

ЗАЖИГАНИЕ БЕЗГАЗОВЫХ СИСТЕМ ВОЛНОЙ ГОРЕНИЯ

А. Г. Струнина, Т. М. Мартемьянова,
В. В. Барзыкин, В. И. Ермаков
(Москва)

В практике работы с трудновоспламеняемыми безгазовыми системами широко пользуются различными воспламенителями, приведенными в контакт с поджигаемой системой [1]. Зажигание последней в таком случае осуществляется волной горения, идущей по воспламенителю к месту контакта.

Известно [2], что после начала горения поджигаемой системы, в ней не сразу устанавливается стационарная скорость горения. Нестационарное развитие процесса горения в основном газифицирующихся систем типа порохов теоретически изучалось рядом авторов [3—6]. В безгазовых системах изучение нестационарного режима горения проводилось лишь при воздействии на них накаливаемой поверхностью [7]. Характеристики нестационарного горения для безгазовых систем при воздействии на них горящим воспламенителем и связь их с характеристиками как воспламенителя, так и поджигаемого состава не изучены. Между тем исследование этого процесса представляет большой интерес и как теоретическая задача о взаимодействии двух реакционноспособных систем и для ряда практических приложений, например, для выбора оптимального воспламенительного состава.

В настоящей работе теоретически исследуется процесс выхода на режим стационарного горения при инициировании химической реакции в безгазовой системе горящим воспламенительным составом.

Физическая модель и математическая постановка задачи

Задача о зажигании трудновоспламеняемых конденсированных систем волной горения рассматривается в следующей постановке. Воспламенитель 1 и поджигаемая система 2 (рис. 1) представлены в виде полубесконечных цилиндров, помещенных один на другой. Химическая реакция в системе 2 инициируется волной горения, перемещающейся с постоянной скоростью по воспламенителю к месту контакта ($x=0$).

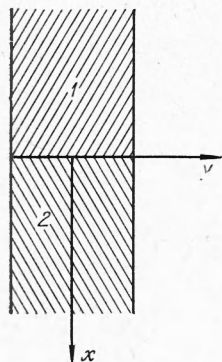


Рис. 1. Схема эксперимента.

Сделаны следующие предположения: 1) воспламенитель и поджигаемая система являются безгазовыми; 2) температура по диаметру образцов равномерна; 3) теплофизические параметры обеих систем не зависят от температуры; 4) теплообмен с окружающей средой осуществляется конвективным путем и излучением.

Система уравнений, отвечающая этой физической модели имеет вид:

$$c_1 \rho_1 \frac{\partial T}{\partial t} = \lambda_1 \frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + Q_1 k_{01} \exp(-E_1/RT) \varphi(\eta) - \frac{2\alpha}{r} (T - T_0) - \frac{2\epsilon \sigma_0}{r} (T^4 - T_0^4); \quad (1)$$

$$\frac{\partial \eta}{\partial t} = k_{01} \exp(-E_1/RT) \varphi(\eta); \quad (2)$$

$$c_2 \rho_2 \frac{\partial T}{\partial t} = \lambda_2 \frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + Q_2 k_{02} \exp(-E_2/RT) \varphi(\eta) - \frac{2\alpha}{r} (T - T_0) - \frac{2\epsilon \sigma_0}{r} (T^4 - T_0^4); \quad (3)$$

$$\frac{\partial \eta}{\partial t} = k_{02} \exp(-E_2/RT) \varphi(\eta). \quad (4)$$

Уравнения (1) — (2) описывают развитие процесса в воспламенителе, уравнения (3) — (4) — в поджигаемой системе.

Начальные условия задавались следующим образом. В воспламенителе на некотором расстоянии от границы раздела между реагирующими системами x помещался фронт стационарного горения, который определялся из решения стационарной задачи о горении системы с параметрами воспламенителя. Это расстояние выбиралось произвольно, но таким, чтобы волна горения по воспламенителю подходила к месту контакта с постоянной скоростью.

Граничные условия

$$x = 0 \begin{cases} \lambda_1 \frac{\partial T_1}{\partial x} = \lambda_2 \frac{\partial T_2}{\partial x}; & x = +\infty; T = T_0; \\ T_1(0, t) = T_2(0, t); & x = -\infty; T = T_{r1}. \end{cases}$$

Здесь индексы 1, 2 соответствуют воспламенителю (1) и поджигаемой системе (2); E — энергия активации; Q — тепловой эффект реакции; k_0 — предэкспонент; T_r — температура горения; λ — коэффициент теплопроводности; c — теплоемкость; ρ — плотность; r — радиус образцов; ϵ — степень черноты; σ_0 — постоянная Стефана — Больцмана; T , x , η и t — текущие температура, координата, глубина превращения и время; α — коэффициент теплоотдачи.

Как известно [8], фронт горения в безгазовой системе может распространяться в пульсирующем режиме. С целью исключения возможных пульсаций скорости горения перед началом решения задачи (1) — (4) определялась область параметров (Q и E), в которой горение воспламенителя и поджигаемой системы было бы устойчивым. Согласно [8] основным критерием, определяющим устойчивость горения системы в отсутствии теплоотвода, является неравенство

$$\alpha_r = 9,1 \frac{cRT_r^2}{QE} - 2,5 \frac{RT_r}{E} > 1. \quad (5)$$

Система уравнений (1) — (4) решалась численно на БЭСМ-6 в безразмерном виде. Но в связи с тем, что анализ результатов удобнее проводить в размерных переменных, в программе предусмотрен обратный пересчет от безразмерных величин к размерным. Рассматривался случай реакции первого порядка $\varphi(\eta) = 1 - \eta$, равенства теплофизических параметров обеих систем ($\lambda_1 = \lambda_2 = 0,36$ Вт/м·град, $c_1 = c_2 = 1,5 \times 10^3$ Дж/кг·град, $\rho_1 = \rho_2 = 0,018$ н/м³) и слабого теплообмена с окружающей средой ($\alpha = 2,09 \cdot 10^2$ Вт/м²·град, $\epsilon = 0,28$). Решение проводилось в области параметров $2,93 \cdot 10^{-3} < Q < 16,76 \cdot 10^{-3}$ Дж/м³, $4,19 \cdot 10^4 < E < 16,76 \cdot 10^4$ Дж/моль.

При анализе полученных результатов аналогично [7] за скорость горения принималась скорость перемещения максимума тепловыделения в системе. Считалось, что горение поджигаемой системы вышло на стационарный режим, когда отклонение скорости горения от своего стационарного значения станет меньше, чем 5%. Аналогично [7] весь переходный процесс в поджигаемой системе делился на две стадии: $t_{\pi} = t_1 + t_2$, где t_{π} — полное время переходного периода; t_1 — время формирования нестационарного фронта горения; t_2 — время установления стационарного горения.

Выбор t_1 и t_2 был несколько иным, что обусловлено спецификой задачи. Необходимо отметить, что при построении временных зависимостей в рассматриваемом случае инициирования реакции в системе волной горения другой системы, становится несколько условным выбор начала отсчета времени. За начало отсчета времени t_0 принималось время, когда температура на границе контакта с воспламенителем превысит начальную на 5%.

Время от t_0 до того момента, когда максимум скорости тепловыделения достигнет границы раздела воспламенитель — поджигаемая система, принималось за время t_1 , а время от t_0+t_1 до выхода на стационарный режим горения — за время неустановившегося режима горения t_2 .

При анализе процесса выхода на установившееся горение в поджигаемой системе оказалось, что так же, как при инициировании реакции накалиной стенкой, можно выделить три режима развития процесса (индукционный, промежуточный и режим «сжигания»). Это разбиение производится в первую очередь по соотношению характерных времен переходного периода. Если время формирования волны горения в поджигаемой системе (t_1) заметно больше времени установления фронта (t_2), то имеет место индукционный режим зажигания, при обратном соотношении времен — режим «сжигания». Эти предельные режимы разделяются неким промежуточным.

При воздействии на систему накалиной поверхностью основным параметром, определяющим режим процесса, являлось соотношение между температурой накалиной поверхности и температурой горения системы. При инициировании реакции волной горения воспламенителя оказывается, что для рассматриваемых ниже случаев соотношение характерных времен однозначно определяется соотношением между избытками энтальпий воспламенителя и поджигаемой системы.

Наличие избыточного тепла (избытка энтальпии) во фронте горения безгазовых систем объясняется присущей этим системам разницей в характерных масштабах зоны прогрева и зоны изменения глубины превращения. В работе [8] приводится (в приближении бесконечно узкой зоны химической реакции) следующее выражение для избытка энтальпии:

$$\Delta H = Q \frac{\lambda}{c\rho v} \frac{(T_r - T_0) \lambda}{v}. \quad (6)$$

Избыток энтальпии является функцией основных характеристик реагирующей системы — температуры и скорости горения¹. Следовательно, отношение избытков энтальпий, определяющее режим зажигания, будет зависеть от температур и скоростей горения обеих реагирующих систем:

$$\frac{\Delta H_1}{\Delta H_2} \frac{(T_{r1} - T_0)}{v_1} \frac{v_2}{(T_{r2} - T_0)}. \quad (7)$$

Как будет показано, индукционный режим зажигания реализуется при $(\Delta H_1/\Delta H_2) > 1$, режим «сжигания» — при $(\Delta H_1/\Delta H_2) < 1$. Промежуточный режим имеет место при $\Delta H_1 \approx \Delta H_2$.

Рассмотрение особенностей каждого из режимов зажигания проведем для следующих случаев:

1) кинетические параметры обеих реагирующих систем равны, а тепловые эффекты разные (т. е. $v_1 \leq v_2$, $T_{r1} \geq T_{r2}$);

2) кинетические параметры воспламенителя и поджигаемой системы различны, а тепловые эффекты равны (т. е. $v_1 \leq v_2$, $T_{r1} = T_{r2}$);

¹ В дальнейшем при расчете избытка энтальпии системы пользовались формулой (6). Входящие в нее величины T_r и v (скорость горения) определялись из решения на ЭВМ стационарной задачи о горении выбранной системы.

3) параметры систем подобраны таким образом, что $v_1 = v_2, T_{r1} \leq T_{r2}$.

Такой подход позволяет проанализировать влияние определяющих горение параметров (T_r и v) на характеристики переходного режима горения поджигаемой системы к стационарному.

Общим для всех случаев является то, что равенство избытков энтальпий воспламенителя и поджигаемой системы означает и равенство всех параметров реагирующих систем.

Отдельно рассмотрим случай, когда при равных избытках энтальпий воспламенитель и поджигаемая система имеют разные температуры и скорости горения.

Анализ результатов численного счета

Индукционный режим зажигания для первого из рассмотренных случаев, как показал анализ результатов счета, реализуется тогда, когда температура и скорость горения воспламенителя ниже температуры и скорости горения поджигаемой системы. Для второго и третьего случаев индукционный режим зажигания, согласно формуле (7), имеет место при $v_1 < v_2$ (если $T_{r1} = T_{r2}$) и при $T_{r1} > T_{r2}$ (если $v_1 = v_2$).

При индукционном режиме зажигания фронт горения воспламенителя приносит избыточного тепла больше, чем необходимо для поддержания стационарного горения в поджигаемой системе ($\Delta H_1 > \Delta H_2$). В результате быстроразвивающейся реакции в поджигаемой системе на некотором расстоянии от места контакта с воспламенителем температура значительно повышается. Соответственно повышается и температура воспламенителя вблизи контакта с поджигаемой системой. Если максимальная температура в поджигаемой системе превысит температуру ее стационарного горения, то соответствующие профили температур будут круче (тепловые потоки в свежее вещество больше), чем при стационарном горении. Максимальная температура в системе начнет снижаться, приближаясь к своему стационарному значению. Выход на стационарный режим практически закончится, когда сгорит вся предварительно прогретая воспламенителем масса вещества. К этому же времени окончательно сформируется избыток энтальпии, который имеет место при стационарном горении поджигаемой системы. На рис. 2 представлено пространственно-временное распределение температур в обеих системах для случая, когда воспламенитель и поджигаемая система отличаются лишь тепловыми эффектами.

Соответствующие этим изменениям температуры изменения скорости горения в переходной области для индукционного режима зажигания представлены на рис. 3, 1 и 1а. Аналогичным образом меняется нестационарная скорость горения и в случае, если температуры горения обеих реагирующих систем равны (рис. 4, 1 и 1а), и в случае, если равны их скорости горения (рис. 5, 1 и 1а). Общим в этих зависимостях является то, что при выходе на режим стационар-

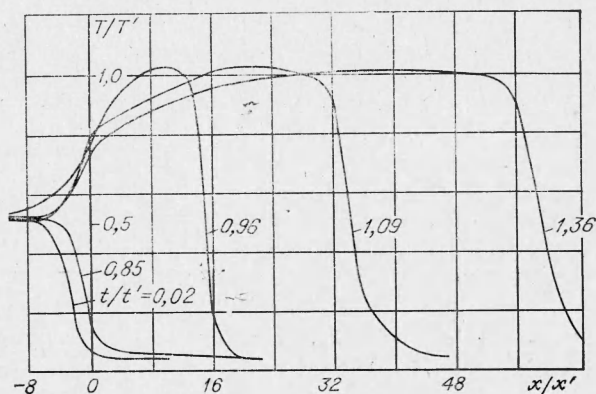


Рис. 2. Пространственно-временное распределение температур в индукционном режиме зажигания (T' — температура горения поджигаемой системы, t' — время сжигания прогретого слоя, x' — ширина прогретого слоя в поджигаемой системе); $E_1 = E_2 = 12,57 \cdot 10^4$ Дж/моль; $Q_1 = 8,38 \cdot 10^{-3}$ Дж/м³; $Q_2 = 16,76 \cdot 10^{-3}$ Дж/м³; $\tau_i < \tau_{i+1}$.

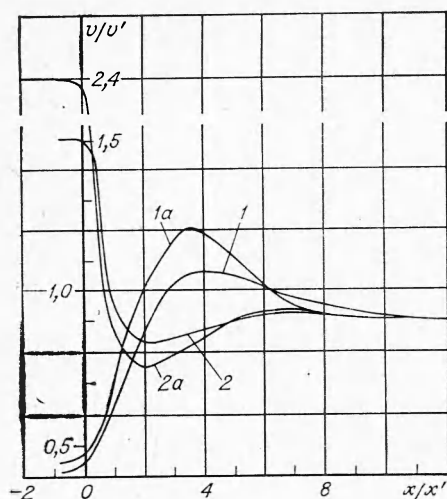


Рис. 3. Изменение скорости горения реагирующих систем в индукционном режиме (1, 1a) и режиме «сжигания» (2, 2a); v' — стационарная скорость горения поджигаемой системы.

либо $v_1 = v_2$, режим «сжигания» имеет место соответственно при $v_1 > v_2$ (второй случай) и при $T_{r1} < T_{r2}$ (третий случай).

В отличие от индукционного в режиме «сжигания» избыток энтальпии во фронте горения воспламенителя меньше, чем в поджигаемой системе. Следствием этого является снижение температуры при переходе волны горения из системы с меньшим избытком энтальпии к системе, у которой при данных кинетических и теплофизических параметрах избыток энтальпии больше. Профили температур становятся все менее крутыми, тепловые потоки в свежее вещество снижаются и могут стать значительно меньше, чем при стационарном горении поджигаемой системы. В результате этого начинается повышение температуры в системе, заканчивающееся (либо сразу, либо после нескольких значительно меньших отклонений максимальной температуры от стационарной величины) выходом на режим стационарного горения. На рис. 6 представлена пространственно-временная картина изменения температуры для обеих систем, если воспламенитель и поджигаемая система имеют равные кинетические параметры и отличаются лишь тепловыми эффектами.

Изменения нестационарной скорости горения в переходной области, соответствующие этому же случаю представлены на рис. 3, 2 и 2a. На рис. 4 и 5 кривые 2 и 2a показывают зависимость нестационарной скорости горения от пространственной координаты соответственно для случая, когда $T_{r1} = T_{r2}$ (рис. 4) и когда $v_1 = v_2$ (рис. 5). Как видим, общим для всех скоростных кривых является снижение скорости горения при переходе от системы с меньшим значением избытка энтальпии

ного горения, наблюдается вначале рост нестационарной скорости горения, а затем спад ее, который либо сразу заканчивается выходом на стационарный режим, либо изменения скорости повторяются, но со значительно меньшими амплитудами. Необходимо отметить, что нестационарная скорость горения в переходной области при инициировании реакции в безгазовой системе накалиной стенкой изменяется таким же образом.

Режим «сжигания», как показал анализ результатов счета, для первого из рассматриваемых случаев (воспламенитель и поджигаемая система отличаются лишь тепловыми эффектами) реализуется, когда температура и скорость горения воспламенителя выше температуры и скорости горения поджигаемой системы. Для случаев, когда $T_{r1} = T_{r2}$

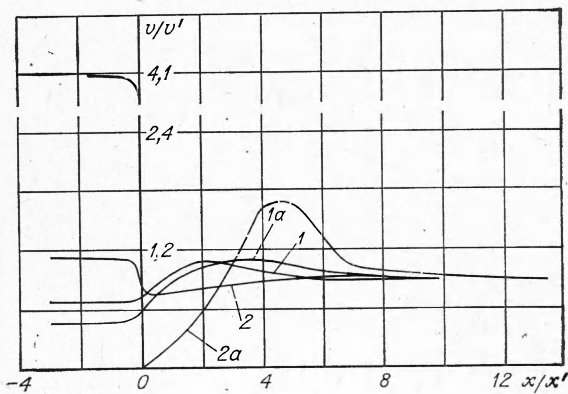


Рис. 4. Изменение нестационарной скорости горения при $T_{r1} = T_{r2}$, $v_1 \leq v_2$.

к системе с большим ее значением.

Промежуточный режим зажигания осуществляется, когда избытки энтальпии обеих систем близки по величине (разница не более чем на 15—20%). Этот режим характеризуется тем, что при приближении избытка энтальпии воспламенителя к избытку энтальпии поджигаемой системы как со стороны больших, так и со стороны меньших значений максимальное отклонение нестационарной скорости горения от своего стационарного значения уменьшается.

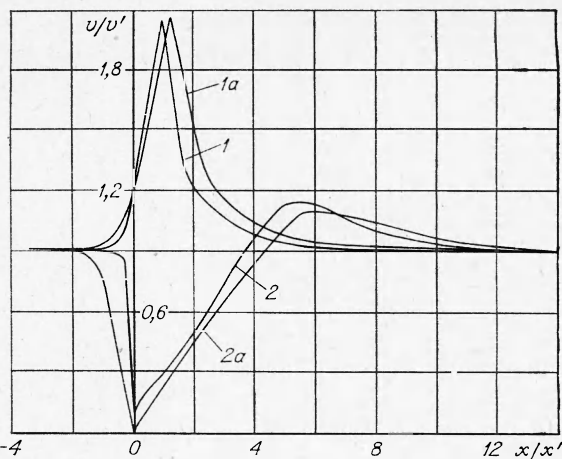


Рис. 5. Изменение нестационарной скорости горения при $T_{г1} \leq T_{г2}$, $v_1 = v_2$.

Результаты анализа временных характеристик для различных режимов зажигания (t_n , t_1 и t_2) представлены на рис. 7, а (для случая, когда одинаковыми воспламенителями зажигают различные системы) и на рис. 7, б (для случая, когда разными воспламенителями зажигают одинаковые системы). Все временные характеристики представлены в виде отношения t/t' , t' — время сгорания прогретого слоя при стационарном горении воспламенителя (рис. 7, а) либо поджигаемой системы (рис. 7, б).

Сопоставление приведенных данных показывает, что время формирования волны горения в поджигаемой системе t_1 зависит в основном от характеристик воспламенителя. Действительно, если инициирование реакции в различных поджигаемых системах происходит одинаковыми воспламенителями (рис. 7, а), то t_1 почти не меняется. Чем меньше температура и скорость горения воспламенителя (рис. 7, б), тем больше времени требуется до начала горения поджигаемой системы. Время выхода на установившийся режим горения t_2 существенно зависит как от характеристик воспламенителя, так и от характеристик самой поджигаемой системы.

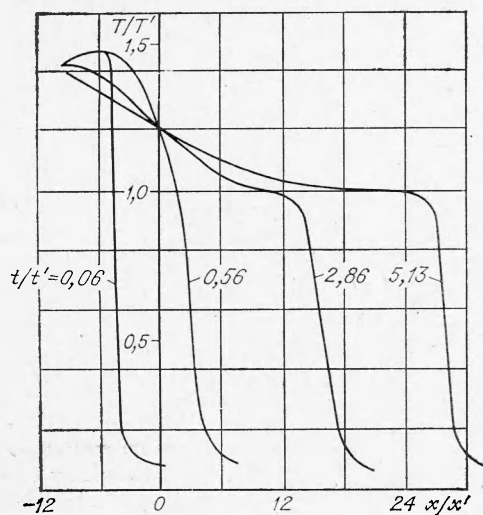


Рис. 6. Пространственно-временное распределение температур в режиме «сжигания»: $E_1 = E_2 = 12,57 \cdot 10^4$ Дж/моль; $Q_1 = 12,57 \cdot 10^{-3}$ Дж/м³; $Q_2 = 8,38 \cdot 10^{-3}$ Дж/м³, $\tau_i < \tau_{i+1}$.

Представленные на рис. 7, а, б характерные времена переходного периода относятся к случаю, когда воспламенитель и поджигаемая система имеют равные кинетические параметры и разнятся тепловыми эффектами. Анализ полученных результатов показывает, что для рассматриваемого случая время установления стационарной скорости горения t_2 и время до начала горения поджигаемой системы t_1 укладываются при различных сочетаниях скоростей и температур горения воспламенителя и поджигаемой системы на одну универсальную кривую в координатах $t_2/t_1 \div \Delta H_1/\Delta H_2$ (рис. 8). Наличие универсальной кривой может быть полезно при

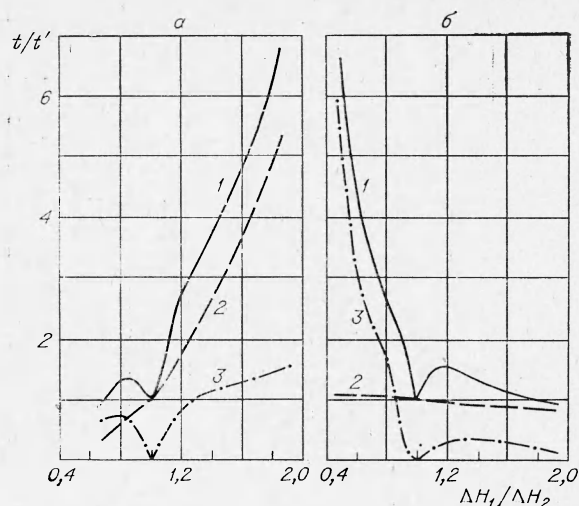


Рис. 7. Характерные времена переходного периода для различных режимов зажигания.
 1 — $t_{\Pi}/t' = f(\Delta H_1/\Delta H_2)$; 2 — $t_1/t' = f(\Delta H_1/\Delta H_2)$; 3 — $t_2/t' = f(\Delta H_1/\Delta H_2)$.

расчете соотношения времен переходного периода в поджигаемой системе, если характеристики ее стационарного горения и горения воспламенителя известны.

Для остальных рассмотренных в работе случаев соотношение между характерными временами переходного периода сохраняется таким же, а именно, если избыток энтальпии воспламенителя больше избытка энтальпии поджигаемой системы, то $t_1 > t_2$ при обратном соотношении избытков энтальпий $t_1 < t_2$. Если избытки энтальпий обеих реагирующих систем рав-

ны¹, то t_1 становится равным времени сгорания прогретого слоя при стационарном горении системы, а t_2 обращается в нуль.

В заключение рассмотрим случай, когда параметры обеих систем выбираются произвольно. При этом оказывается возможным подобрать их таким образом, что равенство избытков энтальпий не будет означать равенства температур и скоростей горения воспламенителя и поджигаемой системы. С целью анализа области параметров Q и E при фиксированном k_0 различных систем (из которых одна служит воспламенителем, а другая поджигаемой), обеспечивающих один из режимов зажигания, обратимся к рис. 9. Если параметры воспламенителя отвечают точке A , то для всевозможных поджигаемых систем, параметры которых укладываются ниже прямой $A'A''$, по соотношению характерных времен в переходной области реализуется индукционный режим зажигания; для систем с параметрами выше этой прямой — режим «сжигания»; промежуточный режим реализуется при таких параметрах поджигаемой системы, которые укладываются в узкую (в пределах 15—20%) полосу вблизи прямой $A'A''$.

Согласно рис. 9, системы, параметры которых лежат на пересе-

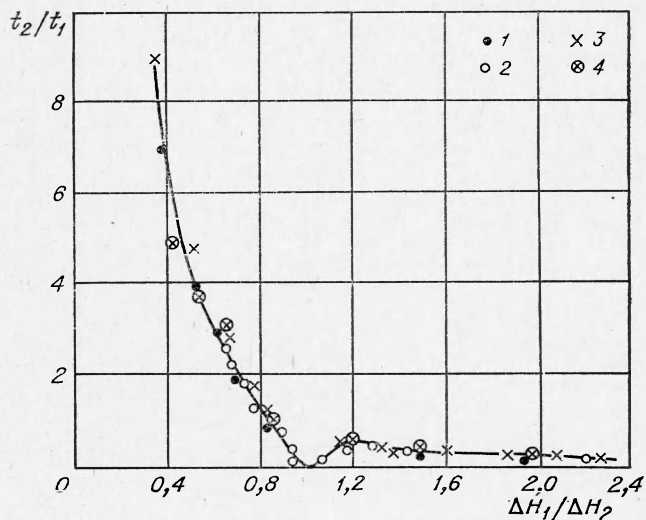


Рис. 8. «Универсальная» кривая для случая $E_1 = E_2$.
 $E_1 = E_2 = 12,57 \cdot 10^4$ Дж/моль: 1 — $Q_1 = 8,38 \cdot 10^{-3}$ Дж/м³, $5,03 \cdot 10^{-3} < Q_2 < 16,76 \cdot 10^{-3}$ Дж/м³; 2 — $5,03 \cdot 10^{-3} < Q_1 < 16,76 \cdot 10^{-3}$ Дж/м³, $Q_2 = 8,38 \cdot 10^{-3}$ Дж/м³; $E_1 = E_2 = 8,38 \cdot 10^4$ Дж/моль: 3 — $Q_1 = 4,19 \cdot 10^{-3}$ Дж/м³, $4,19 \cdot 10^{-3} < Q_2 < 8,38 \cdot 10^{-3}$ Дж/м³; 4 — $4,19 \cdot 10^{-3} < Q_1 < 8,38 \cdot 10^{-3}$ Дж/м³, $Q_2 = 4,19 \cdot 10^{-3}$ Дж/м³.

¹ При этом, как было отмечено раньше, и все параметры систем равны.

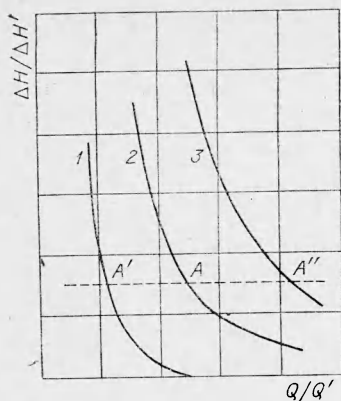


Рис. 9. Зависимость избытка энтальпии от кинетических параметров $E_1 = 8,38 \cdot 10^4$ Дж/моль (1); $E_2 = 12,57 \cdot 10^4$ Дж/моль (2); $E_3 = 16,76 \cdot 10^4$ Дж/моль (3); в точке $A \Delta H' = 18,27 \cdot 10^{-8}$ Дж/моль², $Q' = 8,38 \cdot 10^{-3}$ Дж/м³.

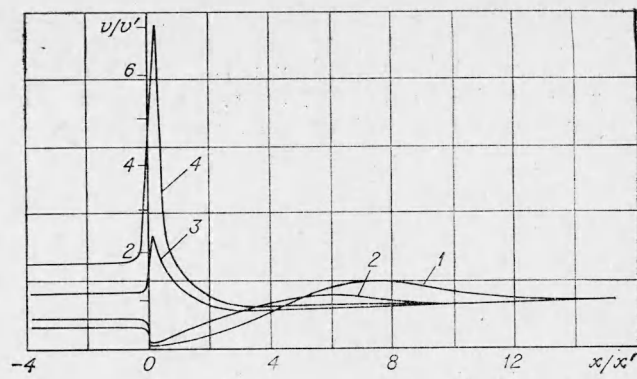


Рис. 10. Изменение нестационарной скорости горения ($\Delta H_1 = \Delta H_2$).

чении любой прямой, параллельной оси абсцисс, с кривыми $\Delta H/\Delta H' = f(Q/Q')$, имеют равные избытки энтальпий. При этом скорость и температура горения воспламенителя может быть и больше,

и меньше скорости и температуры горения поджигаемой системы. Соответственно изменяется и поведение нестационарной скорости горения в переходном режиме. Так, кривые 1, 2 на рис. 10 отвечают случаю, когда $v_1 < v_2$, $T_{r1} < T_{r2}$, кривые 3, 4 — случаю, когда $v_1 > v_2$ и $T_{r1} > T_{r2}$. Причем чем больше разница в скоростях и температурах горения воспламенителя и поджигаемой системы, тем больше отклонение нестационарной скорости горения от своего стационарного значения. Как видим, в этом случае, более сложном, чем предыдущие, соотношение между избытками энтальпий определяет по-прежнему соотношение между временами (t_1 , t_2) переходного периода, но не характер изменения нестационарной скорости горения. По-видимому, помимо интегральной величины ΔH необходима еще некая дифференциальная характеристика, которая определяла бы скорость поступления избыточного тепла воспламенителя в поджигаемую систему.

В заключение отметим, что изучение закономерностей переходных процессов горения проводилось в зависимости от кинетических параметров и тепловых эффектов обеих реагирующих систем. Влияние на характеристики переходных режимов теплофизических параметров и условий теплообмена с окружающей средой является предметом дальнейших исследований.

*
* *
*

В результате анализа основных характеристик различных режимов зажигания безгазовых систем волной горения для рассматриваемых случаев показано, что:

1. В переходных процессах скорость горения достигает своего стационарного значения (v_2) после одного или нескольких колебаний.

2. Если избыток энтальпии воспламенителя заметно больше избытка энтальпии поджигаемой системы, то фронт горения в последней формируется дольше, чем выходит на стационарный режим горения.

Если избыток энтальпии воспламенителя меньше избытка энтальпии поджигаемой системы, то формирование фронта горения протекает быстрее, чем установление стационарного режима.

3. Время, необходимое для формирования фронта горения в поджигаемой системе, определяется в основном характеристиками воспламенителя. Время установления стационарной скорости горения зависит в сильной степени как от характеристик воспламенителя, так и от характеристик самой поджигаемой системы.

Поступила в редакцию
12/II 1974

ЛИТЕРАТУРА

1. А. А. Шидловский. Основы пиротехники. М., «Машиностроение», 1973.
2. А. Г. Мержанов, Б. И. Хайкин, К. Г. Шкадинский. ПМТФ, 1969, 5.
3. А. Г. Истратов, В. Б. Либрович. ПМТФ, 1964, 5.
4. С. С. Новиков, П. Ф. Похил. Докл. АН СССР, 1968, 180, 6.
5. Б. В. Новожилов. Нестационарное горение твердых ракетных топлив. М., «Наука», 1973.
6. В. А. Фрост, В. Л. Юмашев. ПМТФ, 1973, 3.
7. К. Г. Шкадинский. ФГВ, 1971, 7, 3.
8. К. Г. Шкадинский, Б. И. Хайкин, А. Г. Мержанов. ФГВ, 1971, 7, 1.

УДК 662.215.1

К ВОПРОСУ О МЕХАНИЗМЕ ЗАЖИГАНИЯ ГЕТЕРОГЕННЫХ СИСТЕМ

В. Т. Кузнецов, В. П. Марусин, А. И. Скорик
(Томск)

Зажигание гетерогенных конденсированных систем представляет собой сложный нестационарный процесс. Изучение этого явления при низких интенсивностях подвода тепла (до $4 \cdot 10^5$ Вт/м²) проводилось многими авторами, например [1, 2]. Результаты этих исследований описываются в рамках тепловой теории зажигания [3]. Опытные данные, полученные при более высокой интенсивности теплоподвода [4, 5], с позиции тепловой теории зажигания объяснить невозможно. В данной работе изучено влияние интенсивности подвода тепла, давления и состава атмосферы на механизм зажигания гетерогенной системы, состоящей из перхлората аммония и полимерного горючего (в отношении 76:24).

Исследования проводились на установке радиационного нагрева «Уран-1» [6], в которой излучение ксеноновой лампы ДКСР-10 000 фокусировалось эллиптическим зеркалом в пятно диаметром $1,2 \cdot 10^{-2}$ м. Установка обеспечивала стабильность светового потока во времени не ниже 95%. Отклонение от фокальной плоскости на $1 \cdot 10^{-3}$ м в любую сторону приводило к уменьшению теплового потока на 5%.

Интенсивность теплового излучения измерялась медным калориметром [7], ошибка в измерении не превышала 10%. Исследуемые образцы имели форму цилиндров диаметром $1 \cdot 10^{-2}$ м и высотой $5 \cdot 10^{-3}$ м. Изменение высоты образца за счет выгорания поверхностного слоя в индукционный период зажигания не превышало $0,2 \cdot 10^{-3}$ м. Коэффициент отражения исследуемых образцов, определенный на шаровом фото-