

исходит. Для сравнения на рис. 3, 1 [1] показана толщина слоя несгоревшего вещества в стационарном режиме горения при $\beta = 8$. Эта величина, естественно, не зависит от длины образца и в выбранных переменных равна единице.

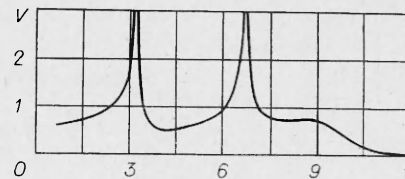


Рис. 4.

Соответствующее изменение скорости горения со временем для $L = 11$ показано на рис. 4. После очередной вспышки (непоказанная на рисунке высота пиков скорости $V = 16$) наступает область депрессии и затем скорость горения уменьшается до нуля, следующая вспышка не происходит.

В заключение отметим, что так же, как и для погасания пороха на металлической пластине, постановка соответствующего эксперимента и сопоставление экспериментальных данных о зависимости толщины несгоревшего слоя к-фазы от начальной длины образца с расчетными данными в случае безгазовых горючих составов в принципе может быть использовано для уточнения модельных представлений о механизме горения.

Поступила в редакцию
18/III 1980

ЛИТЕРАТУРА

1. С. С. Новиков, П. Ф. Похил и др. Докл. АН СССР, 1968, 180, 6.
2. С. С. Новиков, Ю. С. Рязанцев. ПМТФ, 1969, 2.
3. О. И. Нефедова, С. С. Новиков и др. ПМТФ, 1970, 2.
4. В. С. Берман, С. С. Новиков, Ю. С. Рязанцев. ПМТФ, 1972, 2.
5. А. А. Зелип, О. И. Лейпунский, В. М. Пучков. ФГВ, 1978, 14, 3.
6. К. Г. Шкадипский, Б. И. Хайкип, А. Г. Мержапов. ФГВ, 1971, 7, 1.
7. Б. В. Новожилов. Докл. АН СССР, 1961, 141, 1.
8. Д. А. Фрапк-Камеппецкий. Диффузия и теплопередача в химической кинетике. М., Наука, 1967.
9. С. К. Годунов, В. С. Рябенский. Разностные схемы. М., Наука, 1973.

О НЕСТАЦИОНАРНОМ ГОРЕНИИ В ОКРЕСТНОСТИ КОНТАКТА ДВУХ ТОПЛИВ

А. М. Липанов, А. В. Алиев

(Ижевск)

В работах [1, 2], посвященных процессам нестационарного горения твердого топлива, исследуется топливо с однородными свойствами. Если же рассматривать горение в окрестности контакта двух топлив с разными теплофизическими свойствами, то обнаруживаются новые закономерности, отсутствующие при рассмотрении однородного топлива. В частности, выход фронта пламени на границу топлив превращает предварительно стационарный процесс горения в нестационарный, требующий в ряде случаев совместного решения задач горения с задачами о процессах, происходящих в газовой фазе. В известной авторам литературе этот вопрос не исследовался.

Настоящая работа посвящена исследованию локальной нестационарной скорости горения топлива в окрестности границ при следующих допущениях:

— изменение температуры и относительной концентрации прореагировавшей части топлива происходит только в направлении, перпендикулярном горячей поверхности;

— оба топливных состава имеют постоянные, но отличающиеся друг от друга физико-химические характеристики;

— в к-фазе происходит одна химическая реакция аррениусовского типа;

— температура горячей поверхности является известной функцией давления;

— контакт топлив по границе идеальный.

При перечисленных допущениях система уравнений, описывающая процесс в к-фазе в координатной системе, связанной с движущейся поверхностью горения, имеет вид [2]

$$\begin{aligned} \partial T / \partial t - 1 / \rho c \cdot \partial (\lambda \cdot \partial T / \partial r) / \partial r - u \cdot \partial T / \partial r &= Q(1 - \beta) K \exp(-E/RT) / c, \\ \partial \beta / \partial t - u \cdot \partial \beta / \partial r &= K \exp(-E/RT)(1 - \beta), \\ T|_{r=0} = T_s(p), T|_{r \rightarrow \infty} = T_w, \beta|_{r \rightarrow \infty} = 0, & \quad (1) \\ -\lambda \partial T / \partial r|_{r=0} = \rho c u_{\text{ст}}(T_s - T_{\text{ном}} - Q\beta_s/c) + & \\ + \rho c(u - u_{\text{ст}})(T_s - T_{\text{ном}} - B - Q\beta_s/c) + \varphi_n, & \\ x_s = \int_0^t u dt + x_n. & \end{aligned}$$

Здесь и в дальнейшем приняты следующие обозначения: T — температура; β — относительная концентрация прореагировавшего топлива (к-фазы); p — давление в газовой фазе; ρ , λ , c — плотность, теплопроводность, теплоемкость к-фазы; K — предэкспонент; E — энергия активации; Q — тепловая энергия реакции в к-фазе; R — универсальная газовая постоянная; u — скорость горения топлива; φ — дополнительный тепловой поток в к-фазу от продуктов сгорания вследствие воздействия турбулентного потока (обуславливает эрозивное горение); B — термохимическая константа твердого топлива; r — пространственная координата; t — время; x — величина сгоревшего свода (принимается так, чтобы $x = 0$ на границе топлив); индексы: 1 — первоначально горящее топливо (покрытие); 2 — основное топливо; s — горящая поверхность топлива; w — параметры в непрогретом топливе; n — начальные значения; ном — номинальные значения в стационарном законе для скорости горения топлива; ст — значения, соответствующие стационарному режиму (при $\varphi_n = 0$); * — относительные значения параметров.

Предпоследнее уравнение системы (1) записано для топлив со стационарным законом горения, удовлетворяющим соотношению

$$u = u_1 p^{\gamma} B / (B - T_w + T_{\text{ном}}) = u_{\text{ст}} B / (B - T_w + T_{\text{ном}}).$$

Далее используется приближенное выражение для теплового потока

$$-\lambda \partial T / \partial r|_{r=0} = \rho c u_{\text{ст}}(T_s - T_{\text{ном}} - Q\beta_s/c) + \varphi_n, \quad (2)$$

справедливое в том случае, когда

$$1,2 > B / (T_s - T_{\text{ном}} - Q\beta_s/c) > 0,8.$$

Использование уравнения (2) позволяет оценить предельные значения нестационарной скорости горения топлива в окрестности границы.

Из записанной системы следует, что нестационарная скорость горения есть функция вида:

$$u = \Phi [t, \beta, x_n, T_{s1}, T_{s2}, T_w, \varphi_n, u_{ст1}, u_{ст2}, \lambda_1, \lambda_2, \rho_1, \rho_2, c_1, c_2, Q_1, Q_2, K_{01} \exp(-E_1/R), K_{02} \exp(-E_2/R)]. \quad (3)$$

Сложная зависимость нестационарной скорости горения не позволяет получить простых и универсальных решений. Единственным средством исследования системы (1) остается численный анализ.

Для проведения расчетов функцию (3) удобно представить в зависимости от безразмерных аргументов

$$u = \Phi \{t, \beta, x_n, T_{s1}, T_s^*, T_w, \varphi_n, u_{ст1}, u_{ст}^*, \lambda_1, \lambda^*, \rho_1, \rho^*, c_1, c^*, Q_1, Q^*, K_1 \exp(-E/R), K^* \exp[-(E_1 - E_2)/R]\}, \quad (4)$$

выбрав в качестве масштабов параметры $\rho, u_{ст}, T_w, x_n$.

В настоящей работе анализ выполнен для уравнения (4) при варьировании значениями $\lambda^*, \rho^*, c^*, Q^*, K^*, E^*$. Величины $\lambda_1, \rho_1, c_1, Q_1, K_1, E_1$ приняты равными значениям некоторого «среднего» топливного состава. Принято также $T_s^* = 1, p = \text{const}$. Решение системы выполнено по консервативной неявной конечно-разностной схеме с порядком точности 0 ($\Delta t, \Delta r^2$) с применением метода прогонки. Нахождение скорости горения проводилось выполнением последовательных итераций при решении уравнения теплопроводности с целью удовлетворения условия $T|_{r=0} = T_s(p)$. Невозможность удовлетворения этого соотношения при любом значении $u > 0$ соответствовала погасанию топлива. Шаг по пространственной сетке выбран изменяющимся по геометрической прогрессии, шаг по времени соответствует числу Куранта $K_u = 0,9$.

Расчет выполнен при следующих исходных данных:

$$\begin{aligned} u_{ст1} = u_{ст2} &= 0,01 \text{ м/с}, \quad \lambda_1 = 0,325 \text{ Вт/(м} \cdot \text{К)}, \quad \rho_1 = 1750 \text{ кг/м}^3, \\ c_1 &= 1130 \text{ Дж/(кг} \cdot \text{К)}, \quad T_{s1} = 862 \text{ К}, \quad T_w = 300 \text{ К}, \quad Q_1 = 0,535 \cdot 10^6 \text{ Дж/кг}, \\ E_1 &= 0,164 \cdot 10^6 \text{ Дж/моль}, \quad K_1 = 0,2 \cdot 10^{14} \text{ 1/с}, \quad \varphi_n = 0,7 \cdot 10^7 \text{ Вт/м}^2, \\ x_n &= 3 \cdot 10^{-5} \text{ м}. \end{aligned}$$

Выбор параметров задачи $a^* = a_2/a_1$ принят таким, чтобы охватить все возможные значения, встречающиеся на практике. Далее, под первым этапом горения понимается время, в течение которого горит первый слой топлива, а под вторым — горение второго слоя. Анализ проводится после попадания границы топлив в прогретую зону.

Из проведенных расчетов следует, что наименьшее влияние на нестационарную скорость горения оказывает различие плотностей топлив ρ^* (рис. 1, а). При $\rho^* < 1$ после попадания границы топлив в прогретую зону во второй слой поступает тепловой поток больший, чем в стационарных условиях. Это приводит к увеличению температуры второго слоя, теплопроизводительности химических реакций в нем, что оказывает влияние на уровень температур в первом слое. Воздействие перечисленных эффектов приводит к тому, что на обоих этапах горение происходит со скоростью $u > u_{ст}$.

В случае $\rho^* > 1$ изменение u на первом этапе противоположно предыдущему случаю, однако на втором этапе по-прежнему $u > u_{ст}$. Этот факт можно объяснить следующим образом. Уменьшение u на первом этапе способствует установлению во втором топливе прогретого слоя с более низким, чем это требуется для стационарного горения, градиентом температур. Это приводит к тому, что в момент вскрытия второго состава (для любого из рассмотренных значений параметров обоих топлив)

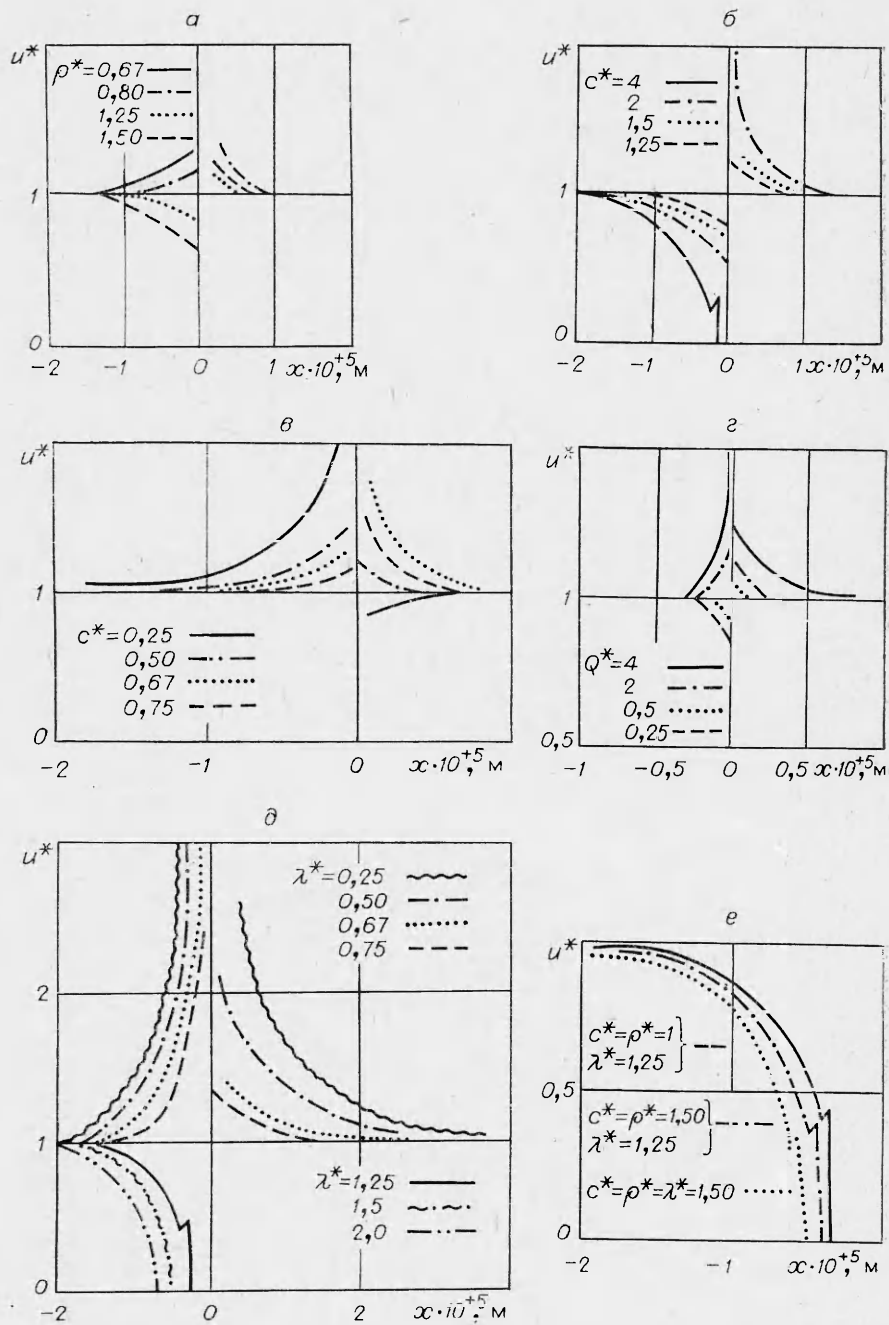


Рис. 1. Нестационарная скорость горения вблизи границы топлив при варьировании параметрами.

а) ρ^* ; б) $c^* > 1$; в) $c^* < 1$; г) Q^* ; д) λ^* ; е) $c^*, \rho^*, \lambda^* > 1$.

глубина его прогрева оказывается больше стационарной ($\varphi^* > 1$) и прогретый слой содержит больше тепла. Максимальное отличие нестационарной скорости от ее стационарных значений в рассмотренных случаях не превышает 25%.

Влияние c^* аналогично влиянию ρ^* в случае $c^*, \rho^* > 1$ (рис. 1, б). Однако при $c^* < 1$ (рис. 1, в) и малых c_2 поведение u на втором этапе горения отличается от рассмотренного выше. Это объясняется тем, что

Рис. 2. Влияние параметров Q , K , E на «глубину» химической реакции в к-фазе.

в данном случае ($\lambda_2 = \lambda_1$) решающее значение на формирующийся во втором топливе температурный профиль оказывает не теплопроводность (при рассмотренных λ^*), а эффект экзотермических реакций в к-фазе. Это влияние отсутствует, если химические реакции в к-фазе не учитываются ($\beta = 0$). Наиболее сильное влияние на нестационарное выгорание топлива оказывает величина λ^* (рис. 1, ∂).

Качественное поведение нестационарной скорости горения топлива при $\lambda^* < 1$ аналогично случаю $\rho^* < 1$. Однако если при $\rho^* < 1$ «наполненность» температурного профиля увеличивалась из-за того, что меньшее количество тепла затрачивалось на нагрев единицы массы второго топлива, то в данном случае это объясняется накоплением тепла в остатке первого топлива из-за худшей теплопроводности второго.

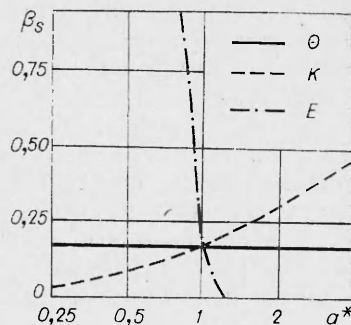
Интересно поведение u при $\lambda^* > 1$. В этом случае тепло, поступающее в к-фазу, отводится в глубь топлива так интенсивно, что горящая поверхность не успевает прогреться до температуры горения. Поэтому зажигание топлива в последующие моменты времени и его устойчивое горение необходимо рассматривать совместно с процессами в газовой фазе.

О совместном влиянии сразу трех факторов (ρ^* , c^* , λ^*) в том случае, когда происходит погасание заряда, можно судить, анализируя рис. 1, e . Естественно, что при подходящем выборе этих величин можно добиться непрерывного горения. Более или менее заметное влияние величин ρ^* , c^* , λ^* на скорость горения топлива происходит после того, как граница раздела войдет в прогретую зону. Влияние же параметров Q , K , E начинается лишь после попадания границы раздела в область высоких температур, где эффект от химических реакций в к-фазе становится ощутимым.

Как следует из системы (1), для физически реальных значений Q , K , E наиболее существенно влияние энергии активации E , менее значительно — величины K и наименьшее — Q . Влияние этих факторов можно оценить и по стационарным значениям величины на горячей поверхности топлива (рис. 2). Качественное влияние каждого из химических параметров одинаково. Естественно, что при более интенсивных реакциях во втором топливе происходит повышение температур по всему прогретому слою, а это приводит к более быстрому выгоранию топлив на обоих этапах. Уменьшение интенсивности реакции приводит к обратным эффектам, причем на втором этапе горения нестационарные эффекты малы (см. рис. 1, z).

Проведенные расчеты позволяют качественно оценить влияние на скорость горения таких факторов, как T_{s1} , T_w , φ_n . Эти величины входят в предпоследнее уравнение системы (1) и характеризуют величину теплового потока в к-фазу. При $\varphi_n \rightarrow 0$ (отсутствие эрозии) влияние всех рассмотренных выше параметров усиливается, а при возрастании φ_n ослабевает. Увеличение разности ($T_s - T_w$) уменьшает роль химических реакций в к-фазе.

Из физических соображений влияние T_s можно объяснить следующим образом. При $T_s^* > 1$ в момент выхода фронта горения на поверхность второго топлива возможно его погасание. В случае $T_s^* < 1$ загорание второго топлива может произойти раньше, чем выгорит первое.



Это приведет к разрушению остатков первого топлива и их уносу с поверхности горения. В обоих случаях процесс горения топлива будет существенно нестационарен, и оценить его без численного счета совместно с процессами в газовой фазе невозможно.

На основании полученных результатов можно сделать вывод о том, что горение двухслойных топлив при приближении границы раздела к поверхности горения существенно нестационарно и зависит от соотношения физико-химических свойств топливной пары. Оценить количественно нестационарные эффекты без проведения численного анализа не представляется возможным, а в ряде случаев, когда происходит временное погасание топлива (например, при $\lambda^* > 1$), необходимо проведение тепловых расчетов одновременно и в газовой фазе.

Для целей практики может представить интерес определение такой совокупности параметров ρ^* , c^* , λ^* , Q^* , K^* , E^* , которая обеспечивала бы горение топливной пары с наименее выраженными нестационарными эффектами, не допускающими погасания топлива. Эта совокупность параметров может быть установлена на основе развитого в данной работе подхода.

*Поступила в редакцию
17/1 1980*

ЛИТЕРАТУРА

1. Р. Е. Соркин. Газотермодинамика ракетных двигателей на твердом топливе. М., Наука, 1967.
2. Б. В. Новожилов. Нестационарное горение твердых топлив. М., Наука, 1973.

СРАВНИТЕЛЬНОЕ ИЗУЧЕНИЕ САМОВОСПЛАМЕНЕНИЯ ЭТИЛЕН- И ПРОПИЛЕНКИСЛОРОДНЫХ СМЕСЕЙ ПРИ АТМОСФЕРНОМ ДАВЛЕНИИ

*Т. И. Цюлковский, М. П. Мулява, Г. В. Щемелев,
В. У. Шевчук
(Борислав)*

Большой интерес вызывает получение окисей олефинов прямым окислением ненасыщенных углеводородов. В литературе описан ряд методов получения окисей при взаимодействии этилена и пропилена с кислородом при температурах 350—600°C и временах контакта 2—15 с [1, 2]. В этих условиях не исключена возможность самовоспламенения смеси. Температура самовоспламенения представляет собой один из технических параметров, определяющих ряд требований к технологическому оформлению процесса. Представляет интерес изучение самовоспламенения смесей углеводородов с кислородом и с точки зрения установления механизмов их окисления, знание которых позволяет подобрать оптимальный режим ведения технологических процессов. В литературе имеются данные по воспламенению этилена и пропилена с кислородом и воздухом [3—7]. Однако в большинстве случаев изучались пределы самовоспламенения смесей этилена и пропилена с воздухом и концентрационные пределы их зажигания с кислородом и воздухом от искры.

Ниже приводятся результаты исследования зависимости температуры самовоспламенения от состава этилен- и пропиленкислородных смесей