

Итак, рассмотренная в настоящей работе методика позволяет широко использовать процессы горения газовых модельных смесей для получения высокотемпературных составов, адекватных продуктам сгорания топливных композиций, которые объединяются условной формулой $C_aH_bO_cN_d$. Это дает возможность с небольшими затратами в лабораторных условиях экспериментально исследовать и оптимизировать лазерные характеристики предлагаемых соединений для ГДЛ. В общем случае вопросы моделирования составов процессами горения не исчерпываются рассмотренными здесь композициями четырех элементов и не ограничиваются использованием для этих целей только газовых смесей.

Авторы признательны Г. Н. Нечипоренко, Ю. М. Петрову и В. М. Шмелеву за полезные обсуждения и рекомендации.

Поступила в редакцию
21/1 1978

ЛИТЕРАТУРА

1. J. D. Anderson Jr. Gasdynamic Lasers: reviews and extensions, preprint, V International Colloquium on Gasdynamics of Explosions and Reactive Systems. France, Bourges, 8—11, September, 1975.
2. А. П. Генич, Н. В. Евтюхин, Г. Б. Манелис. ФГВ, 1975, 11, 5.
3. Термодинамические свойства индивидуальных веществ. Справочник. М., Изд-во АН СССР, 1962.
4. Г. И. Козлов, В. И. Иванов и др. ЖЭТФ, 1975, 68, 5.

ВЛИЯНИЕ ТЕПЛОПТЕРЬ И ТЕПЛОФИЗИЧЕСКИХ ПАРАМЕТРОВ НА ПРОЦЕСС ЗАЖИГАНИЯ БЕЗГАЗОВЫХ СИСТЕМ ВОЛНОЙ ГОРЕНИЯ

А. Г. Струнина, В. И. Ермаков, В. В. Барзыкин

(Черноголовка)

Изучение закономерностей переходных режимов горения безгазовых систем при воздействии на них тепловой волной горящего воспламенителя проводилось в работе [1]. Система уравнений, описывающая развитие процесса, имеет вид

$$c_1 \rho_1 \frac{\partial T}{\partial t} = \lambda_1 \frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + Q_1 k_{01} \exp\left(-\frac{E_1}{RT}\right) \varphi(\eta) - \frac{2\alpha}{r}(T - T_0) - \frac{2\epsilon\sigma_0}{r}(T^4 - T_0^4), \quad (1)$$

$$\partial \eta / \partial t = k_{01} \exp(-E_1/RT) \varphi(\eta), \quad (2)$$

$$c_2 \rho_2 \frac{\partial T}{\partial t} = \lambda_2 \frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + Q_2 k_{02} \exp\left(-\frac{E_2}{RT}\right) \varphi(\eta) - \frac{2\alpha}{r}(T - T_0) - \frac{2\epsilon\sigma_0}{r}(T^4 - T_0^4). \quad (3)$$

$$\partial \eta / \partial t = k_{02} \exp(-E_2/RT) \varphi(\eta). \quad (4)$$

Граничные условия:

$$\begin{aligned}x=0 & \quad \lambda_1 \cdot \partial T_1 / \partial x = \lambda_2 \cdot \partial T_2 / \partial x, \quad T_1(0, t) = T_2(0, t); \\x=+\infty & \quad T = T_0; \\x=-\infty & \quad T = T_{r1}.\end{aligned}$$

Начальные условия задаются в виде стационарного фронта горения воспламенителя, который помещается на некотором расстоянии от границы раздела между реагирующими системами. Здесь индекс 1 отвечает воспламенителю, индекс 2 — поджигаемой системе; E — энергия активации; Q — тепловой эффект реакции; k_0 — предэкспонент; T_r — температура горения; T_0 — начальная температура; λ — коэффициент теплопроводности; c — теплоемкость; ρ — плотность; r — радиус образцов; ε — степень черноты; σ_0 — постоянная Стефана — Больцмана; T, x, η, t — текущие температура, координата, глубина превращения и время; α — коэффициент теплоотдачи.

Система уравнений (1) — (4) решается численно на БЭСМ-6. В работе [1] решение проводилось в предположении равенства теплофизических параметров ($a_1 = \lambda_1 c_1 / \rho_1 = a_2 = \lambda_2 / c_2 \rho_2$) и отсутствия теплотерь ($\alpha \approx 0$ и $\varepsilon \approx 0$).

Поскольку в реальных системах теплофизические параметры воспламенителя и поджигаемой системы могут значительно отличаться друг от друга и процесс обычно сопровождается теплотерями, представляет интерес проанализировать закономерности переходных режимов горения безгазовых систем при $a_1 \neq a_2$, а также в условиях, когда скорость теплоотвода становится сравнимой со скоростью тепловыделения в системе.

Влияние соотношения между теплофизическими параметрами безгазовых систем, находящихся в контакте, когда одна является воспламенителем для другой, на процесс зажигания не исследовано. Известные работы [2—5] касаются либо вопросов взаимодействия реакционноспособной системы с инертной средой, имеющей иные теплофизические параметры (накаленная стенка — поджигаемая безгазовая система, горящий порошок — металл), либо вопросов прохождения волны горения по безгазовой системе через инертную преграду.

Учет теплотерь в работах, рассматривающих процесс зажигания [6, 7] либо процесс горения [8], проводился в основном с целью анализа критических явлений. Наиболее полно процесс горения безгазовых систем при наличии теплоотвода проанализирован в работе [9], где показано, что в зависимости от соотношения между определяющими параметрами системы и теплотерями характер процесса горения может быть различным. Увеличение уровня теплотерь приводит сначала к появлению автоколебаний, затем (при больших теплотерях) к затуханию на депрессиях. Однако, если параметры системы таковы, что стационарное горение устойчиво, переход к затуханию процесса может осуществляться, минуя автоколебательный режим.

Именно для таких систем ниже проведено исследование процесса зажигания волной горения. Основные закономерности процесса получены для случаев, когда:

- 1) теплофизические параметры обеих реагирующих систем различны, а теплоотводом можно пренебречь;
- 2) имеет место теплообмен с окружающей средой через боковую поверхность цилиндрических образцов воспламенителя и поджигаемой системы, теплофизические параметры которых равны;
- 3) воспламенитель и поджигаемая система обмениваются теплом с окружающей средой и имеют разные теплофизические параметры.

Исследование проводилось на основании численного решения системы уравнений (1)–(4) в большом диапазоне изменения параметров. Как и в работе [1], за скорость горения принималась скорость перемещения максимума тепловыделения в системе, а время от начала теплового воздействия на поджигаемую систему¹ до момента, когда максимум скорости тепловыделения достигнет границы раздела, считалось временем задержки зажигания поджигаемой системы t_1 . Аналогично [1] горение поджигаемой системы считалось стационарным, когда отклонение скорости горения от своего стационарного значения не превышало 5%. Время от t_1 до установления стационарного режима принималось за время неустановившегося режима горения t_2 . Полное время переходного периода $t_n = t_1 + t_2$.

Было выделено [1] два режима зажигания, определяющихся соотношением между избытками энтальпий воспламенителя ($\Delta H_1 = \lambda_1(T_{r1} - T_0)/v_1$) и поджигаемой системы ($\Delta H_2 = \lambda_2(T_{r2} - T_0)/v_2$). Если $\Delta H_1 > \Delta H_2$ (индукционный режим), то для рассмотренных в [1] случаев, как правило, $t_1 > t_2$, а скорость и температура горения в поджигаемой системе на некотором расстоянии от места контакта с воспламенителем значительно повышаются, затем (после одного или нескольких колебаний) принимают стационарное значение. Если $\Delta H_1 < \Delta H_2$ (режим «сжигания»), то обычно $t_1 < t_2$, в поджигаемой системе за короткое время прогревается лишь прилегающий к месту контакта слой вещества, а выход на стационарный режим горения начинается со значительного снижения скорости и температуры горения поджигаемой системы.

Теплофизические параметры воспламенителя и поджигаемой системы различны, теплообмен отсутствует

Развитие процесса в случае, когда воспламенитель и поджигаемая система различаются лишь теплофизическими параметрами, характеризуется при $a_1 > a_2$ подъемом скорости горения v_1 и температуры воспламенителя при подходе волны горения к поджигаемой системе, а при $a_1 < a_2$ — их снижением. Такие отклонения температуры воспламенителя относительно температуры горения T_{r1} связаны с перераспределением избыточного тепла воспламенителя в зависимости от соотношения температуропроводностей реагирующих систем. В соответствии с этим развитие переходного процесса в поджигаемой системе при $a_1 < a_2$ аналогично индукционному режиму зажигания, а при $a_1 > a_2$ — режиму «сжигания».

Нестационарная скорость перемещения фронта горения по воспла-

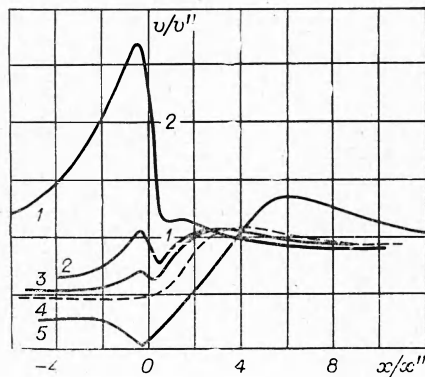
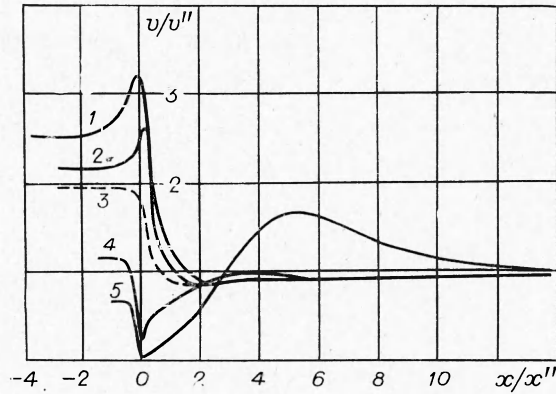


Рис. 1. Изменение нестационарной скорости горения в индукционном режиме зажигания при различных теплофизических параметрах реагирующих систем; $E_1 = E_2 = 12,57 \times 10^4$ Дж/моль, $Q_1 = 8,38 \cdot 10^{-3}$ Дж/м³, $Q_2 = 11,73 \cdot 10^{-3}$ Дж/м³.

a_1/a_2 равно: 1 — 4,65, 2 — 3, 3 — 1,28, 4 — 1, 5 — 0,35.

¹ Момент, когда температура на границе раздела реагирующих систем превысит начальную на 5%.

Рис. 2. Изменение нестационарной скорости горения в режиме «сжигания» при различных теплофизических параметрах реагирующих систем; $E_1 = E_2 = 12,57 \cdot 10^4$ Дж/моль, $Q_1 = 11,73 \cdot 10^{-3}$ Дж/м³, $Q_2 = 8,38 \times 10^{-3}$ Дж/м³. a_1/a_2 равно: 1 — 1,74, 2 — 1,28, 3 — 1, 4 — 0,35, 5 — 0,12.

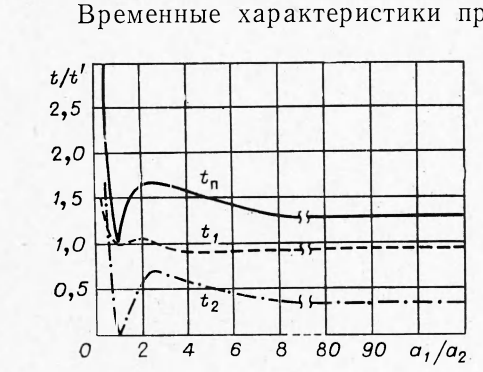


менителю (область отрицательных x) и поджигаемой системе (область положительных x) в случае, когда реагирующие

системы различаются не только теплофизическими параметрами, но и тепловыми эффектами², представлена на рис. 1 и 2. Здесь v'' — стационарная скорость горения поджигаемой системы, x'' — ширина ее прогретой зоны. Характер изменения скорости горения воспламенителя целиком определяется соотношением между a_1 и a_2 . Что касается поджигаемой системы, то пространственные изменения скорости горения зависят и от режима зажигания и от соотношения теплофизических параметров реагирующих систем. С увеличением a_1/a_2 независимо от $\frac{\Delta H_1}{\Delta H_2} \Big|_{a_1=a_2}$ происходит смена режимов зажигания от индукционного (при $a_1/a_2 < 1$) к режиму «сжигания» (при $a_1/a_2 > 1$).

Необходимо отметить, что при $a_1 \neq a_2$ развитие процесса в поджигаемой системе определяется, как и в случае $a_1 = a_2$, отношением избытков энтальпий реагирующих систем $\frac{\Delta H_1}{\Delta H_2} \Big|_{a_1 \neq a_2}$, но $\Delta H_1 \Big|_{a_1 \neq a_2}$ должно соответствовать тем (меняющимся со временем) значениям скорости и температуры горения, которые имеют место при подходе волны горения

воспламенителя к границе раздела: $\Delta H_1 \Big|_{a_1 \neq a_2} \simeq \int_0^{t_1} c_1 \rho_1 (T(t) - T_0) \times v_1(t) dt$, где $t=0$ соответствует началу теплового воздействия на поджигаемую систему. При этом, если $a_1 > a_2$, то избыток энтальпии $\Delta H_1 \Big|_{a_1 \neq a_2}$, определяющий режим зажигания, будет меньше, чем избыток энтальпии $\Delta H_1 \Big|_{a_1=a_2}$ при стационарном горении воспламенителя. И наоборот, $\Delta H_1 \Big|_{a_1 \neq a_2} > \Delta H_1 \Big|_{a_1=a_2}$, если поджигаемая система лучше проводит тепло, чем воспламенитель.



Временные характеристики процесса (время задержки зажигания t_1 и время установления стационарного режима горения t_2) оказались очень чувствительными к изменению теплофизических параметров реагирующих систем лишь в случае, когда поджигаемая система лучше

Рис. 3. Временные характеристики процесса зажигания волной горения при различных коэффициентах температуропроводности реагирующих систем; $E_1 = E_2 = 12,57 \cdot 10^4$ Дж/моль, $Q_1 = Q_2 = 8,38 \cdot 10^{-3}$ Дж/м³, $a_1 = 13,31 \times 10^{-8}$ м²/с, $0,12 \cdot 10^{-8} < a_2 < 33,3 \cdot 10^{-8}$ м²/с.

² Разная степень разбавления исходной системы инертными добавками [1].

проводит тепло, чем воспламенитель. При обратном соотношении теплофизических параметров t_1 и t_2 почти не меняются в большом диапазоне изменения a_1/a_2 (рис. 3). Величина t' на рис. 3 соответствует времени сгорания прогретого слоя при стационарном горении воспламенителя.

Теплофизические параметры реагирующих систем равны, имеют место теплотери

Исследование влияния теплотери на процесс зажигания волной горения проводилось для полубесконечных цилиндрических образцов воспламенителя и поджигаемой системы, теряющих тепло через боковую поверхность (система уравнений (1), (2)). Как показали результаты численного счета, механизм теплотери (конвекция, излучение) не вносит каких-либо изменений в развитие процесса, поэтому при анализе всех зависимостей варьировались лишь конвективные потери тепла.

С увеличением уровня теплотери (в области коэффициентов теплоотдачи, допускающих выход на стационарный режим горения) скорости и температуры горения воспламенителя и поджигаемой системы снижаются. Временные характеристики процесса (t_1 , t_2 и t_{π}) при этом возрастают (рис. 4, а). При индукционном режиме зажигания более резко возрастает t_1 , а t_2 остается почти постоянным. При режиме «сжигания» с увеличением коэффициента теплоотдачи t_1 мало меняется, а t_2 значительно возрастает. t' и t'' на рис. 4, а — время сгорания прогретого слоя при стационарном горении (соответственно воспламенителя и поджигаемой системы), а $\alpha_{кр1}$ и $\alpha_{кр2}$ — критические коэффициенты теплоотдачи этих систем³.

С увеличением уровня теплотери (в области критических коэффициентов теплоотдачи) процесс зажигания безгазовой системы волной горения лимитируется меньшим из критических коэффициентов теплоотдачи. Так, в случае индукционного режима зажигания ($\Delta H_1 > \Delta H_2$, $\alpha_{кр1} < \alpha_{кр2}$) инициирование и последующее стационарное горение под-

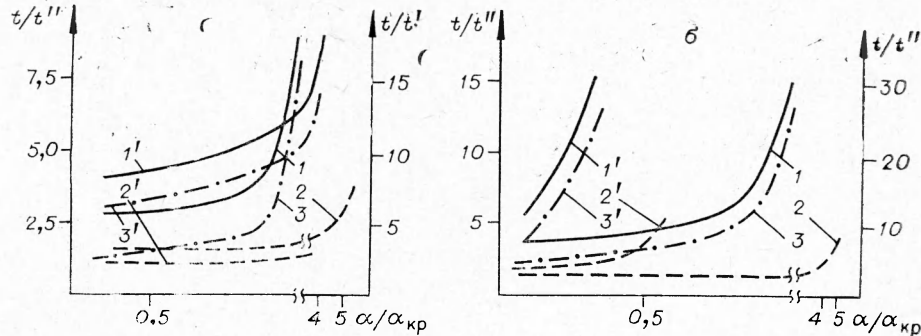


Рис. 4. Зависимость временных характеристик процесса от коэффициентов теплоотвода при различных режимах зажигания и разных теплофизических параметрах реагирующих систем.

а) $E_1 = E_2 = 12,57 \cdot 10^4$ Дж/моль, $a_1 = a_2 = 13,31 \cdot 10^{-8}$ м²/с; 1-3 — $Q_1 = 11,73 \cdot 10^{-3}$ Дж/м³, $Q_2 = -8,38 \cdot 10^{-3}$ Дж/м³; 1'-3' — $Q_1 = 8,38 \cdot 10^{-3}$ Дж/м³; $Q_2 = 11,73 \cdot 10^{-3}$ Дж/м³. б) $E_1 = E_2 = 12,57 \cdot 10^4$ Дж/моль, $Q_1 = 11,73 \cdot 10^{-3}$ Дж/м³, $Q_2 = 8,38 \cdot 10^{-3}$ Дж/м³; 1-3 — $a_1 = 13,31 \cdot 10^{-7}$ м²/с, $a_2 = 13,31 \cdot 10^{-8}$ м²/с; 1'-3' — $a_1 = 2,65 \cdot 10^{-8}$ м²/с, $a_2 = 13,31 \cdot 10^{-8}$ м²/с. 1, 1' — t_{π} ; 2, 2' — t_1 ; 3, 3' — t_2 .

³ Критические коэффициенты теплоотдачи определялись из численного счета методом «пристрелки». При коэффициентах теплоотдачи, меньших критического, имело место стационарное горение безгазовой системы; при коэффициентах теплоотдачи, больших критического, горение было невозможно.

жигаемой системы возможно для коэффициентов теплоотдачи, меньших критического коэффициента теплоотдачи воспламенителя $\alpha_{кр1}$, а в случае режима «сжигания» ($\Delta H_1 < \Delta H_2$, $\alpha_{кр1} > \alpha_{кр2}$) — при $\alpha < \alpha_{кр2}$. Кроме того, в режиме «сжигания» существует область коэффициентов теплоотдачи (от $\alpha_{кр2}$ до $\alpha_{кр1}$), в которой возможно вынужденное сжигание поджигаемой системы. В этой области процесс прекращается, как только сгорит прогретый воспламенителем слой поджигаемой системы. Число сгоревших прогретых слоев увеличивается с уменьшением уровня теплопотерь. Причем вдали от критического коэффициента теплоотдачи поджигаемой системы ($\alpha \geq 2\alpha_{кр2}$) это увеличение незначительно, а при $\alpha \rightarrow \alpha_{кр2}$ — резко возрастает, достигая при $\alpha \simeq \alpha_{кр2}$ различной величины, в зависимости от энергетических возможностей воспламенителя (несколько десятков слоев при $Q_1/Q_2 \simeq 1,5$).

Можно сказать, что предел по зажиганию⁴ поджигаемой системы определяется пределом по горению воспламенителя. Так, в индукционном режиме зажигания он оказывается меньше предела по горению поджигаемой системы, а в режиме «сжигания» — больше. Связь критических коэффициентов теплоотдачи с параметрами реагирующих систем представлена на рис. 5. Всю область значений α и ΔH можно разделить на три подобласти: *I* — поджигаемая безгазовая система зажигается воспламенителем и выходит затем на стационарный режим горения, *II* — имеет место вынужденный режим сжигания безгазовой системы, *III* — с такими коэффициентами теплоотвода, при которых систему вообще невозможно зажечь.

Соответственно этому ведут себя и временные характеристики процесса при подходе к предельным коэффициентам теплоотвода (см. рис. 4, *a*). В обоих режимах зажигания с увеличением уровня теплопотерь общее время переходного периода возрастает, но, как было отмечено раньше, в индукционном режиме зажигания это возрастание идет в основном за счет увеличения времени зажигания, а в режиме «сжигания» — за счет увеличения времени выхода на стационарный режим горения. Резкое возрастание времени задержки зажигания в режиме «сжигания» наблюдается лишь при коэффициентах теплоотдачи, близких к пределу по зажиганию.

Проведенный анализ отвечал случаю равных коэффициентов теплоотдачи для обеих реагирующих систем. Однако разумно предположить возможность разного уровня теплопотерь для воспламенителя и поджигаемой системы. Действительно, если температуры горения систем различны, то могут существенно различиться потери излучением с боковой поверхности горящих образцов. Проведенные расчеты показали, что если имеют место теплопотери лишь из зоны горения воспламенителя ($\alpha_1 > 0$, $\alpha_2 = 0$), предел по зажиганию поджигаемой системы совпадает с пределом по горению воспламенителя.

В случае, когда теплопотери сопровождают лишь горение поджигаемой системы ($\alpha_1 = 0$, $\alpha_2 > 0$), существует широкая область ее вынужденного сжигания от критического коэффициента по горению поджигаемой системы до коэффициентов теплоотдачи, при которых сгорает примерно один ее прогретый слой. Этот коэффициент будет соответствовать пределу по зажиганию поджигаемой системы. В отличие от рассмотренных ранее случаев $\alpha_1 = \alpha_2$ этот предел по зажиганию может быть намного больше предела по горению воспламенителя. Таким образом, искусственно регулируя теплопотери обеих реагирующих систем, можно управлять пределом по зажиганию поджигаемой системы.

⁴ За предел по зажиганию принимается такой уровень теплопотерь, по достижении которого имеет место резкое возрастание времени задержки зажигания поджигаемой системы.

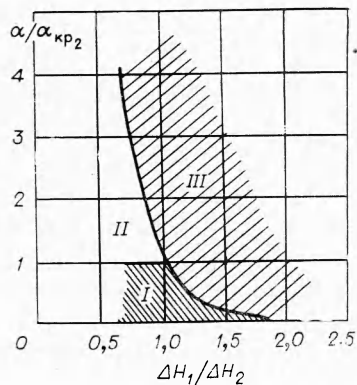


Рис. 5. Зависимость предельных коэффициентов теплоотвода от соотношения избытков энтальпий реагирующих систем; $E_1 = E_2 = 12,57 \cdot 10^4$ Дж/моль, $5,87 \times 10^{-3} < Q_1 < 11,73 \cdot 10^{-3}$ Дж/м³, $a_1 = a_2 = 13,31 \cdot 10^{-8}$ м²/с.

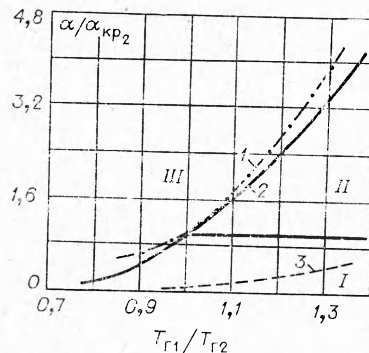


Рис. 6. Зависимость предельных коэффициентов теплоотвода от соотношения температур горения при различных теплофизических параметрах реагирующих систем; $E_1 = E_2 = 12,57 \cdot 10^4$ Дж/моль, $5,87 \times 10^{-3} < Q_1 < 11,73 \cdot 10^{-3}$ Дж/м³.
 1 — $a_1 = 13,31 \cdot 10^{-7}$ м²/с, $a_2 = 13,31 \cdot 10^{-8}$ м²/с; 2 — $a_1 = a_2 = 13,31 \cdot 10^{-8}$ м²/с; 3 — $a_1 = 2,66 \cdot 10^{-8}$ м²/с, $a_2 = 13,31 \cdot 10^{-8}$ м²/с.

Как было отмечено раньше, в математической постановке задачи (1)–(4) начальное условие в виде распределения температур при стационарном горении воспламенителя в отсутствие теплопотерь задавалось на определенном расстоянии x^* от места контакта с поджигаемой системой. Изменяя x^* , можно провести исследование влияния конечности высоты воспламенителя на процесс зажигания безгазовой системы волной горения при наличии теплопотерь с боковой поверхности. Влияние высоты воспламенителя на процесс зажигания проявляется по-разному. Если зажигание наступает за время прохождения волны горения через границу раздела, то развитие процесса в поджигаемой системе определяется тем, с какой температурой и скоростью подошел фронт горения к границе раздела с поджигаемой системой. Если зажигание является результатом воздействия раскаленных шлаков, то на первый план выступает общее количество тепла, запасенное в раскаленных шлаках (прямо пропорциональное высоте воспламенителя). Однако и в этом случае при наличии теплопотерь максимальная температура шлаков будет зависеть от того, насколько она успела снизиться относительно T_{r1} (без теплопотерь) за время прохождения фронта горения по воспламенителю. Исследование проводилось для индукционного режима зажигания ($\Delta H_1 > \Delta H_2$). Оказалось, что высота воспламенителя влияет на развитие процесса в поджигаемой системе вплоть до высот, соответствующих 50 прогретым слоям воспламенителя⁵. С уменьшением высоты воспламенителя предел по зажиганию ее возрастает.

Теплофизические параметры воспламенителя и поджигаемой системы различны, имеют место теплопотери

Процесс зажигания безгазовой системы горящим воспламенителем с иными, чем у поджигаемой, теплофизическими параметрами, при наличии теплопотерь с боковой поверхности образцов является доволь-

⁵ Прогретый слой берется при стационарном горении воспламенителя без теплопотерь.

но сложным. Нестационарная скорость горения воспламенителя вблизи границы с поджигаемой системой определяется соотношением между теплофизическими параметрами реагирующих систем и условиями теплообмена их с окружающей средой, а характер изменения нестационарной скорости горения поджигаемой системы в переходном периоде зависит еще и от режима ее зажигания. При коэффициентах теплоотдачи, допускающих выход на стационарный режим горения, и при различных теплофизических параметрах реагирующих систем развитие процесса в случае индукционного режима зажигания аналогично представленному на рис. 1, а в случае режима «сжигания» — аналогично рис. 2. Очевидно, что с увеличением коэффициентов теплоотдачи скорости горения обеих реагирующих систем снижаются. Так же, как и при равных теплофизических параметрах, с ростом коэффициента теплоотдачи время переходного периода горения поджигаемой системы увеличивается в индукционном режиме зажигания в основном за счет роста времени задержки зажигания, а в режиме «сжигания» — за счет роста времени выхода на стационарное горение. На рис. 4, б такая зависимость представлена для режима «сжигания» в случае, когда воспламенитель лучше проводит тепло, чем поджигаемая система (кривые 1—3), и когда поджигаемая система является лучшим проводником тепла (кривые 1'—3'). В последнем случае временные характеристики более чувствительны к изменению теплофизических параметров, что было отмечено и раньше.

Развитие процесса в области коэффициентов теплоотдачи, близких к предельным по горению для обоих режимов зажигания, аналогично тому, который наблюдается при равных теплофизических параметрах. Но сами предельные коэффициенты сдвигаются в зависимости от соотношения между a_1 и a_2 . Так, если поджигаемая система хуже проводит тепло, чем воспламенитель, соотношение между подобластями стационарного горения I, вынужденного «сжигания» II и отсутствия горения III (рис. 6) остается почти таким же, как и при $a_1 = a_2$. Если же поджигаемая система лучше проводит тепло, чем воспламенитель, то резко изменяются и размеры подобластей и соотношения между предельными коэффициентами теплоотдачи. Действительно, при $a_1 < a_2$ (см. рис. 6) значительно расширена область коэффициентов теплоотдачи (выше кривой 3), при которых невозможно инициировать поджигаемую систему. В этом случае ее предел по зажиганию оказывается меньше предела по горению, а невозможность инициировать систему вовсе не будет означать, что она не способна гореть в данных условиях.

Как показал анализ результатов численного счета при режиме «сжигания», для любого соотношения теплофизических параметров и коэффициентов теплоотдачи, больших предела по горению поджигаемой системы, имеет место своеобразный режим ее сгорания. Он заключается в том, что поджигаемая система то затухает, то вспыхивает вновь. Такое развитие процесса наблюдается по окончании горения воспламенителя, когда его раскаленные шлаки прогревают определенный слой поджигаемой системы. Прогретый слой сгорает в режиме затухания, а тепловой поток от шлаков и сгоревшей части поджигаемой системы продолжает прогревать все более далекие ее слои, которые и дают периодические вспышки. Чем больше уровень теплопотерь, тем меньший слой поджигаемой системы прогорит до первого ее затухания и тем больше времени проходит от ее затухания до следующей вспышки.

Подведем итоги проведенного исследования.

1. При равных теплофизических параметрах реагирующих систем в индукционном режиме зажигания пределы по горению и зажиганию

поджигаемой системы совпадают с пределом по горению воспламенителя, а в режиме «сжигания» предел по зажиганию поджигаемой системы настолько превышает предел по ее горению, насколько больше предел по горению воспламенителя относительно предела по горению поджигаемой системы.

2. При разных теплофизических параметрах соотношение между предельными коэффициентами теплоотдачи почти не меняется в случае, если поджигаемая система хуже проводит тепло, чем воспламенитель. Если поджигаемая система — лучший проводник тепла, чем воспламенитель, то предел по зажиганию может стать меньше предела по горению, характерного для этой системы.

3. Временные характеристики процесса зажигания безгазовой системы волной горения чувствительны к изменению теплофизических параметров лишь в случае, когда поджигаемая система лучше проводит тепло, чем воспламенитель.

4. С увеличением коэффициента теплоотдачи в индукционном режиме зажигания возрастает в основном время задержки зажигания, а в режиме «сжигания» — время установления стационарного горения поджигаемой системы.

5. При режиме «сжигания» для различных соотношений теплофизических параметров и коэффициентов теплоотдачи, больших предела по горению поджигаемой системы, имеет место режим периодически затухающего горения.

*Поступила в редакцию
16/V 1977*

ЛИТЕРАТУРА

1. А. Г. Струнина, Т. М. Мартемьянова и др. ФГВ, 1974, 10, 4.
2. А. Г. Мержанов, А. Э. Аверсон. Combust. Flame, 1971, 16.
3. С. С. Новиков, П. Ф. Похил и др. Докл. АН СССР, 1968, 180, 1391.
4. О. И. Нефедова, С. С. Новиков и др. ПМТФ, 1970, 2, 85.
5. В. С. Берман, С. С. Новиков, Ю. С. Рязанцев. Докл. АН СССР, 1973, 211, 5.
6. P. H. Thomas, P. C. Bowes. Trans. Faraday Soc., 1961, 57, 2001.
7. В. В. Барзыкин, С. И. Худяев. Докл. АН СССР, 1966, 169, 6.
8. Я. Б. Зельдович. ЖЭТФ, 1941, 11, 159.
9. К. Г. Шкадинский, Б. И. Хайкин. — В сб.: Горение и взрыв. М., «Наука», 1972.

О ВЛИЯНИИ ПЛЕНКИ ОКИСЛА НА ХАРАКТЕРИСТИКИ ВОСПЛАМЕНЕНИЯ АЛЮМИНИЯ

М. А. Гуревич, Е. С. Озеров, А. А. Юринов

(Ленинград)

В работе [1] на установке с «плоскопламенной» газовой горелкой найдено, что предельная для воспламенения частиц алюминия температура газа близка к температуре плавления окиси алюминия и практически не зависит от размера частиц. В работе [2] также экспериментом установлено, что предельная температура в зависимости от размера частицы имеет минимум и может быть значительно ниже температуры плавления окисла. Последнее обнаружено также в [3, 4]. Возможно, что причина расхождения состоит в том, что авторы [1] не измеряли температуру газа, а считали ее равной теоретической темпера-