

16. Либрович В. Б., Ярин А. Л. О влиянии механических напряжений на скорость горения смесевых топлив // ФГВ.— 1982.— 18, № 5.— С. 58.
17. Регель В. Р., Слуцкер А. И., Томашевский Э. К. Кинетическая природа прочности твердых тел.— М.: Наука, 1974.— 560 с.
18. Журков С. Н. К вопросу о физической основе прочности // ФТТ.— 1980.— 22, № 11.— С. 3344—3349.
19. Задорина Е. Н., Исаков Г. Н. Влияние напряженно-деформированного состояния на термостойкость и долговечность полимеров при конвективном теплообмене // Докл. АН СССР.— 1988.— 300, № 3.— С. 608.
20. Мержанов А. Г., Дубовицкий Ф. И. К теории стационарного горения пороха // Там же.— 1959.— 129, № 1.— С. 153—156.

г. Новосибирск

УДК 536.46

А. Г. Князева, В. Е. Зарко

ЧИСЛЕННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ПЕРЕХОДНЫХ ПРОЦЕССОВ ПРИ ЗАЖИГАНИИ ДВУХКОМПОНЕНТНЫХ ТОПЛИВ ИНТЕНСИВНЫМИ ТЕПЛОВЫМИ ПОТОКАМИ

Сформулирована модель зажигания квазигомогенного топлива с двумя идеальными перемешанными компонентами, которые независимо разлагаются в конденсированной фазе и реагируют между собой в газовой фазе. Модель описывает распространение тепла в конденсированном веществе и газе и диффузию компонентов в газе. Численно исследованы в простейшем варианте для монотоплива процессы перехода от зажигания к самоподдерживающемуся горению при импульсном действии теплового потока. Показано, что критическое значение теплового потока для устойчивого зажигания монотоплива и форма полуострова устойчивого зажигания в координатах время нагрева — поток тепла зависят от вида используемого критерия погасания.

Математическое моделирование переходных процессов при зажигании твердых топлив не теряет своей актуальности, о чем свидетельствует ряд недавно опубликованных работ [1—3]. Наибольший интерес представляет зажигание интенсивными тепловыми потоками, когда реализуются высокие температурные градиенты в конденсированной фазе (к-фазе) и момент инициирования интенсивных экзотермических реакций в топливе совпадает либо даже запаздывает относительно момента начала движения реагирующей поверхности. Объективное описание таких явлений требует создания достаточно сложных математических моделей.

Цель настоящей работы — построить модель зажигания двухкомпонентного твердого топлива, учитывающую химические превращения в конденсированной и газовой фазах и описывающую переходные процессы при нестационарном теплоподводе. Для выявления качественной картины явления проводились численные расчеты при вариации параметров задачи. Особое внимание уделено зажиганию интенсивными потоками тепла.

Рассмотрим процесс нагрева с поверхности и химического превращения квазигомогенного твердого топлива, состоящего из двух тщательно перемешанных мелкодисперсных компонентов, что позволяет использовать осредненные по объему теплофизические характеристики к-фазы. Каждый компонент твердого топлива независимо от другого разлагается в к-фазе по реакции первого порядка до образования газообразного продукта. Попадая в газовую фазу, продукты твердофазных реакций мгновенно перемешиваются и реагируют между собой до образования конечного продукта по реакции второго порядка.

Тепловая часть задачи описывается уравнениями теплопроводности и химической кинетики, записанными в системе координат, движущейся

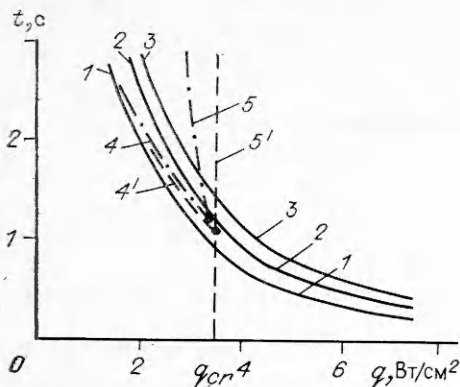


Рис. 1. Зависимость характерных времен зажигания от теплового потока. 1 — t_i (время индукции), 2 — t_s (начало движения поверхности); 3 — t_g (время достижения максимума тепловыделения в газе); 4, 4' — t_* (нижняя граница устойчивого зажигания); 5, 5' — t_{*1} (верхняя граница устойчивого зажигания).

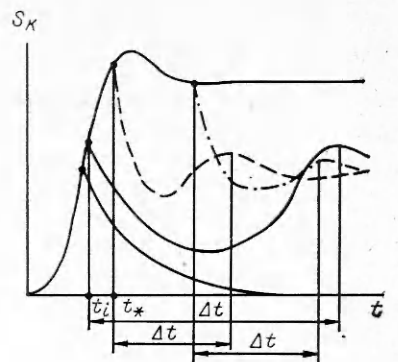


Рис. 2. Характер изменения во времени интенсивности тепловыделения в конденсированной фазе.

с поверхностью раздела фаз. Поверхность считается плоской и определяется в численном счете по условию достижения глубины превращения в к-фазе, равной некоторому заданному значению (0,95). На поверхности выполняются условия сопряжения по диффузионным и тепловым потокам, а также равенство температур и массовых скоростей горения газовой и конденсированной фаз. В общем случае к теплодиффузионным уравнениям должны быть добавлены уравнения движения, неразрывности и состояния. Полагая, что давление в системе быстро устанавливается, скорость газа будем находить из уравнения неразрывности, а плотность определять из уравнения состояния. В этом случае давление считается внешним параметром.

Полная система уравнений с граничными и начальными условиями здесь не приводится в связи с ограниченным объемом статьи. Для удобства численного счета сделано преобразование координат, переводящее бесконечную область в конечную. Задача решалась по неявной разностной схеме первого порядка методом прогонки с итерациями на каждом слое. Ниже приведены результаты расчетов в простейшей постановке.

Рассмотрим зажигание постоянным тепловым потоком моноотоплива (однокомпонентного вещества), свойства которого в к-фазе близки к свойствам перхлората аммония. В газовой фазе протекает реакция второго порядка с энергией активации 90 кДж/моль. Теплофизические свойства вещества в газовой и к-фазе приняты постоянными, тепловое расширение газа учтено косвенным образом, согласно условию:

$$\rho_g D_g = \text{const},$$

где ρ_g — плотность; D_g — коэффициент диффузии газовой фазы.

На рис. 1 представлены зависимости характерных времен зажигания от величины теплового потока. Время индукции зажигания в к-фазе t_i определяли по перегибу на кривой зависимости температуры поверхности от времени. При этом скорости тепловыделения в газовой и к-фазе составляют менее половины своих максимальных значений. Времени t_s начала движения поверхности (достижение 95 % глубины превращения в к-фазе) соответствует кривая 2, а времени t_g достижения максимума тепловыделения в газе — кривая 3.

Перечисленные характерные времена реализуются при действии внешнего теплового потока в течение неограниченного промежутка времени. С теоретической и практической точек зрения большой интерес представляет также картина зажигания при действии импульса теплового потока различной амплитуды и длительности. Расчеты показывают,

что если производить мгновенное отключение потока в момент t_i , зажигание не реализуется, происходит остывание топлива. Однако при отключении небольших тепловых потоков в момент $t_* = t_i + \Delta t$ (где $\Delta t > 0$) после некоторого понижения температуры поверхности происходит зажигание (самовоспламенение) топлива и реализуется переход к самоподдерживающемуся горению (рис. 1, 4). При повышении интенсивности внешнего нагрева достигается значение критического теплового потока q_{cr} , отключение которого при любых $\Delta t > 0$ приводит к остыванию (погасанию) топлива. Очевидно, положение кривой 4 относительно кривых 1—3 и значение q_{cr} зависят от задания критерия зажигания в том или ином виде.

С целью количественного определения критерия зажигания рассмотрим (рис. 2) качественную картину изменения во времени суммарной интенсивности тепловыделения в к-фазе S_c :

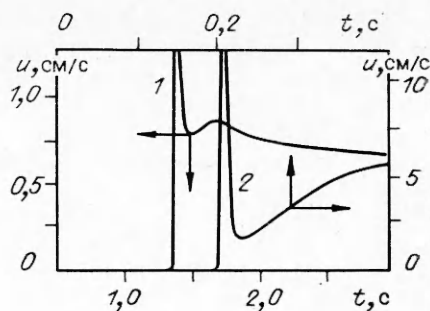
$$S_c \propto \text{const} \cdot \int (Y_{c,0} - Y_c) \exp(-E/RT) dx,$$

которая более информативна, чем временной ход изменения температуры поверхности. Здесь $Y_{c,0}$ и Y_c — начальная и текущая концентрации реагента в к-фазе; E — энергия активации реакции в к-фазе. Из рис. 2 видно, что при отключении теплового потока сразу после наступления момента t_i ($\Delta t \rightarrow 0$) длительность переходного периода чрезвычайно велика, а при увеличении времени нагрева она уменьшается и достигает в конечном итоге постоянной величины, соответствующей переходу со стационарного режима горения при облучении на самоподдерживающийся режим горения. В качестве критерия зажигания можно выбрать осуществление перехода к самоподдерживающемуся горению за время $\Delta t_1 = \text{const} \cdot t_i$ либо $\Delta t_1 = \text{const} \cdot t_*$ и т. п. При этом Δt_1 отсчитывается для определенности с момента отключения внешнего теплового источника до момента достижения первого максимума либо наперед заданного уровня на кривой $S_c(t)$.

Минимальное время действия теплового потока, обеспечивающее выход системы за выбранный конечный промежуток времени на режим самоподдерживающегося горения, и будет соответствовать t_* (см. рис. 1, 4). Далее, согласно результатам численного счета, с увеличением длительности действия теплового потока время выхода на режим самоподдерживающегося горения вначале уменьшается, а затем возрастает. Если ограничить интервал допустимых времен выхода значением Δt_1 , то получим верхнюю границу устойчивого зажигания $t_{*1} = t_i + \Delta t_1$ (см. рис. 1, 5). Ее физический смысл состоит в том, что переход к самоподдерживающемуся горению из начального состояния, реализующегося в момент отключения теплового потока, осуществляется за конечное время Δt_1 лишь при ограниченных по длительности передержках потока тепла, а при более длительном облучении переход происходит с глубоким понижением уровня тепловыделения и за сравнительно долгое время, в течение которого в реальном эксперименте может произойти фактическое погасание топлива. В математическом эксперименте устойчивость зажигания оказывается сколь угодно высокой при выборе достаточно больших значений Δt_1 . С ростом теплового потока величина допустимой передержки уменьшается, в итоге верхняя граница сливается с нижней, и появляется значение критического потока q_{cr} , переход к самоподдерживающемуся горению не осуществляется при любых длительностях теплового импульса.

Интересно отметить, что величина критического теплового потока при зажигании равна в данном численном эксперименте лишь $0,37\bar{q}$, где \bar{q} — тепловой поток на поверхности топлива, стационарно горящего в самоподдерживающемся режиме. Анализ пространственно-временных распределений концентраций и температуры свидетельствует о сравнительно низкой интенсивности тепловыделения в газовой фазе при сделанном выборе кинетических параметров. Поэтому, в частности, при резком из-

Рис. 3. Динамика изменения скорости горения при действии тепловых потоков, меньших (1) и больших (2) критического.



менении условий теплообмена (отключение внешнего нагрева) реакция в газовой фазе может существенно замедлиться, и газовая фаза превращается в сток тепла. При этом, очевидно, значительно понижается также скорость тепловыделения в конденсированной фазе, и предельный случай такого понижения соответствует ее нулевому значению. Последнее может служить в качестве альтернативного критерия погасания. В рамках численного счета такой критерий формулируется в следующем виде: погасание произошло, если $S_c \leq \varepsilon S_c$, где ε — погрешность вычислений ($\varepsilon \rightarrow 0$); S_c — интенсивность тепловыделения в к-фазе при самоподдерживающемся стационарном горении топлива.

С новым критерием погасания верхняя граница устойчивого зажигания выродилась в вертикальную линию, нижняя граница незначительно опустилась, а критическое значение теплового потока немного возросло (см. рис. 1, 4', 5'). Примечательным здесь выглядит факт резкого перехода от абсолютно устойчивого зажигания к неустойчивому при переходе через уровень критического теплового потока. Очевидной причиной такого изменения качественного поведения системы служит значительное «ослабление» критерия погасания. В частности, в расчетах с новым критерием скорость горения в переходных процессах иногда понижается на 2 порядка, а время переходного процесса достигает десятков величин t_i . Полуостров устойчивого зажигания с вертикальной правой границей получен теоретически также в работе [4], однако в ней не приведены сведения о виде используемого критерия погасания. Кроме того, имеется единственное упоминание в литературе об экспериментальном определении полуострова устойчивого зажигания с вертикальной правой границей в работе [5], где изучалось зажигание смесевых твердых топлив при давлениях ниже атмосферного.

Попытки установить качественные изменения поведения во времени характеристик зажигания топлива при действии потоков, сравнимых с критическим, не дали положительных результатов. Режим погасания достигается при плавном изменении параметров задачи. Важно также то, что факт погасания устанавливается в расчетах в соответствии с принятыми допущениями (например, о длительности переходного процесса), которые не имеют форму критических условий. Качественные изменения временных характеристик зажигания реализуются лишь при значительной вариации амплитуды теплового потока. Для иллюстрации на рис. 3 приведены графики изменения стационарной скорости горения при действии тепловых потоков менее критического ($q = 0,3\bar{q}$) и существенно превышающего критический ($q = 1,3\bar{q}$). Отличительной чертой зажигания в случае действия высокого теплового потока служит выход скорости горения на стационарный уровень асимптотически снизу. Последнее характерно для ситуации с низким начальным запасом тепла в конденсированной фазе, для восполнения которого требуется вести процесс горения с пониженной по сравнению со стационарным уровнем скоростью [6].

Интересный факт обнаружен при анализе результатов расчетов по зажиганию монотоплива, у которого коэффициенты теплопроводности и диффузии в газовой фазе приняты зависящими от температуры по степенному закону. При сравнении с результатами расчетов с постоянными

теплофизическими коэффициентами, взятыми при максимальной температуре газа, получено, что для согласования времен зажигания эффективное (постоянное) значение коэффициента теплопроводности требуется уменьшить, а для согласования уровня скорости горения — увеличить по отношению к названному выше.

Таким образом, в данной работе на простейшем примере зажигания однокомпонентного топлива выявлены закономерности перехода к самоподдерживающемуся горению при вариации амплитуды и времени действия теплового потока. Показано, что полуостров устойчивого зажигания имеет различную конфигурацию в зависимости от принятого критерия зажигания. При выбранных теплокинетических параметрах найдено значение критического теплового потока, при превышении которого не удастся устойчиво зажечь топливо прямоугольным импульсом тепла. Это значение равно 37 % величины теплового потока на поверхности при самоподдерживающемся горении топлива.

Планируется продолжить исследования на примерах зажигания двухкомпонентных топлив. Пробные расчеты показывают, что динамика и устойчивость переходных процессов зависят от кинетики и величины теплового эффекта при реагировании компонентов в газовой и ж-фазах. Необходимо также включить в рассмотрение более детальные эффекты теплового расширения газов и поглощения теплового потока (излучения) в глубине ж-фазы. В более далекой перспективе — учет эффектов термоупругости и неоднородностей распределения компонентов в топливе.

ЛИТЕРАТУРА

1. Kumar M., Wills J. E., Kulkarni A. K. et al. A comprehensive model for AP-based composite propellant ignition // AIAA J.— 1984.— 22, N 4.— P. 526—534.
2. Баклан С. И., Дик И. Г., Вилюнов В. Н. К вопросу о критерии устойчивости зажигания конденсированного вещества // ФГВ.— 1989.— 25, № 1.— С. 12—16.
3. Селиховкин А. М., Дик И. Г. Модель зажигания и перехода к горению конденсированного газифицирующегося вещества // Математическое моделирование.— 1991.— 3, № 4.— С. 3—11.
4. Dik I. G., Selikhovkin A. M. Heterogeneous system ignition under impulse of heat flow // 4th Int. Seminar on Flame Structure: Book of Abstracts.— Novosibirsk, 1992.
5. Narayana M., Saito T., Iwama A. Ignition of composite solid propellants at subatmospheric pressures // Combust. Flame.— 1983.— 52.— P. 81—89.
6. Зарко В. Е., Кискин А. Б. Численное моделирование нестационарного горения пороха при действии светового потока // ФГВ.— 1980.— 16, № 5.— С. 54—59.

гг. Томск, Новосибирск

УДК 536.46

А. А. Зенин, С. В. Финяков

ИССЛЕДОВАНИЕ ВОСПЛАМЕНЕНИЯ ПОРОХА ПОТОКОМ ГОРЯЧЕГО ГАЗА

Процесс быстрого воспламенения двухосновных порохов (время воспламенения 0,6—40 мс) исследован в модельной ракетной камере тонкими термометрами, помещенными на воспламеняемую поверхность и в воспламеняющий газовый поток в условиях быстро изменяющихся внешних условий. Основные параметры процесса: температура пороховой поверхности, коэффициент теплоотдачи газ — порох, поток тепла из газа в порох, запас тепла и тепловыделение в порохе получены как функции времени. Найдены три режима зажигания: быстрого, нормального и задержанного. Кратко обсуждается характер перехода к стационарному горению для полученных режимов. Указаны направления будущих исследований.

В литературе имеется большое количество работ, посвященных экспериментальному и численному исследованию процесса зажигания (см., например, [1—5]). В экспериментах обычно определяется задержка воспламенения τ_* (время зажигания) как функция плотности теплового

© А. А. Зенин, С. В. Финяков, 1993.