

u_1 и v удовлетворительно согласуются с данными [6] для воспламенителей на основе дымных порохов. Однако при сравнении показателей с известными в литературе необходимо учитывать дисперсность пороха, поскольку последнее, как показано выше и отмечено ранее в работе [1], влияет на скорость горения.

По уравнению (10) решалась прямая задача для навески 3, имеющей одинаковое с навесками 1, 2 содержание мелкого пороха, но меньшую общую массу. Оказалось, что полученное решение системы (1) — (5), (8) хорошо согласуется с экспериментальными результатами (см. рис. 1, кривую 3). Эта же задача решалась по (11) для навесок 4, 5 (см. рис. 1, кривые 4, 5). Отсюда следует вывод, что заряды с одинаковым содержанием мелкого пороха горят с одинаковой скоростью.

В расчетах потери тепла на нагрев стальной стенки камеры толщиной $l = 1,210^{-2}$ м продуктами сгорания не учитывались, так как характерное время t_1 переноса тепла в стенке камеры существенно больше времени t_2 всего процесса горения и истечения продуктов сгорания: $t_1 = \rho c_p l^2 / \lambda = 6,675$ с, $t_2 = 0,1$ с ($\rho = 7860$ кг/м³, $c_p = 109,94$ калл/(кг·К), $\lambda = 18,642$ калл/(м·с·К)).

Поступила в редакцию
29/VIII 1980

ЛИТЕРАТУРА

1. Н. Н. Бахмац, А. Ф. Беляев. Горение гетерогенных конденсированных систем. М.: Наука, 1967.
2. М. Е. Серебряков. Внутренняя баллистика ствольных систем и пороховых ракет. М.: Оборонгиз, 1962.
3. В. С. Аксенов, Г. Н. Леонов и др. ФГВ, 1979, 15, 2.
4. Б. А. Райзберг, Б. Т. Ерохин, К. П. Самсонов. Основы теории рабочих процессов в ракетных системах на твердом топливе. М.: Машиностроение, 1972.
5. Ю. И. Вышенков и др. Быстродействующая многоканальная измерительная система «СПЕКТР», выполненная в стандарте «КАМАК». Отчет № 847. Новосибирск: ИТПМ СО АН СССР, 1977.
6. Б. Т. Ерохин, Л. М. Липанов. Нестационарные и квазистационарные режимы работы РДТТ. М.: Машиностроение, 1977.

ПЕРЕХОДНЫЕ РЕЖИМЫ ГОРЕНИЯ ГЕТЕРОГЕННЫХ СИСТЕМ С ТВЕРДОФАЗНЫМИ ПРОДУКТАМИ

А. Г. Струнина, А. Н. Фирсов, С. В. Костин
(Черноголовка)

Теоретическое исследование переходных режимов горения [1, 2] при иницировании безгазовой системы волной горения проведено в предположении, что конденсированная система гомогенна. Функция тепловыделения такой системы:

$$\Phi(T, \eta) = k_0 \exp(-E/RT) \varphi(\eta),$$

где E — энергия активации; k_0 — предэкспоненциальный фактор; η — глубина разложения. Анализировался случай реакции первого порядка $\varphi(\eta) = 1 - \eta$. Исследовались характеристики зажигания (время t_1 , температура T_0 и энергия Q_0) переходных режимов горения (время выхода на режим t_2 и характер изменений нестационарной скорости горения в переходной области).

Ниже излагаются результаты изучения этих процессов в безгазовых гетерогенных системах, выясняются особенности, связанные с торможением реакции нарастающим слоем продукта, наличием компонентов разной дисперсности, формы, разной толщины начальной окисной пленки. Аналогично [1] предполагается, что воспламенитель и поджигаемая система в форме полубесконечных цилиндров приведены в контакт по торцевой поверхности. Тепловая волна горящего воспламенителя приближается к месту контакта и инициирует процесс в поджигаемой системе. Распределение температур по диаметру образцов не учитывается. Предполагается, что тепловой обмен с окружающей средой осуществляется через боковую поверхность образца.

Система уравнений, отвечающая этой физической модели, имеет вид

$$c_1 \rho_1 \frac{\partial T}{\partial t} = \lambda_1 \frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + \Phi_1 - \frac{2A_1}{R_1} (T - T_0) - \frac{2\varepsilon_1 \sigma_0}{R_1} (T^4 - T_0^4),$$

$$\frac{\partial \eta}{\partial t} = \frac{k_{01}}{r_1^{n_1+1}} \frac{\exp(-\kappa_1 \eta)}{\eta^{n_1}} \exp(-E_1/RT),$$

$$c_2 \rho_2 \frac{\partial T}{\partial t} = \lambda_2 \frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + \Phi_2 - \frac{2A_2}{R_2} (T - T_0) - \frac{2\varepsilon_2 \sigma_0}{R_2} (T^4 - T_0^4),$$

$$\frac{\partial \eta}{\partial t} = \frac{k_{02}}{r_2^{n_2+1}} \frac{\exp(-\kappa_2 \eta)}{\eta^{n_2}} \exp(-E_2/RT).$$

Индексы 1, 2 соответствуют воспламенителю и поджигаемой системе; Φ_1 и Φ_2 — функции источника [3];

$$\Phi_i = Q_i \rho_i (\alpha_i + 1) (1 - \eta)^{\alpha_i} \frac{k_{0i}}{r_i^{n_i+1}} \frac{\exp(-\kappa_i \eta)}{\eta^{n_i}} \exp(-E_i/RT), \quad i = 1, 2.$$

Аналогично [1] начальные условия задавались в виде фронта стационарного горения, который помещался в воспламенителе на некотором расстоянии от границы раздела с поджигаемой системой. Считалось, что глубина разложения перед фронтом горения отлична от нуля (имеет место начальная окисная пленка на каждой частице реагента η_{n_i}).

Граничные условия:

$$x = 0 : \begin{cases} \lambda_1 \frac{\partial T_1}{\partial x} = \lambda_2 \frac{\partial T_2}{\partial x}, \\ T_1(0, t) = T_2(0, t); \end{cases}$$

$$x = -\infty : T = T_{r_1};$$

$$x = +\infty : T = T_0.$$

Здесь Q — тепловой эффект реакции; k_0 — предэкспонент; T_r — температура горения; λ и C — коэффициент теплопроводности и теплоемкости смеси; ρ — ее плотность; $R_{1,2}$ — радиус образцов; r — характерный размер частиц гетерогенной системы; n и κ — кинетические параметры; α — показатель формы частицы; T, x, η и t — текущие температура, координата, глубина превращения и время; ε — степень черноты образца; σ_0 — постоянная Стефана — Больцмана; A — коэффициент теплоотдачи. Задача решалась численно в безразмерном виде. Результаты анализировались в виде размерных величин.

За скорость горения принималась скорость перемещения максимума тепловыделения в системе. Время от начала теплового воздействия на поджигаемую систему до начала перемещения по ней фронта горения принималось за t_1 , время от t_1 до выхода на установившийся режим горения — за t_2 , энергия, накопившаяся в поджигаемой системе к моменту t_1 , считалась энергией зажигания.

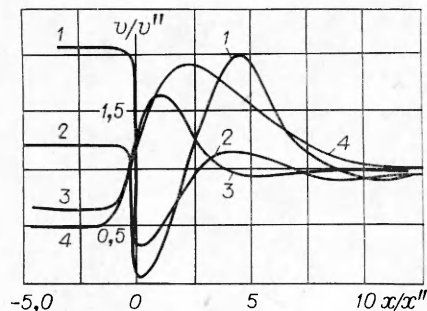


Рис. 1. Изменение с координатой нестационарной скорости горения; $E_1/RT_{r_1} = E_2/RT_{r_2} = 6,20$, $a_1 = a_2 = 13,31 \cdot 10^{-8}$ м²/с. 1, 2 — $r_1 < r_2$; 3, 4 — $r_1 > r_2$.

Как показано в [3], характерными особенностями процесса горения систем с твердофазными продуктами является наличие зон распространения с интенсивным тепловыделением и зон догорания, в которых происходит дореагирование значительной части вещества. В связи с этим фронт горения «размыт». Эта особенность приводит к тому, что при иницировании реакции в поджигаемой системе тепловой волной воспламенителя возможны режимы «раздвоения» фронта горения. При этом, как будет показано ниже, глубина разложения в прилежащих к месту контакта слоях воспламенителя оказывается меньше, чем в поджигаемой системе.

Дисперсность компонентов. Изучение влияния дисперсности компонентов на развитие процесса проводилось для гетерогенных систем с различными кинетическими законами. На рис. 1 представлено изменение с координатой нестационарной скорости горения при перемещении фронта горения по воспламенителю (область отрицательных x) и поджигаемой системе (область положительных x). По оси абсцисс отложено отношение текущей координаты к ширине прогретой зоны поджигаемой системы при стационарном горении, по оси ординат — отношение скорости горения в переходном режиме к ее стационарному значению. Анализ производился для систем с параболическим ($n_1 = n_2 = 1, \kappa_1 = \kappa_2 = 0$) и логарифмическим ($n_1 = n_2 = 0, \kappa_1 = \kappa_2 = 1$) законами реагирования. Режимы 3, 4 аналогичны индукционному [1], а 1, 2 — режиму сжигания.

Влияние размера частиц на закономерности процесса проявляется через влияние дисперсности компонентов на скорости горения. Чем мельче частицы состава, тем больше скорость его горения. Как показано раньше, при иницировании быстрогорящей системы медленногорящим воспламенителем тепла, поступающего от воспламенителя к моменту формирования фронта горения поджигаемой системы, оказывается больше, чем необходимо для ее стационарного горения. Поэтому развитие процесса начинается с парастания скорости и температуры горения. В случае иницирования медленногорящей системы быстрогорящим воспламенителем недостаток в количестве поступающего тепла может привести к глубокой депрессии. Выход на режим стационарного горения происходит после одного или нескольких колебаний нестационарной скорости. Чем больше разница в дисперсности компонентов реагирующих систем, тем большая часть поджигаемой системы сгорает¹ в нестационарном режиме. Частота колебаний нестационарной скорости горения больше тогда, когда компоненты воспламенителя (при прочих равных параметрах) мельче, чем у поджигаемой системы.

Влияние кинетического закона на характер изменения нестационарной скорости горения в переходном периоде незначительно. Амплитуда колебаний и область нестационарных режимов при логарифмическом кинетическом законе несколько меньше, чем при параболическом, что

¹ Отношение x/x'' — толщина слоя реагирующей системы по ходу перемещения фронта горения, выраженная в числе зон прогрева при стационарном горении.

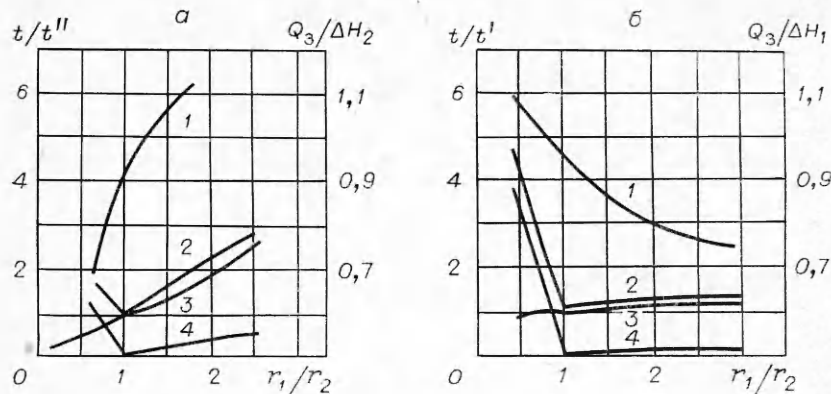


Рис. 2. Зависимость временных и энергетических характеристик процесса от соотношения размеров компонентов воспламенителя (r_1) и поджигаемой системы (r_2); $E_1/RT_{r_1} = E_2/RT_{r_2} = 6,20$, $a_1 = a_2 = 13,31 \cdot 10^{-8}$ м²/с.

1 — Q_3 ; 2 — $t = t_1 + t_2$; 3 — t_1 ; 4 — t_2 .

связано, по-видимому, со стабилизирующим влиянием на развитие процесса уширения зоны реакции, которое имеет место при наличии логарифмического кинетического закона.

Временные и энергетические характеристики рассматриваемого процесса в зависимости от соотношения размеров частиц реагирующих систем при логарифмическом законе реагирования представлены на рис. 2. Здесь t' и t'' — соответственно время сгорания прогретого слоя воспламенителя и поджигаемой системы при стационарном режиме горения, $\Delta H_{1,2}$ — избытки энтальпий [4] реагирующих систем. Представленные зависимости отвечают случаям иницирования определенной системы различными воспламенителями (рис. 2, а) и различных систем определенным воспламенителем (рис. 2, б).

Анализ полученных результатов показывает, что, аналогично [1], время задержки зажигания t_1 определяется в основном параметрами воспламенителя, а время выхода на режим горения t_2 зависит и от воспламенителя, и от поджигаемой системы. С увеличением размера частиц воспламенителя время задержки зажигания возрастает, а размер частиц поджигаемой системы оказывает более слабое влияние. Энергия зажигания и в том, и в другом случае возрастает.

Время выхода на стационарный режим горения t_2 — более сложная функция от соотношения размеров частиц. Уменьшение размера частиц воспламенителя и увеличение размера частиц поджигаемой системы (при $r_1/r_2 < 1$) приводят к значительному росту t_2 , а изменение r_1 и r_2 в области $r_1/r_2 > 1$ почти не сказывается на t_2 , которое при малых размерах частиц поджигаемой системы близко к нулю. Можно заключить, что t_2 в основном определяется дисперсностью компонентов поджигаемой системы.

Влияние формы частиц на развитие процесса изучалось для систем с параболическим кинетическим законом. Все параметры воспламенителя и поджигаемого состава, кроме формы частиц, считались одинаковыми. Кривые рис. 3 отвечают случаю иницирования систем с игольчатой (кривая 1) и чешуйчатой (кривая 2) формой частиц тепловой волной горящего воспламенителя со сферической формой частиц.

Рассмотрены также режимы иницирования гетерогенной системы (со сферическими частицами) воспламенителями, форма частиц которых игольчатая либо чешуйчатая. Анализ показывает, что развитие процесса в поджигаемой системе (область положительных x) определяется в основном формой ее частиц и мало зависит от формы частиц воспламенителя.

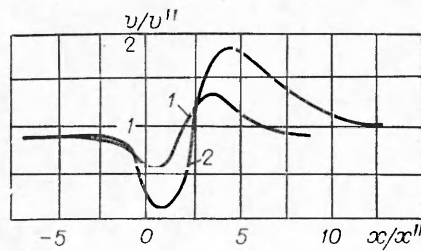


Рис. 3. Влияние формы частиц; $E_1 = E_2 = 16,76 \cdot 10^4$ Дж/моль, $\alpha_1 = \alpha_2 = 13,31 \cdot 10^{-8}$ м²/с, $Q_1 = Q_2 = 5,44 \cdot 10^{-3}$ Дж/м³, $\alpha_1 = 2$, $\alpha_2 = 1$ (1), 0 (2).

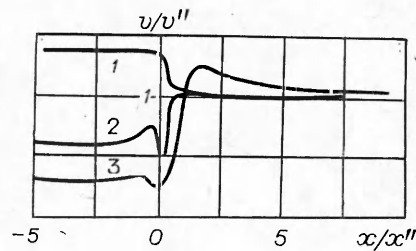


Рис. 4. Влияние начальной глубины разложения; $n_1 = n_2 = 0$, $\kappa_1 = \kappa_2 = 1$, $E_1 = E_2 = 8,38 \cdot 10^4$ Дж/моль, $Q_1 = Q_2 = 18,86 \cdot 10^{-3}$ Дж/м³, $\alpha_1 = \alpha_2 = 13,31 \cdot 10^{-8}$ м²/с, $\eta_{n_2} = 0,2$, $\eta_{n_1} = 0,1$ (1); 0,3 (2); 0,4 (3).

Общее для всех рассматриваемых случаев состоит в том, что амплитуда колебаний нестационарной скорости горения и время выхода на стационарный режим больше при наличии в одной из реагирующих систем частиц чешуйчатой формы. Вместе с тем наблюдается стабилизирующее влияние игольчатой формы частиц.

Анализ временных и энергетических характеристик процесса в зависимости от коэффициента формы показал следующее. С изменением формы частиц воспламенителя (α_1) и поджигаемой системы (α_2) характеристики зажигания меняются слабо, значительно изменяются времена выхода на режим стационарного горения. Наибольшие временные и энергетические затраты наблюдаются тогда, когда инициируются системы с частицами в виде чешуек. Это связано с тем, что удельная поверхность у этих частиц при $r_{эфф} = \text{const}$ ($r_{эфф}$ — характерный размер частицы) наименьшая, а функция источника самая сосредоточенная.

Начальная глубина разложения. Каждая частица гетерогенной системы до начала реакции покрыта пленкой окисла. Изучение влияния толщины пленки (начальной глубины разложения) на характеристики рассматриваемого процесса проведено для систем с логарифмическим кинетическим законом в предположении, что $\eta_{n_1} \geq \eta_{n_2}$. Когда начальная глубина разложения компонентов воспламенителя меньше ($\eta_{n_1} < \eta_{n_2}$), сформировавшийся в поджигаемой системе фронт горения перемещается со снижающейся скоростью, приближаясь постепенно к стационарному значению (рис. 4, 1). При меньшей начальной глубине разложения компонентов поджигаемой системы ($\eta_{n_1} > \eta_{n_2}$) формирование фронта горения затруднено из-за ограниченного количества тепла, поступающего от воспламенителя за время задержки зажигания. Но интенсивное развитие реакции в относительно «свежем» веществе (с меньшей глубиной начального разложения) приводит к быстрому росту температуры и скорости горения системы (см. рис. 4, 2, 3). Причем амплитуда колебаний нестационарной скорости горения зависит не только от соотношения между η_{n_1} и η_{n_2} , но и от их абсолютных значений, возрастая с их увеличением. Функция тепловыделения на границе раздела систем принимает «двугорбый» вид, а дореагирование воспламенительного состава может инициироваться теплом, идущим от поджигаемой системы к воспламенителю.

Временные и энергетические характеристики процесса проанализированы для случаев инициирования поджигаемой системы ($\eta_{n_2} = \text{const}$) воспламенителями с разными η_{n_1} и разных поджигаемых систем ($\eta_{n_2} \neq \text{const}$) определенными воспламенителями ($\eta_{n_1} = \text{const}$). На рис. 5 представлен первый из рассмотренных случаев. Время задержки зажигания определяется в основном толщиной начальной окисной пленки компонентов воспламенителя, уменьшаясь при ее снижении. При сниже-

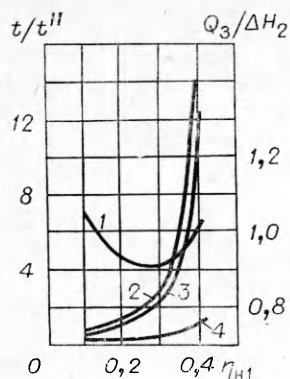


Рис. 5. Влияние начальной толщины пленки (обозначения см. на рис. 2).

нии η_{n2} время задержки зажигания меняется слабо и, начиная с некоторой η_{n2} , перестает от нее зависеть (случай «тонких пленок» [5]). Длительность переходного периода поджигаемой системы зависит от толщины начальной окисной пленки ее компонентов и при больших η_{n2} может на порядок превышать время задержки зажигания.

Величины η_{n1} и η_{n2} по-разному влияют на энергию зажигания Q_3 . Чем больше η_{n2} , тем больше и энергия, необходимая для инициирования поджигаемой системы. Увеличение η_{n1} приводит к снижению Q_3 (при $\eta_{n1} < \eta_{n2}$) и ее росту (при $\eta_{n1} > \eta_{n2}$). Наличие минимума (при $\eta_{n1} \approx \eta_{n2}$) кривой $Q_3 = f(\eta_{n1})$ объясняется тем, что с ростом η_{n1} время задержки зажигания возрастает, а тепловой поток от воспламенителя к поджигаемой системе снижается ($Q_3 = \int q dt$).

Исследование влияния степени торможения реакции нарастающим слоем продукта проводилось для систем с логарифмическим кинетическим законом ($n_1 = n_2 = 0$ и $\kappa > 0$) при различных значениях параметра κ .

Общий характер изменения скорости горения с координатой определяется, аналогично предыдущему, соотношением между количеством тепла, необходимого для стационарного горения системы ΔH , и количеством тепла, поступившим в нее ко времени формирования фронта горения [1]. При недостатке поступающего тепла имеет место замедление скорости горения (состояние депрессии), при его избытке развитие процесса в системе начинается с нарастания скорости и температуры горения. Чем больше разница между величиной степени торможения реакции обеих реагирующих систем, тем больше амплитуда колебаний нестационарной скорости горения в переходный период и больше участок поджигаемой системы, сгоревший в стационарном режиме.

Временные и энергетические характеристики процесса возрастают с увеличением степени торможения реакции реагирующих составов, но время задержки зажигания определяется в основном величиной степени торможения реакции воспламенителя, а выход на режим стационарного горения и энергия зажигания зависят в первую очередь от величины степени торможения реакции поджигаемого состава.

Сравнительный анализ. Безгазовые составы в практике их использования до начала горения представляют собой обычно образцы, состоя-

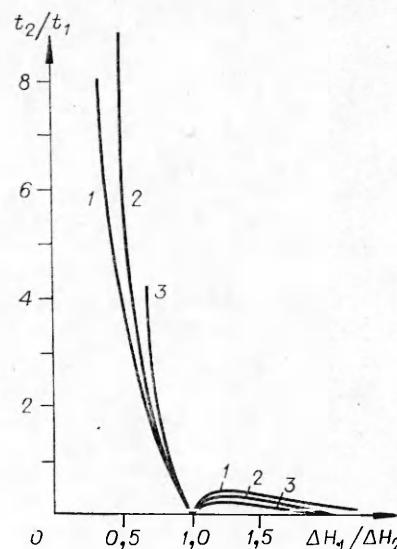


Рис. 6. Соотношение характерных времен процесса при различных избытках энтальпий реагирующих систем.

Системы: 1 — гомогенная, 2, 3 — гетерогенная (параболический и логарифмический законы реакции соответственно).

щие из прессованных порошкообразных реагентов. Если реагенты успевают расплавиться при температуре, намного меньшей температуры горения и взаимное растворение их происходит значительно быстрее химической реакции, то их горение может быть охарактеризовано как горение гомогенных систем. Если хотя бы одно из этих требований выполняется не полностью, то проявляется гетерогенный характер реакции.

Закономерности развития процесса зажигания волной горения для гетерогенных и гомогенных систем имеют много общего: они в основном определяются соотношением между избытками энтальпий воспламенителя ΔH_1 и поджигаемой системы² ΔH_2 . При $\Delta H_1 > \Delta H_2$ (индукционный режим зажигания) развитие процесса в системе начинается с нарастания скорости и температуры горения, а время задержки зажигания превышает время выхода на стационарный режим. При $\Delta H_1 < \Delta H_2$ (режим сжигания) наблюдается резкое снижение скорости и температуры горения после сформирования фронта горения в поджигаемой системе. Время задержки зажигания при этом может быть намного меньше времени установления стационарного горения. Для гомогенных и гетерогенных составов время t_1 определяется параметрами воспламенителя, а время переходного периода — параметрами обеих реагирующих систем.

В развитии процесса зажигания безгазовых гетерогенных систем есть свои особенности. Прежде всего необходимо отметить, что проанализированные выше зависимости процесса от размера компонентов, их формы, толщины начальной окисной пленки присущи лишь гетерогенным системам. Как было отмечено выше, из-за структуры фронта горения гетерогенных составов (особенно выраженных при сильном торможении реакции слоем продукта) имеет место «раздвоение» фронта горения на границе раздела реагирующих систем, когда фронт горения поджигаемой системы уже сформировался, а в воспламенителе еще идет процесс догорания. Для гомогенных составов во всем исследованном диапазоне параметров [1, 2] такие режимы не обнаружены (хотя это не исключает их принципиальной возможности при $Q_2 \gg Q_1$ и $E_2 \ll E_1$).

На рис. 6 представлено соотношение между характерными временами процесса и избытками энтальпий реагирующих систем при различных кинетических законах реакций. При сохранении общего вида зависимости имеются различия в соотношении между характерными временами для гомогенной и гетерогенной систем. Это связано, по-видимому, со структурой фронта горения. Более широкие зоны горения гетерогенных систем оказывают стабилизирующее влияние на переходный режим горения, особенно выраженное при индукционном режиме зажигания.

В заключение необходимо отметить, что выбор оптимальных условий протекания процесса в гетерогенных системах шире, так как наряду с параметрами, поддающимися изменению и в гомогенных составах (калорийность, тепловая активность, плотность запрессовки), появляется возможность варьировать и другие параметры (размеры компонентов, их форму и пр.).

*Поступила в редакцию
9/VI 1980*

ЛИТЕРАТУРА

1. А. Г. Струнина, В. Т. Мартемьянова и др. ФГВ, 1974, 10, 4.
2. А. Г. Струнина, В. И. Ермаков, В. В. Барзыкин. ФГВ, 1978, 14, 4.
3. А. П. Алдушин, В. Т. Мартемьянова и др. ФГВ, 1972, 8, 2.
4. К. Г. Шкадинский, Б. И. Хайкин, А. Г. Мержанов. ФГВ, 1971, 7, 1.
5. В. П. Стовбун. Канд. дис. ИХФ АН СССР, 1978.

² На величину избытка энтальпии системы влияет размер частиц реагентов, их форма и толщина начальной окисной пленки, а также степень торможения скорости реакции нарастающим слоем продукта. Чем больше эти параметры, тем меньше скорость горения и соответственно больше избыток энтальпии системы (1).