

ЛИТЕРАТУРА

1. M. Summerfield a. o. Aeronautical Eng. Report, № 661, Princeton University, 1963.
2. В. В. Барзыкин, У. И. Гольдшлегер, А. Г. Мержанов. Докл. АН СССР, 1970, 191, 1.
3. У. И. Гольдшлегер, В. В. Барзыкин, В. И. Розенбанд. ФГВ, 1971, 7, 1.
4. А. Э. Аверсон, В. В. Барзыкин, А. Г. Мержанов. Докл. АН СССР, 1966, 169, 1.
5. В. И. Лисицкий. ФГВ, 1970, 6, 2.
6. У. И. Гольдшлегер, В. В. Барзыкин. Инж.-физ. ж., 1970, 18, 3.
7. Г. Гребер, С. Эрк, У. Григуль. Основы учения о теплообмене. М., ИЛ, 1958.
8. Ю. М. Григорьев, В. И. Лисицкий, А. Г. Мержанов. ФГВ, 1967, 3, 4.
9. А. Э. Аверсон, В. В. Барзыкин, А. Г. Мержанов. ФГВ, 1968, 4, 1.
10. А. С. Штейнберг, В. Б. Улыбин и др. Инж.-физ. ж., 1966, 10, 4.
11. В. С. Волькенштейн. Тепло- и массоперенос. Т. 1, Минск, 1962.
12. В. Г. Абрамов, В. Г. Гонтковская, А. Г. Мержанов. Изв. АН СССР, серия хим., 1966, 5.
13. Краткий справочник химика. М., ГХИ, 1963.

УДК 536.46

ОСОБЕННОСТИ ВЫХОДА НА УСТАНОВИВШИЙСЯ РЕЖИМ ГОРЕНИЯ ПРИ ЗАЖИГАНИИ БЕЗГАЗОВЫХ СОСТАВОВ НАКАЛЕННОЙ ПОВЕРХНОСТЬЮ

К. Г. Шкадинский
(Москва)

В работах [1, 2] рассмотрен нестационарный процесс зажигания горячего газа с момента начала воздействия внешнего источника тепла до установления стационарной скорости распространения пламени. С помощью расчетов на ЭВМ получены пространственно-временные зависимости переменных, изучены причины нестационарности распространения образовавшегося фронта горения и приведены формулы, которые связывают времена, характеризующие все стадии процесса — зажигание, нестационарное горение и стационарное горение. В настоящей работе аналогичные исследования проведены для безгазовых составов. В отличие от газов здесь отсутствует диффузия. Кроме того, имеется область параметров, для которых стационарное горение оказывается неустойчивым и фронт реакции распространяется в пульсирующем режиме [3]. Все это приводит к появлению ряда особенностей при выходе на установившийся режим горения.

Постановка задачи. Процесс зажигания безгазового состава накаленной поверхностью и выход на установившийся режим горения с учетом превращения вещества для реакции первого порядка приближенно описываются следующей безразмерной системой дифференциальных уравнений:

$$\begin{aligned} \frac{\partial \theta}{\partial \tau} &= \frac{\partial^2 \theta}{\partial \xi^2} + (1 - \eta) \exp(\theta/(1 + \beta \theta)), \\ \frac{\partial \eta}{\partial \tau} &= \gamma (1 - \eta) \exp(\theta/(1 + \beta \theta)) \end{aligned} \quad (1)$$

с начальными и краевыми условиями

$$\begin{aligned} \tau = 0 \quad (\xi \geq 0); \quad \theta = \theta_n, \quad \eta = 0; \\ \xi = 0 \quad (\tau > 0); \quad \theta = \theta_0. \end{aligned} \quad (2)$$

Здесь в качестве безразмерных параметров и переменных выбраны:

$$\begin{aligned} \tau &= t/t_*; \quad \xi = x \sqrt{\frac{c\rho}{\lambda t_*}}; \quad t_* = \frac{cR T_*^2}{Q E k} \exp\left(\frac{E}{R T_*}\right); \\ \theta &= \frac{(T-T_*)E}{R T_*^2}; \quad \theta_n = \frac{(T_n-T_*)E}{R T_*^2}; \quad \theta_0 = \frac{(T_0-T_*)E}{R T_*^2}; \\ \beta &= \frac{RT_*^2}{E}; \quad \gamma = \frac{cRT_*^2}{QE}; \quad z = \frac{(T_0-T_n)c}{Q}, \end{aligned}$$

где T — температура; η — глубина разложения ($0 \leq \eta \leq 1$); Q — тепловой эффект реакции; λ , c , ρ — коэффициент теплопроводности, теплоемкость и плотность вещества; E — энергия активации, k — предэкспонент; R — газовая постоянная; t — время; x — расстояние от поверхности; T_n — начальная температура состава; T_0 — температура накаливаемой стенки ($T_0 > T_n$); T_* — масштабная температура, которая выбирается из соображений удобства вычислений. С помощью ЭВМ рассчитаны пространственно-временные распределения переменных для различных режимов зажигания. Процесс рассматривался до установления либо стационарного горения, либо пульсирующего режима [3]. Расчеты проведены в широком диапазоне изменения параметров.

Как и для газов [1], весь переходный процесс (время которого t_n) будем разделять на две стадии: процесс образования нестационарного фронта (t_1) и процесс установления горения (t_2), заканчивающийся выходом на установившийся режим горения ($t_n = t_1 + t_2$). Условный характер такого разделения пояснен в [1]. В качестве скорости перемещения нестационарного фронта горения принимается скорость перемещения максимума тепловыделения.

Прежде всего отметим, что, несмотря на ряд специфических особенностей, протекание процесса для безгазовых составов имеет много общего с процессом для газов. Так, для индукционного режима зажигания ($z < 0,7$) в течение индукционного периода состав, прилегающий к накаливаемой стенке, прогревается и частично реагирует, затем образуется нестационарный фронт горения. Последующий процесс установления горения заканчивается, когда полностью сгорает предварительно прогретая масса состава (рис. 1, а). Для времени установления применима формула (5) из [1]:

$$t_2 \approx 2\sqrt{t_1 t_0},$$

где $t_0 = \frac{\lambda \rho}{c u^2}$ — характерное время стационарного горения.

В режиме сжигания ($z > 1,7$) фронт горения образуется практически мгновенно, и дальнейшая нестационарность процесса обусловлена наличием теплового потока от горячей стенки в зону горения. Горение практически устанавливается, когда тепловой поток в зоне горения мал по сравнению с теплом, выделяющимся за счет реакции (рис. 1, б). Здесь применима формула (7) из [1] для времени установления горения

$$\sqrt{\frac{t_2}{t_0}} \exp\left(\frac{t_2}{4t_0}\right) = \frac{10}{\sqrt{\pi}} \cdot \frac{(T_0 - T_r)}{(T_r - T_n)}.$$

Резкой границы между двумя крайними режимами нет; по мере изменения температуры поверхности к T_r как со стороны более высоких температур, так и со стороны более низких характерные черты одного режима вырождаются и появляются черты другого. График нестационарной скорости приведен для $T_0 = T_r$ на рис. 1, в.

Рассмотрим теперь, в чем отличие переходного процесса для безгазовых составов по сравнению с газами.

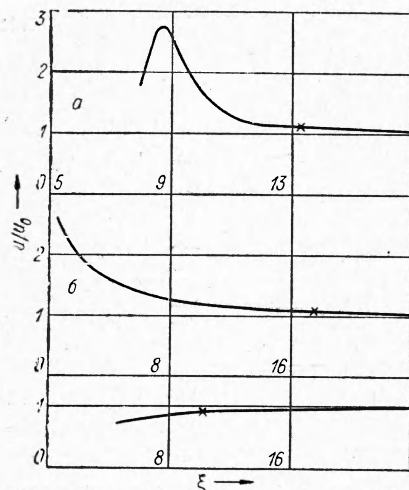


Рис. 1. Отношение неустановившейся скорости горения к стационарной для различных режимов зажигания: а) индукционный режим ($\theta_H = -5$, $\theta_0 = 0$, $\beta = 0,03$, $\gamma = 0,1$); б) режим сжигания ($\theta_H = -5$; $\theta_0 = 5$; $\beta = 0,1$, $\gamma = 0,2$); в) промежуточный режим ($\theta_H = -5$; $\theta_0 = 0$; $\beta = 0,1$; $\gamma = 0,2$).

В индукционном режиме зажигания из-за отсутствия диффузии масса частично прореагировавшего состава существенно меньше предварительного прогоревшего состава. В результате этого на первом этапе нестационарного горения глубина превращения перед фронтом существенно уменьшается при незначительном изменении температуры. Соответственно нестационарная скорость горения растет, однако в дальнейшем, достигнув максимума, она убывает из-за понижения температуры состава перед фронтом горения. Таким образом, для безгазовых составов кроме роста температуры в момент зажигания наблюдается еще рост температуры на первом этапе нестационарного горения. Можно еще отметить, что в отличие от газов к моменту установления режима горения непосредственно около поверхности остается частично непрореагировавший состав.

Если установившийся режим пульсирующий, то переходный процесс имеет более сложный характер. Из работы [3] следует, что предел устойчивости стационарного горения существенно зависит от температуры состава перед фронтом. Может оказаться, что часть вещества предварительно прогрелась до такой температуры, что при прохождении фронта через нее пульсаций не возникает.

Когда же эта часть состава сгорает и начинает гореть относительно холодный состав, то горение становится пульсирующим, а структура пульсаций меняется с изменением температуры перед фронтом горения. После сгорания предварительно прогретого состава устанавливается пульсирующий режим, соответствующий начальной температуре состава. На рис. 2 изображена неустановившаяся скорость горения для пульсирующего режима. Звездочкой отмечены момент перехода через границу устойчивости и момент выхода на установившийся пульсирующий режим.



Рис. 2. Неустановившаяся скорость горения для пульсирующего режима ($\theta_H = -5$; $\theta_0 = 0$, $\beta = 0,021$; $\gamma = 0,007$).

Промежуточный режим осуществляется, когда температура стенки близка к температуре горения. В этом режиме нестационарный процесс практически заключается в формировании фронта горения. Известно, что для безгазовых составов во фронте горения имеется избыточное тепло. Формирование его осуществляется в процессе зажигания, затем это тепло перемещается в пространстве вместе с фронтом перед зоной реакции. В связи с этим оптимальное время перехода на установившийся режим достигается при температуре стенки несколько большей, чем температура горения. Наличие избыточного тепла во фронте должно проявиться при сжигании конечного образца с теплоизолированным

торцом. Пространственно-временная картина этого явления изображена на рис. 3. В последний момент температура в зоне реакции повышается и горение заканчивается вспышкой.

В режиме сжигания наличие избыточного тепла во фронте горения также приводит к появлению некоторых особенностей в переходном процессе. Поступающее от горячей стенки тепло повышает температуру в зоне реакции (следовательно, и скорость горения), а также расходуется на формирование избыточного тепла во фронте горения. По мере удаления фронта от стенки тепловой поток в зону горения уменьшается и скорость фронта стремится к своему стационарному значению. Причем установление скорости наступает несколько раньше установления структуры фронта. После установления скорости в течение некоторого времени тепло от стенки идет на формирование избыточного тепла.

Эта тенденция тем сильнее, чем ближе процесс к границе устойчивости. Когда стационарный фронт неустойчив, то процесс установления еще более усложняется. Дополнительный тепловой поток в зону горения с точки зрения устойчивости эквивалентен повышению теплотворной способности состава. Как следует из работы [3], режим горения сдвигается при этом в более устойчивую область. Тепловой поток в зону горения на первом этапе значительный, а затем по мере удаления фронта от стенки стремится к нулю. Расчеты показывают, что нестационарное горение вначале протекает без пульсаций, затем с уменьшением теплового потока переходит в пульсирующее и, когда влиянием стенки можно пренебречь, горение выходит на установившийся пульсирующий режим. Таким образом, тепловой поток в зону реакции стабилизирует горение, препятствуя возникновению пульсаций. Расчеты показывают, что чем ближе к пределу устойчивости находится пульсирующий режим, тем меньше тепловой поток необходим для стабилизации.

В заключение рассмотрим некоторые особенности перехода на установившийся режим горения при импульсном действии источника тепла. Краевое условие (2) системы (1) заменяется следующим:

$$\xi = 0 \quad (\tau > 0) : \begin{cases} \theta = \theta_0 & \text{при } \tau < \tau_{\text{имп}}, \\ \theta'_z = 0 & \text{при } \tau \geq \tau_{\text{имп}}. \end{cases} \quad (3)$$

Критические условия зажигания безгазовых составов при импульсном подводе энергии подробно исследовались в работе [4] и здесь рассматриваться не будут. Процесс перехода на установившийся режим горения в индукционном режиме имеет много общего с процессом для газов [2]. Неустойчивость стационарного горения сказывается лишь на процессе установления, занимающего незначительную часть общего времени перехода. Зависимость времени перехода от времени импульса аналогична зависимости для газов. Минимальное время перехода на установившийся режим горения достигается, если в момент $\tau = \tau_{\text{имп}}$ градиент температуры на поверхности обращается в нуль.

В случае высокотемпературного импульсного зажигания процесс протекает существенно сложнее. Выше уже говорилось, что в режиме сжигания установление стационарной скорости горения происходит раньше, чем установление стационарной структуры фронта. После установления скорости горения избыточное тепло от поверхности идет на формирование избыточной энтальпии во фронте горения. Даже при установившейся скорости горения, но не установившейся структуре фронта отключение теплового источника может привести к существенному замедлению процесса. Дальнейший ход процесса имеет характер затухающих колебаний, причем декремент затухания определяется степенью удаления от границы устойчивости.

Если установившийся режим горения пульсирующий, то переходный процесс еще более усложняется. Следует отметить, что используемый в работе [4] резкий рост максимальной температуры в качестве критерия для определения критического времени импульса в этом случае может оказаться неприменимым. На рис. 4 приведена пространственно-временная картина процесса, где после смены условий теплообмена наблюда-

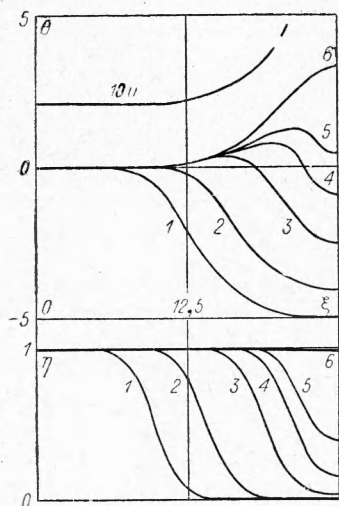


Рис. 3. Пространственно-временное распределение температуры и глубины превращения при сгорании образца с теплоизолированным торцом ($\theta_n = -5$; $\beta = 0,1$; $\gamma = 0,2$; $\theta'_\xi(25) = 0$). τ равно: 1—0; 2—20; 3—38; 4—43; 5—45; 6—48.

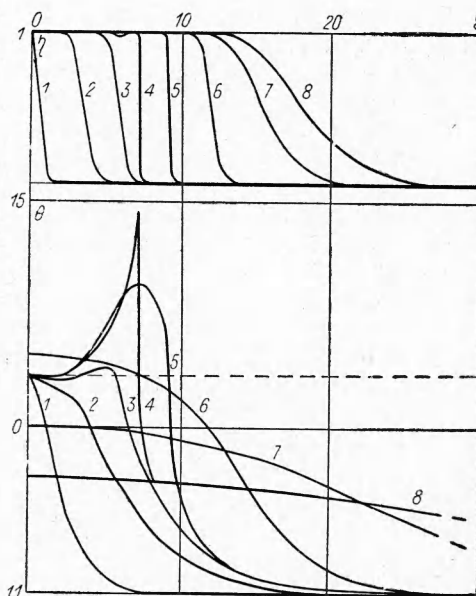


Рис. 4. Пространственно-временное распределение при зажигании тепловым импульсом ($\theta_n = -11$; $\theta_0 = 3,3$; $\beta = 0,03$; $\gamma = 0,07$; $\tau_{\text{имп}} = 31$). τ равно: 1—3,9; 2—22,7; 3—31; 4—31,8; 5—32,5; 6—47,5; 7—168,5; 8—528,5.

ется резкий рост температуры, но тем не менее горение вскоре прекращается. Как показали численные расчеты, для продолжения пульсирующего горения в системе за время импульса должен накопиться достаточный запас тепла, способный поддержать горение во время депрессии.

17/X 1970
Поступила в редакцию

ЛИТЕРАТУРА

1. А. Г. Мержанов, Б. И. Хайкин, К. Г. Шкадинский. ПМТФ, 1969, 5.
2. К. Г. Шкадинский. ФГВ, 1970, 6, 4.
3. К. Г. Шкадинский, Б. И. Хайкин, А. Г. Мержанов. ФГВ, 1971, 7, 1.
4. В. Н. Виллюнов, О. Б. Сидонский. Докл. АН СССР, 1963, 152, 1.