

ПРИБЛИЖЕННЫЙ АНАЛИЗ РЕЖИМОВ ИНИЦИИРОВАНИЯ В СОСТАВНЫХ ЗАРЯДАХ ГЕТЕРОГЕННЫХ СИСТЕМ

С. В. Костин, А. Г. Струнина, В. В. Барзыкин
(Черноголовка)

При горении заряда, состоящего из нескольких частей (запрессовок различных горючих смесей), наблюдаются нестационарные явления. Они могут быть вызваны отличием энергетических, кинетических и теплофизических параметров систем [1], каждая из которых по ходу движения фронта горения служит воспламенителем для последующей. Условно можно выделить три этапа в переходном режиме горения составного заряда: 1) горение воспламенителя при подходе фронта к поджигаемой системе; 2) процессы реагирования непосредственно в месте контакта систем¹, зависящие от характера инициирования [2]; 3) дальнейшее развитие переходного режима в поджигаемой системе, завершающееся выходом на установившееся горение [1].

Анализ характеристик процесса, полученных численным счетом [1], позволил выделить два типа переходных режимов горения в поджигаемой системе — индукционный и сжигания. Предложен способ их описания определенными комбинациями соотношений избытков энтальпий и плотностей тепловых потоков взаимодействующих систем.

Ниже предлагается аналитическое исследование режимов инициирования, основанное на анализе теплового воздействия воспламенителя на поджигаемую систему. Рассматривается случай равных теплофизических параметров реагирующих гетерогенных систем при наличии теплопотерь в окружающую среду. Приводятся результаты численного эксперимента соответствующей задачи, которые подтверждают и отчасти дополняют приближенный анализ. Дается схема расчета оптимальной переходной системы.

Приближенный анализ

Рассматриваются горючие системы с конденсированными продуктами реакции — плаками. Известно [2], что зажигание² может произойти в период нарастания теплового потока от еще горящего воспламенителя или при дополнительном тепловом воздействии раскаленными плаками сгоревшего воспламенителя. В первом случае в условиях роста теплоприхода скорость горения поджигаемого состава увеличивается, во втором на границе раздела систем наблюдается депрессия процесса, после чего горение может возобновиться. Ввиду указанных особенностей целесообразно сгруппировать переходные режимы горения соответственно характеру инициирования: осуществляется зажигание за время действия теплового потока от горящего воспламенителя или от раскаленных шлаков.

Определим характер инициирования для узких зон реакций при наличии теплопотерь. Воспользуемся методом критических условий [3], согласно которому зажигание реализуется в момент наступления равенства между скоростями теплоприхода от внешнего источника и тепловыделения от химической реакции в поджигаемой системе. Данное условие выполняется за время действия теплового потока

$$q(x_0, t) = c\rho [T'(x_0, t) - T_0] v_1' + 2 \frac{\alpha}{r} \frac{a}{v_1} [T'(x_0, t) - T_0],$$

¹ Имеется в виду область, границы которой удалены от места контакта практически менее чем на ширину прогреваемого слоя горящего воспламенителя.

² Зажигание поджигаемой системы считается реализованным в момент появления в ней у границы раздела максимума функции скорости тепловыделения.

поступающего в поджигаемый состав от горящего воспламенителя³, если при наибольшей температуре T'_1 , достигаемой на границе раздела к концу горения воспламенителя без учета химической реакции в поджигаемой системе, справедливо выражение

$$c\rho(T'_1 - T_0)v'_1 < \left[\lambda Q_2 \rho k_2 \frac{R(T'_1)^2}{E_2} \exp\left(-\frac{E_2}{RT'_1}\right) \right]^{1/2}, \quad (1)$$

где v'_1 и T'_1 — скорость и температура горения воспламенителя при наличии теплотерь; ρ , c , λ — плотность, теплоемкость и коэффициент теплопроводности, которые считаются независимыми от температуры; Q_2 , E_2 , k_2 — калорийность, энергия активации, предэкспоненциальный фактор поджигаемого состава; T_0 — начальная температура; R — газовая постоянная; α и a — коэффициенты теплоотдачи и температуропроводности; r — радиус цилиндрического заряда; $T'(x_0, t)$ — усредненная по радиусу температура на границе раздела.

Полагая [4] $v'_1 \approx v_1 \exp\left[\frac{E_1(T_1 - T'_1)}{2RT_1T'_1}\right]$ и используя условие зажигания в адиабатических условиях воспламенителем, состав которого такой же как у поджигаемой системы

$$c\rho(T_2 - T_0)v_2 \approx \left[\lambda Q_2 \rho k_2 \frac{RT_2^2}{E_2} \exp\left(-\frac{E_2}{RT_2}\right) \right]^{1/2},$$

после преобразований и логарифмирования неравенства (1) получаем критерий, определяющий характер инициирования:

$$Z \approx \ln \frac{v_2}{v_1} - \frac{E_2(T_2 - T_1)}{2RT_1T_2} - \frac{1}{2} \left(\frac{\beta_1}{\beta_2} - 1 \right) \Theta. \quad (2)$$

Здесь $\beta_i = RT_i/E_i$ ($i=1$ для воспламенителя, $i=2$ для поджигаемой системы); v_i и T_i — адиабатические значения скоростей и температур горения; $\Theta = \frac{E_1(T_1 - T'_1)}{RT_1T'_1}$. Для узких зон реакций $0 \leq \Theta \leq 1$ [4]. При оценочных расчетах (2) можно положить $T'_1 \approx T_1$.

Критерий Z — логарифм отношения скорости теплоприхода от химической реакции в поджигаемом составе к плотности теплового потока от воспламенителя, рассчитанных для температуры на границе раздела систем, равной температуре T'_1 . При $Z > 0$ зажигание осуществляется за время действия теплового потока от горящего воспламенителя. Переход фронта горения через границу раздела сопровождается нарастанием скорости горения. При $Z < 0$ горение на границе затухает и может возобновиться за время действия теплового потока от шлаков.

Зависимость критерия Z от уровня теплотерь можно получить, воспользовавшись предварительно безразмерным уравнением теплового баланса для фронта горения при наличии теплотерь [4]:

$$\Theta e^{1-\Theta} = \text{Bi}/\text{Bi}_1,$$

где $\text{Bi} = cr/\lambda$ — безразмерный коэффициент теплоотдачи; $\text{Bi}_1 = \frac{1}{4e} \frac{RT'_1}{E_1(T'_1 - T_0)} \left(\frac{v_1 r}{a}\right)^2$ — критический коэффициент теплоотдачи, выше которого горение воспламенителя невозможно.

³ Оценка потока через границу раздела сделана по методу, примененному [4] при анализе уравнения теплового баланса для фронта горения при наличии теплотерь в окружающей среде. Используя это уравнение, нетрудно показать, что $c\rho [T(x_0, t) - T_0] v'_1 \gg 2 \frac{\alpha}{r} \frac{a}{v_1} [T'(x_0, t) - T_0]$. Поэтому ниже для простоты пренебрегли тепловым потоком через боковую поверхность. Здесь x_0 — координата границы раздела; t — время.

В рассматриваемом интервале $0 \leq \Theta \leq 1$, положив $\Theta \approx \text{Vi}/\text{Vi}_1$, получим

$$Z \approx \ln \frac{v_2}{v_1} - \frac{E_2(T_2 - T_1)}{2RT_1T_2} - \frac{1}{2} \left(\frac{\beta_1}{\beta_2} - 1 \right) \frac{\text{Vi}}{\text{Vi}_1}, \quad 0 \leq \frac{\text{Vi}}{\text{Vi}_1} \leq 1. \quad (3)$$

Таким образом, характер инициирования и переходного режима горения определяется отношением скоростей горения, чувствительностью инициируемой системы к температуре RT_1'/E_2 , относительной разностью температур горения $(T_2 - T_1)/T_2$ и уровнем теплотерь⁴ Vi . Анализ выражения (3) показывает, что при некоторых значениях параметров и варьирования Vi возможна смена знака критерия Z , что означает изменение характера развития процесса.

Критерий зажигания для систем с произвольными кинетическими законами и уровнем теплотерь находим аналогичным образом. За горением составного заряда следим по перемещению максимума скорости тепловыделения. Зона химической реакции перед ним считается узкой (подробно структура волны горения изложена в [5]). Тогда условие зажигания за время действия тепловой волны горящего воспламенителя имеет вид

$$c\rho(T_1' - T_0)v_1' < Q_2\rho k_2 \int_{x_0}^{\infty} \varphi_2(\eta) \exp\left(-\frac{E_2}{RT}\right) dx. \quad (4)$$

Если воспламенительный состав аналогичен поджигаемому, в адиабатических условиях

$$c\rho(T_2 - T_0)v_2 \approx Q_2\rho k_2 \int_{x_0}^{\infty} \varphi_2(\eta) \exp\left(-\frac{E_2}{RT}\right) dx. \quad (5)$$

Здесь T_1' и T_2 — значения температур, соответствующие максимумам скорости тепловыделения воспламенителя при теплотерях и поджигаемого состава; $\varphi_2(\eta)$ — кинетическая функция поджигаемой системы.

При интегрировании в (4) температура на границе систем T_1' , в условии (5) — T_2 . Из (4) и (5), применив метод Лапласа для оценки интегралов⁵ [6], получим

$$Z \sim \ln \frac{v_2}{v_1} - \frac{E_2(T_2 - T_1')}{2RT_1T_2}. \quad (6)$$

Здесь, как и в условиях (2), (3), $Z > 0$ означает зажигание тепловым потоком от горящего воспламенителя, $Z < 0$ — при дополнительном воздействии теплового потока от плаков (зоны догорания). Связь между Z и Vi для произвольного кинетического закона установить не удастся ввиду отсутствия аналитических зависимостей температуры и скорости горения от теплотерь для таких систем. Однако выражение (6) с учетом результатов работы [7] можно использовать для качественного анализа. Например, при широких зонах реакции диапазон изменения Θ

шире: $0 \leq \Theta \leq N$, $N > 1$; $\Theta = \frac{E_1(T_1 - T_1')}{RT_1T_1'}$ — безразмерная температура,

соответствующая максимуму функции скорости тепловыделения. Соответственно шире диапазон изменения величины Z при варьировании теплотерь.

⁴ Условие, определяющее характер инициирования для узких зон реакции при отсутствии теплотерь, впервые рассмотрено в работе [2].

⁵ $\int \varphi_2(\eta) \exp\left(-\frac{E_2}{RT}\right) dx \approx \sqrt{\frac{\pi}{2}} \varphi_2(\eta) \exp\left(-\frac{E_2}{RT}\right) \left(\frac{dT}{dx}\right)^{-1} \frac{RT^2}{E_2}$.

Учтено, что из аналитической оценки в приближении «узкой зоны» реакции перед максимумом функции скорости тепловыделения и из результатов численного счета нестационарной задачи, приводимой ниже, следует: глубина превращения, соответствующая максимуму скорости тепловыделения, не зависит от величины теплового потока и T_i , а определяется кинетическими параметрами.

Численный счет

Численное решение системы уравнений, описывающей процесс горения составных зарядов гетерогенных систем [8], проводили в области устойчивых режимов горения [9] при малых значениях Bi ($Bi \leq 0,1$). Соблюдение этих требований позволило выявить нестационарные явления, порожденные именно спецификой рассматриваемого процесса, и обеспечило корректность одномерной постановки задачи [10]. Особое внимание уделено отличительному свойству гетерогенных систем — широким зонам химической реакции [5], их влиянию на процесс инициирования.

На рис. 1 рассмотрены переходные режимы для составов с равными адиабатическими скоростями горения и максимальными значениями температур, достигаемыми в зонах догорания: $v_1 = v_2$, $T_{m1} = T_{m2}$. Температуры, соответствующие максимумам функции скорости тепловыделения, различны: $T_1 \neq T_2$ (ввиду различия кинетических параметров). Слева от координаты контакта систем x_0 — пространственное изменение скорости горения воспламенителя, справа — поджигаемой системы. При $T_1 > T_2$ зажигание наступает за время действия теплового потока от горящего воспламенителя. В этот момент одновременно существуют два максимума функции скорости тепловыделения: в воспламенителе и в поджигаемой системе. Скорости их перемещения нарастают (штриховые участки кривых 1 и 1'): в воспламенителе — из-за наличия впереди существенной экзотермической реакции, в поджигаемой системе — из-за роста скорости теплоприхода, складывающегося из скорости тепловыделения за счет собственной экзотермической реакции и теплового потока от воспламенителя. Расчетное значение критерия $Z > 0$.

При $T_1 < T_2$ на границе раздела систем наблюдается глубокая депрессия горения (кривые 2 и 2'). Составной заряд вновь загорается при воздействии теплового потока от шлаков. Расчетное значение критерия $Z < 0$.

Переходной режим сопровождается изменениями интенсивности процессов, протекающих в зонах догорания систем, следующих за максимумом функции скорости тепловыделения. Реакции вблизи границы раздела ускоряются (по сравнению со стационарным режимом горения), если инициирование реализуется горящим воспламенителем, ($Z > 0$) и замедляются в случае инициирования тепловым потоком от шлаков ($Z < 0$).

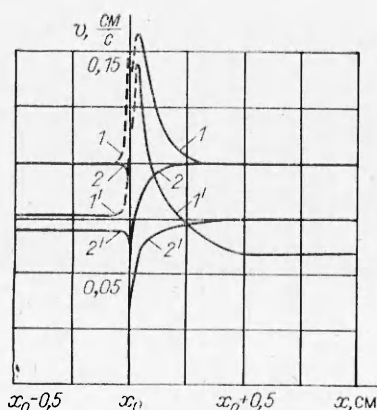


Рис. 1. Пространственное изменение скорости горения; $v_1 = v_2 = 0,1$ см/с, $T_{m1} = T_{m2} = 3460$ К, $E_1 = E_2 = 2 \cdot 10^4$ кал/моль, $T_1 = 3150$ (1, 1') и 2200 К (2, 2'); $T_2 = 2200$ (1, 1') и 2500 К (2, 2'), $Bi = 0$ (1, 1', 2) и 0,065 (2'); $Z = 0,7$ (1), 0,68 (1'), $-0,3$ (2) и $-0,35$ (2').

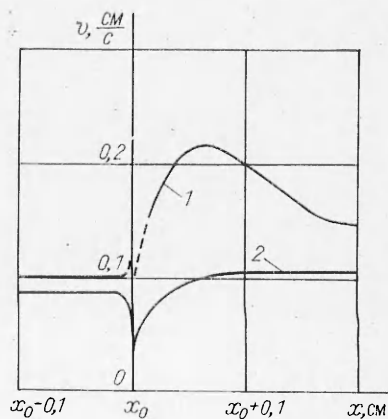
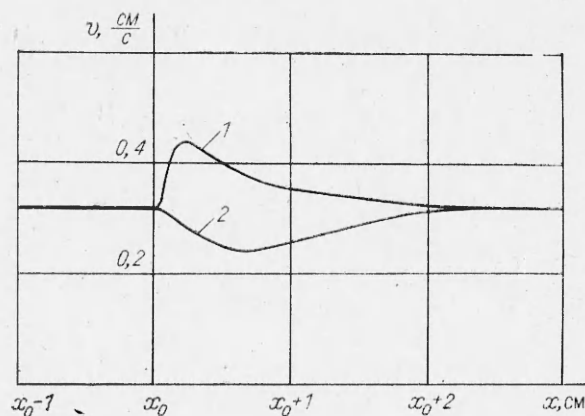


Рис. 2. Изменение нестационарной скорости горения с координатой; $v_1 = v_2 = 32$ см/с, $T_1 = T_2 = 2000$ К; $|T_{m1} - T_{m2}| = 1460$ К, $Z = 0$.

Рис. 3. Смена режима иницирования с изменением уровня теплотер; $T_{m1} = T_{m2} = 3460$ К, $T_1 = 3160$ К, $T_2 = 3400$ К, $E_1 = 20000$ кал/моль; $\beta_1/\beta_2 = 1,85$, $v_2/v_1 = 1,5$, $E_2 = 40000$ кал/моль.
 1 — $Bi = 0$, $Z = 0,18$; 2 — $Bi = 0,075$, $Z = 0,2$.



На рис. 2 рассмотрены случаи равенства адиабатических скоростей горения и температур, соответствующих максимумам функций скорости тепловыделения. Зажигание

происходит «мягко»: нет ни одновременного существования двух фронтов горения, ни депрессии процесса в момент иницирования. При дальнейшем развитии переходного процесса скорость горения изменяется в результате влияния тепловых потоков из зон догорания: при $T_{m1} > T_{m2}$ она временно нарастает (рис. 2, 1), при $T_{m1} < T_{m2}$ имеет место депрессия горения (рис. 2, 2). Таким образом, зоны догорания проявляют двойкие свойства: буферные, когда тепловой поток из зоны догорания воспламенителя сокращает время депрессии, и инерционные, выражающиеся в затягивании переходного процесса вследствие кинетических особенностей формирования зоны догорания поджигаемой системы и взаимодействия тепловых потоков контактирующих систем.

Анализ критерия Z (3) указал на зависимость переходного режима горения от уровня теплотер. Если с увеличением Bi критерий Z не меняет знака, то характер процесса аналогичен наблюдаемому в адиабатических условиях. Действительно, пространственные изменения нестационарной скорости горения при $Bi > 0$ (см. рис. 1, 1', 2') качественно повторяют реализуемые в адиабатических условиях (см. рис. 1, 1, 2). Предел по зажиганию для $Z > 0$ (при $Bi > 0$) совпадает с пределом по горению воспламенителя (переходной режим может завершиться выходом на установившееся горение, если не достигнут предел по горению поджигаемой системы). При $Z < 0$ ($Bi > 0$) предел по зажиганию ниже пределов по горению рассматриваемых систем.

Если при варьировании Bi знак Z меняется, то меняется и характер развития процесса. На рис. 3 продемонстрирован один из возможных случаев. В адиабатических условиях реализовалось зажигание горящим воспламенителем: $Z > 0$ при $Bi = 0$. С увеличением теплотер знак Z изменился. На границе раздела систем наблюдалось потухание, затем горение возобновилось ($Z < 0$, $Bi > 0$).

С увеличением теплотер снижается влияние зоны догорания на развитие переходного процесса. Это связано с уменьшением разности между максимальными значениями температур зон догорания и температурами, соответствующими максимумам функций скорости тепловыделения.

Численные эксперименты, приведенные для различных соотношений энергетических и кинетических параметров систем, подтвердили возможность применения критерия Z для анализа процесса иницирования.

Выбор переходной системы

Определение характера иницирования важно для оценки надежности зажигания. Анализ результатов аналитического и численного исследований позволяет предложить способ расчета параметров переходной системы, помещаемой между воспламенителем и поджигаемым составом

с целью устранения потухания на границе⁶. Пусть $Z < 0$. Потухания не будет, если на границах переходной системы с воспламенителем ($k=1$) и поджигаемой системой ($k=2$) выполняются условия $Z_k > 0$, $k=1,2$; где k — номер границы. В адиабатических условиях $Z_k > 0$, $k=1,2$, если

$$\frac{E_2(T_{12}-T_2)}{2RT_2T_{12}} > \ln \frac{v_{12}}{v_2} > \frac{E_{12}(T_{12}-T_1)}{2RT_1T_{12}} - \ln \frac{v_2}{v_1} \quad (7)$$

(индекс 12 соответствует параметрам переходной системы). Следовательно, область параметров, удовлетворяющих оптимальной переходной системе, существует, если

$$\frac{E_2(T_{12}-T_2)}{2RT_2T_{12}} - \frac{E_{12}(T_{12}-T_1)}{2RT_1T_{12}} + \ln \frac{v_2}{v_1} > 0, \quad (8)$$

где E_2, v_2, v_1, T_2, T_1 — заданы; E_{12}, T_{12} — искомые величины. Подобрав из (8) E_{12} и T_{12} , определяем из (7) диапазон приемлемых значений v_{12} . При необходимости выбранную систему можно исследовать на возможность смены характера иницирования при $Vi = \text{var}$ либо изначально решать задачу для $Z_k = Z_k(Vi)$. Анализ полученных выражений показал возможность подбора ряда реальных величин параметров, удовлетворяющих условиям (7), (8). Длина заряда переходной системы должна быть достаточной, чтобы к концу его горения T_{12} и v_{12} успели принять значения, лежащие в выбранном диапазоне⁷.

Выводы

1. Найден критерий, определяющий развитие процесса иницирования при произвольном уровне теплопотерь для узких и широких зон реакций во взаимодействующих системах.

2. Показана возможность смены режима иницирования при варьировании величины теплопотерь.

3. Показано, что развитие процесса иницирования гетерогенных систем определяется параметрами, соответствующими максимумам функций скоростей тепловыделения. Отмечена роль зон догорания в дальнейшем развитии переходного режима.

4. Доказана принципиальная возможность подбора переходной системы, устраняющей потухание на границе раздела составного заряда.

Авторы благодарны А. Н. Фирсову за программу, использованную в численном счете.

Поступила в редакцию 3/1 1985

ЛИТЕРАТУРА

1. А. Г. Струнина, Т. М. Мартемьянова и др. ФГВ, 1974, 10, 4.
2. А. Г. Струнина, И. П. Ваганова, В. В. Барзыкин. ФГВ, 1977, 13, 6.
3. А. Э. Аверсон, В. В. Барзыкин, А. Г. Мержапов. Докл. АН СССР, 1968, 178, 1.
4. Я. Б. Зельдович, Г. И. Баренблатт и др. Математическая теория горения и взрыва. М.: Наука, 1980.
5. А. П. Алдушин, Т. М. Мартемьянова и др. ФГВ, 1972, 8, 2.
6. П. Г. де Брейн. Асимптотические методы в анализе. М.: ИЛ, 1961.
7. К. Г. Шкадинский, М. И. Лебедева. ФГВ, 1975, 11, 4.
8. А. Г. Струнина, А. П. Фирсов, С. В. Костин. ФГВ, 1981, 17, 5.
9. К. Г. Шкадинский, Б. И. Хайкин, А. Г. Мержапов. ФГВ, 1971, 7, 1.
10. А. В. Лыков. Теория теплопроводности. М.: Высшая школа, 1967.
11. С. В. Костин, А. Г. Струнина, В. В. Барзыкин. ФГВ, 1982, 18, 5.

⁶ Вопрос оптимизации переходного процесса горения в поджигаемой системе требует дополнительного рассмотрения.

⁷ Возможность подбора оптимальной переходной системы подтверждена экспериментально на хромово-алюминиевых составах. Использовался алюминий разной дисперсности и чистоты. Эксперименты проводились по методике, изложенной в работе [11].