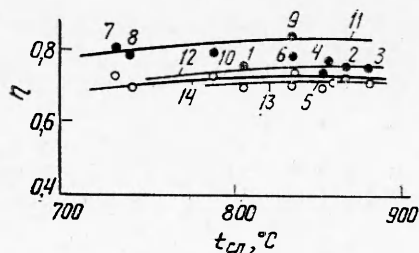


Рис. 3. Степень выгорания  $\eta$  угля при различных температурах слоя  $t_{сл}$ , °С:

● (1—10) — экспериментальные точки из [7]; 11—13 — соответствуют различным форсировкам сечения точки  $q_F$  по данным авторов [7]; ○ — расчетные значения  $\eta$  по модели из уравнений (1) — (7); 14 — обобщенные расчетные данные для условий опытов в работе [7].



ко заниженные расчетные значения  $\eta$  в сравнении с экспериментальными объясняются большей скоростью горения углерода летучих, чем коксового остатка, что имело место в экспериментах [7], но в расчетах не учитывалось.

Таким образом, предложенная модель может быть использована для расчета полей концентрации кислорода в топке с кипящим слоем, весовой доли горючих  $Z$  в слое, средней температуры слоя и для оценки эффективности сжигания твердого топлива. В дальнейших исследованиях предполагается учесть распределение частиц топлива по размерам, т. е. его полидисперсный состав, а также реальные процессы, имеющие место при воспламенении и горении натурального топлива.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. В. А. Бородуля, В. И. Дикаленко. — В кн.: Тепло- и массоперенос в дисперсных системах. Минск: ИТМО АН БССР, 1982.
2. В. А. Бородуля, Ю. А. Буевич, В. И. Дикаленко. ИФЖ, 1981, 41, 4, 679.
3. J. P. Mireur, K. V. Bischoff. AIChE J., 1967, 13, 5, 839.
4. Ю. С. Теплицкий, А. И. Тамарин. — В кн.: Тепло- и массообмен в многофазных многокомпонентных системах. Минск: ИТМО АН БССР, 1978.
5. В. В. Померанцев, К. М. Арефьев, Д. Б. Ахмедов и др. Основы практической теории горения. Л.: Энергия, 1973.
6. А. И. Тамарин, Д. М. Галерштейн. — В кн.: Проблемы тепло- и массообмена в процессах горения, используемых в энергетике. Минск: ИТМО АН БССР, 1980.
7. А. В. Рыжак, В. И. Бабий, Ю. Г. Павлов и др. Теплоэнергетика, 1980, 11, 31.

УДК 536.46

### НЕЕДИНСТВЕННОСТЬ УСТАНОВИВШЕГОСЯ РЕЖИМА ГОРЕНИЯ БЕЗГАЗОВЫХ СМЕСЕВЫХ СОСТАВОВ

Т. П. Ивлева, П. М. Кришеник, К. Г. Шкадинский  
(Черноголовка)

Предлагаемая работа направлена на изучение закономерностей горения смесевых конденсированных горючих с конденсированными продуктами реакции. Интерес к смесевым составам обусловлен стремлением к улучшению характеристик как исходного состава, так и получаемого из него в режиме высокотемпературного синтеза продукта. К смесевым составам прибегают при желании понизить температуру синтеза (разбавление инертным продуктом) или, наоборот, при необходимости повысить температуру горения. Подобная ситуация возникает при синтезе вещества, чьи собственные энергетические ресурсы недостаточны (в этом случае добавляются высококалорийные горючие компоненты). Процесс горения смесевых конденсированных веществ сложен, а потому возникает комплекс вопросов. Мы, используя методы математического моделирования, рассмотрим вопрос неединственности установившегося режима горения. Исследование проводится на примере слоевых систем типа «сэндвич».

Рассмотрим двухкомпонентную смесь слоистой структуры. Предполагается, что толщина слоев первого вещества и второго может быть произ-

вольной, но не меняющейся от слоя к слою. Для математического описания выберем слой (толщина  $L$ ), содержащий половину слоя одного компонента ( $L\varphi$ ) и половину слоя другого компонента  $((1-\varphi)L$ ). Систему координат определим следующим образом: ось  $x$  расположим на середине слоя первого компонента, ось  $y$  — перпендикулярно границе раздела сред. Тогда система дифференциальных уравнений, описывающая процесс горения с учетом теплотерь, имеет вид

$$\begin{aligned} c_1 \rho_1 \frac{\partial T_1}{\partial t} &= \lambda_1 \Delta T_1 + \rho_1 Q_1 \frac{\partial \eta_1}{\partial t} - \alpha (T_1 - T_H), \\ \frac{\partial \eta_1}{\partial t} &= z_1 (1 - \eta_1) \exp(-E_1/RT_1), \\ c_2 \rho_2 \frac{\partial T_2}{\partial t} &= \lambda_2 \Delta T_2 + \rho_2 Q_2 \frac{\partial \eta_2}{\partial t} - \alpha (T_2 - T_H), \\ \frac{\partial \eta_2}{\partial t} &= z_2 (1 - \eta_2) \exp(-E_2/RT_2). \end{aligned} \quad (1)$$

Начальные и краевые условия запишем для процесса установления режима горения при зажигании слоя с торца тепловым импульсом

$$\begin{aligned} t = 0: T_1 &= T_2 = T_H, \eta_1 = \eta_2 = 0; \\ t > 0, x > 0, y = 0: \lambda_1 \partial T_1 / \partial y &= 0; \\ y = L: \lambda_2 \partial T_2 / \partial y &= 0, \\ y = L\varphi: \lambda_1 \partial T_1 / \partial y &= \lambda_2 \partial T_2 / \partial y = (T_2 - T_1) / \mu; \\ x = 0, 0 < y < L\varphi: \lambda_1 \frac{\partial T_1}{\partial x} &= \begin{cases} v_1 (T_1 - T_{13}), & t < t_i, \\ 0, & t \geq t_i; \end{cases} \\ L\varphi < y < L: \lambda_2 = \frac{\partial T_2}{\partial x} &= \begin{cases} v_2 (T_2 - T_{23}), & t < t_i, \\ 0, & t \geq t_i. \end{cases} \end{aligned} \quad (2)$$

На границе раздела сред взято условие, отвечающее наличию теплового сопротивления, которое обусловлено существованием безынерционной прослойки с пренебрежимо малой теплоемкостью.

Проведенные в последнее время теоретические исследования установившихся режимов горения слоевых смесевых составов [1] показали наличие неединственности. Для одного и того же смесевых состава в зависимости от условий зажигания могут устанавливаться различные устойчивые режимы горения, характеризующиеся собственными скоростями распространения. Вывод о неединственности вытекает как из анализа численных решений системы (1), (2), так и из приближенных аналитических исследований ее упрощенных вариантов.

**Композиция горючего и инертного вещества ( $z_2 = 0$ ).** Выше упоминалось, что подобные смеси появляются при разбавлении конденсированного горючего инертным продуктом с целью понижения температуры синтеза. Фактически та же ситуация возникает при горении смеси двух горючих, если одно ведет себя как инертное вещество в рассматриваемом температурном диапазоне. Сюда же следует отнести процесс горения некоторых конденсированных горючих в оболочках.

Анализ предельно упрощенной математической модели [1], в которой предполагается, что  $T_1$  и  $T_2$  не зависят от  $y$ , а зона реакции перемещается с известной скоростью, зависящей экспоненциально от температуры, показал существование параметрической области, где возможна неединственность установившихся режимов горения:

$$\frac{RT_r^{(1)} T_{\max}}{E_1 (T_r^{(1)} - T_H - \varphi \rho_1 Q_1 / [\varphi c_1 \rho_1 + (1 - \varphi) c_2 \rho_2])} \leq 0,2.$$

Здесь  $T_r^{(1)} = T_H + Q_1/c_1$ ,  $T_{\max}$  — температура в зоне реакции.

В области неединственности реализуется высокотемпературный режим горения, распространяющийся с большой скоростью. Тепло из зоны реакции не успевает перераспределиться, температура в этой зоне высока, а скорость перемещения фронта близка к скорости горения чистого горючего. Второй устойчивый режим горения низкотемпературный, тепло успевает перераспределиться, и весь процесс соответствует горению гомогенно разбавленного горючего вещества.

Сделанные упрощения исключили такие существенные факторы, как устойчивость стационарного режима горения и вырождение. Из-за неустойчивости горение перестанет носить стационарный характер, и может оказаться несправедливым вывод о неединственности. С другой стороны, необходимо учитывать процесс вырождения, так как низкотемпературный режим горения может оказаться нереализуемым. Учет этих факторов и сложного процесса теплообмена с помощью модели (1), (2), с одной стороны, подтвердил вывод о существовании неединственности, а с другой — показал существенную роль рассматриваемых факторов.

**Композиция двух горючих в условиях тепловой гомогенности** ( $L \rightarrow 0, \mu \rightarrow 0$ ). В предельном случае модель (1), (2) сводится к однотемпературной модели  $T = T_1 = T_2$  и уравнению теплопроводности с осредненными теплофизическими коэффициентами:

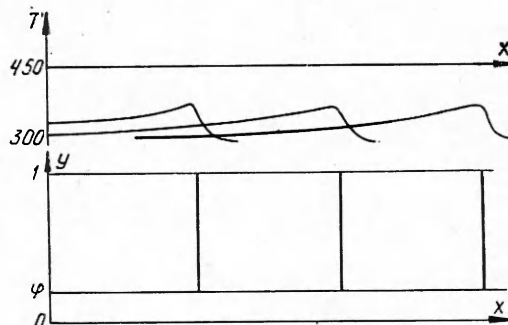
$$[\varphi c_1 \rho_1 + (1 - \varphi) c_2 \rho_2] \frac{\partial T}{\partial t} = [\varphi \lambda_1 + (1 - \varphi) \lambda_2] \frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + \varphi \rho_1 Q_1 \frac{\partial \eta_1}{\partial t} + (1 - \varphi) \rho_2 Q_2 \frac{\partial \eta_2}{\partial t} - \alpha (T - T_n). \quad (3)$$

Анализ горения конденсированного вещества с двумя независимыми химическими реакциями в отсутствие теплотерь проведен в [9]. Оказывается, в условиях теплотерь у такой смеси системы также существует параметрическая область неединственности установившихся режимов горения. Причем это — естественный по физическому смыслу процесс, и он может быть сравнительно легко реализован экспериментально.

Рассмотрим гомогенную смесь высококалорийного трудно иницируемого конденсированного горючего с обычным. При невысоких температурах иницируется низкотемпературный режим горения, в котором трудно иницируемый компонент будет играть роль инертного наполнителя. Теплотери в окружающую среду не допустят дальнейшего развития процесса. С другой стороны, иницирование высокотемпературным источником зажигания выводит физическую систему на высокотемпературный режим горения, в котором сгорают оба компонента. Структура фронта таких режимов подобна представленным на рис. 1 и 2.

**Композиция двух конденсированных горючих в общем случае.** Разобранные выше примеры позволяют ожидать у этой более сложной смеси горючей системы еще большего разнообразия возможных режимов горения. Проведенное исследование свойств математической модели (1), (2) показало возможность существования у таких систем трех устойчивых установившихся режимов горения. Пространственно-временной процесс выхода на эти режимы представлен на рис. 1—3.

Рис. 1. Пространственно-временное распределение температуры в режиме низкотемпературного горения. Положение зоны реакции в двухслойной горючей системе в последовательные моменты времени ( $T_n = 300$  К,  $E_1 = 21,5$ ,  $E_2 = 24,65$  ккал/моль,  $\varphi = 0,2$ ,  $Q_1/c_1 = 750$ ,  $Q_2/c_2 = 106,25$  К,  $z_1/z_2 = 6,66 \cdot 10^{-6}$ ).



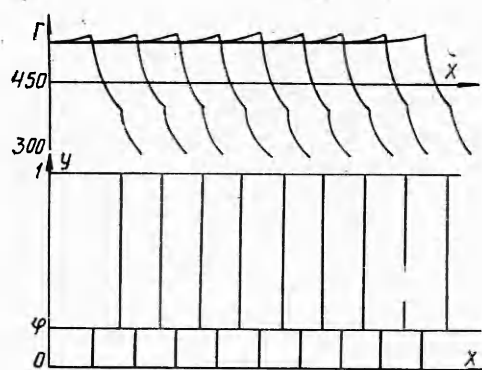


Рис. 2. Пространственно-временное распределение температуры в промежуточном режиме горения (внизу положение зоны реакции). Характеристики физической системы прежние.

**Композиция конденсированного горючего и эндотермически реагирующего компонента.** Такая смесевая система имеет определенное практическое значение для включения в сферу технологии СВС конденсированных веществ, процесс превращения которых эндотермический. Работы У. И. Гольдшлегера, А. Г. Мержанова, М. Б. Боровикова, И. А. Бурунова (Черноголовка, Москва), а также Е. А. Некрасова (Томск) со всей определенностью указывают на возможность неединственности горения и в таких системах. В этом случае вещество с эндотермическим механизмом превращения, подобно инертному, отбирает тепло, однако механизм этого процесса более сложный из-за эндотермической реакции.

**Заключение.** Таким образом, можно сделать вывод, что неединственность, т. е. зависимость установившихся режимов горения от условий зажигания, есть достаточно типичное (во всяком случае, теоретически) явление. Экспериментальные трудности в наблюдении этого явления, на наш взгляд, связаны с достаточной узостью параметрической области его существования. С другой стороны, в реальных системах имеется достаточно неучтенных факторов, затрудняющих попадание в нужную область.

Отметим, что все приведенные выше утверждения опираются на анализ математических моделей. Сопоставление «потенциальных возможностей» каждой из моделей, детали их анализа представляют самостоятельный интерес и требуют отдельного изложения.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Т. П. Ивлева, А. Г. Мержанов, К. Г. Шкадинский. Докл. АН СССР, 1981, 256, 4, 897.
2. В. А. Вольперт, Б. И. Хайкин, С. И. Худяев. Проблемы технологического горения/Под ред. А. Г. Мержанова. Т. 1. Черноголовка, 1981.

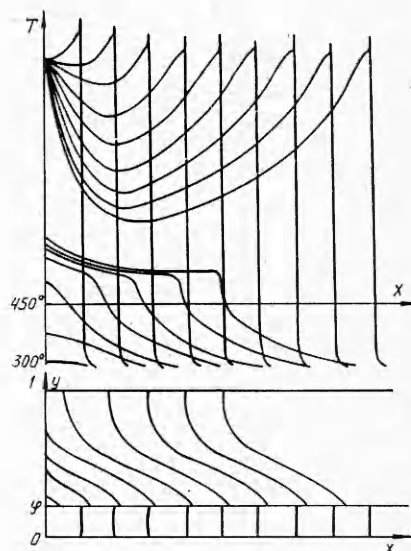


Рис. 3. Пространственно-временное распределение температуры при  $y = 1$ ,  $y = 0$  в режиме высокотемпературного горения. Внизу указано положение зоны реакции в последовательные моменты времени. Характеристики физической системы прежние.