также кинетического механизма, содержащего 58 элементарных стадий и 35 компонентов. Получено удовлетворительное согласие расчетных и экспериментальных данных. Произведена оценка констант скорости некоторых малоизученных или совсем не изученных стадий. Полученные данные могут быть использованы при создании модели горения смешанных твердых топлив на основе ПХА.

Одна из наиболее важных задач теории горения — исследование химии горения, кинетики и механизма химических реакций в пламенах на уровне элементарных стадий. Эти знания необходимы для создания реалистичных моделей горения, обладающих предсказательной силой. В то же время если химия газофазного горения недостаточно изучена, то знания о химии горения конденсированных систем (КС) вообще и смешанных твердых топлив (СТТ) на основе перхлората аммония (ПХА) в частности находятся лишь в зачаточном состоянии. Это связано как с экспериментальными трудностями исследования химической структуры пламени КС, так и с недостатком сведений о кинетике многих важных элементарных стадий в этих пламенах.

В работах [1—3] сформулирован и реализован подход к изучению химии горения в пламенах КС. В основе его лежит сочетание экспериментального исследования химической структуры пламени КС методом зондовой масс-спектрометрии с теоретическим моделированием этой структуры путем решения уравнений, описывающих течение реагирующего многокомпонентного газа с учетом многостадийного кинетического механизма. При этом в качестве граничных условий используются экспериментальные значения концентраций веществ и температур на по-