

4. Бретшнайдер С. Свойства газов и жидкостей. Инженерные методы расчета.— М.; Л.: Химия, 1966.— 536 с.
5. Кэй Д., Лэби Т. Таблицы физических и химических постоянных.— М.: Гос. изд-во физ.-мат. лит., 1962.— 247 с.
6. Рид Р., Шервуд Т. Свойства газов и жидкостей (определение и корреляция).— Л.: Химия, 1971.— 704 с.
7. Нащокин В. В. Техническая термодинамика и теплопередача.— М.: Высш. шк., 1980.— 467 с.
8. Юдаев Б. Н. Техническая динамика. Теплопередача.— М.: Высш. шк., 1988.— 480 с.
9. Johnson J. L. Kinetics of coal gasification.— N. Y.: John Wiley & Sons, 1979.
10. Щегинков Е. С. Физика горения газов.— М.: Наука, 1965.— 740 с.
11. Peters N. Premixed burning in diffusion flames — the flame zone model of Libby and Economos // Int. J. Heat Mass Transfer.— 1979.— 22, N 5.— P. 691—703.
12. Виленский Т. В., Хзмалян Д. М. Динамика горения пылевидного топлива.— М.: Энергия, 1977.— 248 с.
13. Gavind R., Shah J. Modeling and simulation of an entrained flow coal gasifier // AIChE J.— 1984.— 30, N 1.— P. 79—92.
14. Dinsmoor V., Galland J. M., Edgar T. F. The modeling of cavity formation during underground coal gasification // J. Petroleum Technology, 1978, May.— P. 695—704.
15. Франк-Каменецкий Д. А. Диффузия и теплопередача в химической кинетике.— М.: Наука, 1967.— 491 с.
16. Беннет К. О., Майерс Дж. Е. Гидродинамика, теплообмен и массообмен.— М.: Недра, 1966.— 726 с.
17. Основы практической теории горения/Под ред. В. В. Померанцева.— Л.: Энергоатомиздат. Ленингр. отд-ние, 1986.— 310 с.
18. Лавров Н. В. Физико-химические основы горения и газификации топлива.— М.: Металлургиздат, 1957.— 288 с.

г. Люберцы

Поступила в редакцию 7/VII 1992

СДК 536.46

О. Ю. Перевалов, В. Т. Кузнецов, И. Г. Дик

О ПЕРЕХОДЕ ФРОНТА ГОРЕНИЯ ЧЕРЕЗ НЕИДЕАЛЬНЫЙ КОНТАКТ ДВУХ ГАЗИФИЦИРУЮЩИХСЯ ТВЕРДЫХ ТОПЛИВ

Приводятся результаты моделирования (в рамках феноменологической теории нестационарного горения) перехода фронта горения через зазор, разделяющий различающиеся топлива. Построены границы, разделяющие области с различными последствиями перехода горения через контакт.

Изучение перехода послышного горения с одного топлива на другое представляет интерес для многих практических целей. Топлива, составляющие огневую цепь, могут различаться как своими теплофизическими, так и термическими характеристиками. Ниже исследуется новый фактор — возможное термическое сопротивление между воспламенителем (В) и поджигаемым образцом (П). Такое термическое сопротивление может представлять собой воздушный зазор, возникающий в процессе сборки огневой цепи или во время горения из-за растрескивания вследствие термических напряжений.

Постановка теоретической задачи во многом заимствована из [1]. Пусть конденсированное вещество В (характеристики которого помечаются индексом 1), способное к горению с поверхности, находится в контакте на плоскости $x = 0$ с другим конденсированным веществом П, занимающим полупространство. Длина воспламенителя x_s должна составлять достаточное количество тепловых масштабов горения κ_1/u_1 , где κ_1 — коэффициент температуропроводности воспламенителя; u_1 — линейная скорость его горения. Предполагается одномерность процесса, постоянство теплофизических характеристик компонентов составного образца.

В рамках феноменологического подхода [2, 3] задача о нестационарном горении системы сводится к исследованию уравнения теплопро-

водности с подвижной границей $x = x_s$ при соответствующих начальных и граничных условиях. Замыкание уравнений совершается привлечением феноменологических соотношений между скоростью горения, градиентом температуры на поверхности конденсированной фазы и температурой поверхности для горящего в данный момент элемента, составляющего полный образец.

В математической постановке используются индексы $i = 1$ или 2 для параметров В или П соответственно, верхний 0 — для параметров стационарного горения, s — для значений параметров на поверхности горения.

Дополняющие уравнение теплопроводности

$$\frac{\partial T_i}{\partial t} = \kappa_i \frac{\partial^2 T_i}{\partial x^2},$$

феноменологические связи выбираются в виде

$$u_i = \exp(-E_i/(2RT_{si}) + C_i),$$

$$u_i = \exp(a_i + \beta_i(T_{si} - \kappa_i \varphi/u_i)),$$

где $\varphi = \left(\frac{\partial T}{\partial x}\right)_{x=x_s}$, $\dot{x}_s = \frac{dx_s}{dt}$.

В начальный момент $T_i(x) = T_0 + (T_{s1} - T_0) \exp(u_1^0(x - x_s(0)))$, при $x \rightarrow -\infty$ $T \rightarrow T_0$.

В такой постановке поверхность раздела топлив находится в точке $x = 0$. Если пренебречь теплоемкостью моделируемого зазора, то условиями сопряжения на контакте двух реагентов будут непрерывность теплового потока и разница температур, определяемая тепловым сопротивлением δ/λ :

$$T_2(t, 0) - T_1(t, 0) = \frac{\delta}{\lambda} \lambda_1 \frac{\partial T_1(t, 0)}{\partial x},$$

где δ — толщина, а λ — коэффициент теплопроводности моделируемого зазора (предположительно газового).

Случай, когда (при наличии зазора) $В = П$, рассмотрен в [4]. Ниже предполагается, что воспламенитель отличается от поджигаемого образца.

В модель закладываются также возможности описания процесса загорания поджигаемого вещества до подхода фронта горения к границе раздела. Такая ситуация может трактоваться как наблюдаемый в практике эффект «отстрела» несгоревшего слоя воспламенителя. Критерий зажигания имеет вид [1, 4]

$$\lambda_2 \frac{\partial T}{\partial x} \Big|_{x=0} = \psi \int_{-\infty}^0 \left[\exp\left(-\frac{E_f}{RT}\right) - \exp\left(-\frac{E_f}{RT_{ii}}\right) \right] dx,$$

где E_f — энергия активации зажигания; ψ — некоторая константа, определяемая так, чтобы это равенство выполнялось при подходе фронта к границе контакта (без зазора) однотипных топлив. Критерием погасания, как и в [1], считалось падение скорости горения в 1000 раз ниже стационарного уровня.

Если в ходе вычислений выполняется условие «отстрела», то дальнейший расчет ведется начиная с $x_s = 0$ и условий на поверхности П, сформировавшихся к этому моменту времени.

Таким образом, в задаче присутствуют три величины, имеющие смысл энергии активации E_1, E_2, E_f , константы скорости горения a_1, a_2, C_1, C_2 , плотности ρ_1, ρ_2 , теплофизические характеристики $c_1, c_2, \lambda_1, \lambda_2$, температуры поверхности стационарно горящих образцов T_{s1}^0, T_{s2}^0 , коэффициенты чувствительности скорости горения к начальной температуре β_1, β_2 .

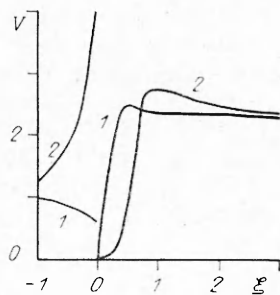


Рис. 1. Зависимость скорости горения от расстояния до контакта; $\delta = 0$ (1) и 45 мкм (2).

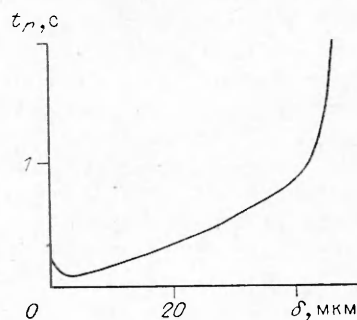


Рис. 2. Зависимость времени установления стационарного режима от величины зазора.

В относительных переменных (см., например [1]) решение системы уравнений определяется одиннадцатью безразмерными параметрами, что делает прямой анализ поставленной задачи, в том числе и численный, затруднительным.

Ниже приведены результаты расчетов на ЭВМ. Применялась неявная разностная схема с ловлей фронта (поверхности горения) в узел сетки. В качестве расчетных параметров взяты следующие характеристики топлив: $c_1 = 0,28$ кал/(г·К), $c_2 = 0,25$ кал/(г·К), $\lambda_1 = 24,4 \times 10^{-3}$ кал/(см·с·К), $\lambda_2 = 35,7 \cdot 10^{-3}$ кал/(см·с·К), $\rho_1 = 1,75$ г/см³, $\rho_2 = 1,74$ г/см³, $E_1 = 15$ ккал/моль, $E_2 = 21,4$ ккал/моль, $E_f = 43$ ккал/моль, $u_1^0 = 0,43$ см/с, $u_2^0 = 0,96$ см/с, $T_{s1}^0 = 810$ К, $T_{s2}^0 = 1170$ К, $\beta_1 = 2,2 \cdot 10^{-3}$ К⁻¹, $\beta_2 = 0,7 \cdot 10^{-3}$ К⁻¹.

На рис. 1 показана зависимость безразмерной скорости горения системы $V = u/u_1^0$ от безразмерного расстояния $\xi = u_1^0 x / \kappa_1$ до границы раздела при различных зазорах δ . Если при идеальном контакте (рис. 1, 1) более высокая теплоемкость поджигаемой системы охлаждает воспламенитель, приводя к замедлению горения, то зазор затрудняет теплоотдачу, создавая при этом недостаток тепла в поджигаемой системе и избыток тепла в образце В, что приводит к его быстрому сгоранию (рис. 1, 2), после чего скорость горения II очень мала, значит и велика вероятность погасания.

В качестве критерия устойчивой передачи горения можно, подобно [4, 5], использовать время установления t_r , определяемое как период, в течение которого скорость фронта отклонялась от своего стационарного уровня более чем на 5%. Зависимость $t_r(\delta)$ показана на рис. 2, где виден ее пемопотонный характер. Падающий участок связан с уменьшением охлаждения воспламенителя и присутствует далеко не для каждой пары топлив, составляющих композицию. При дальнейшем увеличении δ следует резкий (вплоть до вертикальной асимптоты) рост t_r из-за ухудшения теплопередачи через зазор. Можно считать превышение t_r некоторой величины, например 10 с, альтернативным критерием определения случая обрыва огневой цепи. Этот критерий, как показывает сравнение расчетов, дает близкие результаты с применением критерия фиксированного уровня падения скорости горения.

Вследствие многопараметричности задачи большое значение имеют интуитивные соображения, привлекаемые при обобщении и обработке экспериментальных и расчетных данных по передаче горения вдоль комбинированного образца. Здесь для анализа передачи горения между различными составами использовалась предложенная в [4] диаграмма в координатах ΔH_{12}^0 и φ_{12} , где $\Delta H_{12}^0 = \Delta H_1^0 / \Delta H_2^0 = [\kappa_1 u_2 (T_{s1} - T_0)] / [\kappa_2 u_1 (T_{s2} - T_0)]$ — отношение избытков энтальпии; $\varphi_{12} = [u_1 (T_{s1}^0 - T_0) \kappa_2] / [u_2 (T_{s2}^0 - T_0) \kappa_1]$ — отношение градиентов температуры на поверхности при стационарном горении. В плоскости этих координат наносились области, соответствующие различным режимам переходных процессов. Изме-

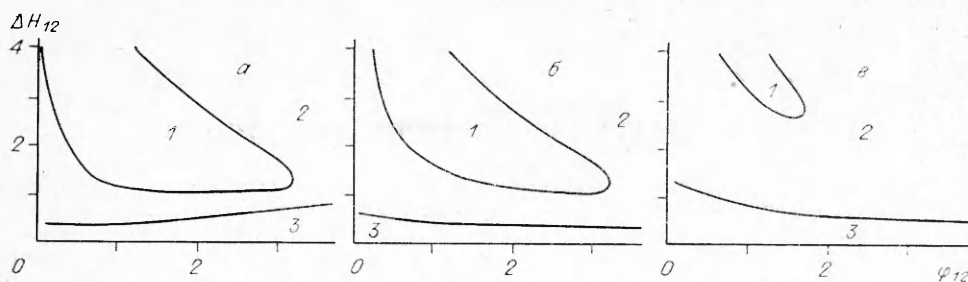


Рис. 3. Диаграммы переходных режимов горения для $\delta = 0$ (а), 20 (б) и 100 мкм (в). 1 — «отстрел» воспламенителя; 2 — успешная передача горения; 3 — область погасания.

нения ΔH_{12}^0 , φ_{12} достигались варьированием λ_2 , T_{s2}^0 (т. е. воспламенитель фиксирован, а вещество II варьируется).

На рис. 3 показаны рассчитанные диаграммы для различных δ . Обращает на себя внимание изменение характера кривой, разделяющей области 1 и 2. Вместо растущей при $\delta = 0$ зависимость $\Delta H_{12}^0(\varphi_{12})$ становится падающей при достаточно большом δ . Вследствие этого для комбинаций с достаточно большим φ_{12} наличие небольшого зазора может приводить к увеличению надежности передачи горения (об этом же свидетельствует и рис. 2). Значительный рост контактного сопротивления приводит к расширению области прерывания огневой цепи, особенно для комбинаций с малым φ_{12} .

Решающее значение для надежности передачи горения имеет величина ΔH_{12}^0 . С увеличением δ , как видно из рис. 3, область «отстрела» воспламенителя уменьшается. Это связано с недостатком тепла в поджигаемом веществе вследствие ухудшения теплопередачи. Прерывание горения при переходе через прослойку может происходить и вследствие погасания воспламенителя. В данных расчетах эта область, очень малая по размеру, содержится внутри зоны непередачи горения, концентрируясь при малых φ_{12} и ΔH_{12}^0 .

Сделаем несколько замечаний. Приведенные на рис. 3 (для случая идеального контакта) области нестационарных режимов перехода горения с вещества В на II существенно отличаются от приведенных в [1, 4], что говорит об неуниверсальности координат, используемых в [1, 4] и в данной работе. Критерий погасания в виде заданного уровня падения скорости горения, как показывают расчеты, может приводить к передаче горения составам, у которых температура поверхности падает вплоть до 420 К, что маловероятно. В связи с этим желательно привлекать и другие критерии. И, наконец, использование феноменологических зависимостей для режимов горения, сильно отличающихся от стационарного (погасание, зажигание), требует осторожности.

Тем не менее, использование описанного подхода дает качественно непротиворечивые результаты, позволяющие интерпретировать общие закономерности переходных (через контакт) режимов горения составных образцов.

ЛИТЕРАТУРА

1. Кискин А. Б. Моделирование нестационарного горения газифицирующихся систем. — Канд. дис. ... ИХТИГ. — Новосибирск, 1989.
2. Новожилов Б. Б. Нестационарное горение твердых ракетных топлив. — М.: Наука, 1973.
3. Зельдович Я. Б., Лейпуцкий О. И., Либрович В. Б. Теория нестационарного горения пороха. — М.: Наука, 1975.
4. Перевалов О. Ю., Кузнецов В. Т., Дик И. Г. и др. Роль поверхности контакта на передачу горения вдоль составного образца // Макроскопическая кинетика, химическая и магнитная газодинамика. — Томск; Красноярск: ТГУ, 1991. — Ч. 1. — С. 93—94.
5. Симоненко В. Н., Зарко В. Е., Кискин А. Б. и др. Устойчивость горения составных металлизированных образцов // ФГВ. — 1983. — 19, № 5. — С. 62—64.