

Таким образом, в фазе формирования фронта диффузионного пламени нестационарной топливной струи, характерной для дизеля, зарегистрировано распространение пламени по ограниченному объему реагирующей смеси с ростом τ , переходящее в спонтанное распространение пламени и квазиобъемное воспламенение, а также явления задержки распространения и гашения пламени, предсказанные в [5, 6]. Особенности этих процессов в дизеле связана с наличием влияния нестационарного тепло- и массообмена между топливной струей и воздушным зарядом на температурное поле реагирующей смеси.

ЛИТЕРАТУРА

1. В. Я. Басевич, А. С. Соколик. ЖФХ, 1956, 4, 729.
2. В. П. Алексеев, Д. Н. Вырубов. Физические основы процессов в камерах сгорания поршневых ДВС. М.: изд. МВТУ, 1977.
3. Л. С. Ронинсон, В. А. Терентьев. Двигателестроение, 1982, 2, 20.
4. В. З. Махов, В. А. Терентьев. Токсичность ДВС. Межвузовский сб. научн. трудов/Под ред. А. М. Обельницкого. М., 1977.
5. Я. Б. Зельдович. Классификация режимов экзотермической реакции в зависимости от начальных условий. Препринт ОИХФ АН СССР, 1978.
6. Я. Б. Зельдович. ЖТФ, 1949, XIX, 10.

УДК 536.46 : 541.6

ВЛИЯНИЕ ТЕПЛОПOTЕРЬ НА ПРЕДЕЛЫ И СТРУКТУРУ ДИФФУЗИОННОГО ПЛАМЕНИ, ОБРАЗОВАННОГО ПРИ ГОРЕНИИ ПОЛИМЕРОВ

А. Д. Марголин, В. Г. Крупкин
(Москва)

На примере горения полимеров в окислительной атмосфере рассмотрена задача о пределах и структуре диффузионного пламени при наличии теплопотерь из прогретого слоя конденсированной фазы в термостатируемую подложку в случае аррениусовской зависимости скорости реакции от температуры в газовой фазе. Показано, что при диффузионном горении полимеров существует два предела. Первый из них представляет собой внутреннее свойство диффузионного пламени и существует всегда, даже в отсутствие потерь тепла [1, 2]. Второй предел, как это имеет место и при диффузионном горении газов [1—3], появляется только при наличии потерь тепла из зоны горения [4]. Полному гашению отвечают условия совпадения обоих пределов.

Рассматривается задача о пределах и структуре диффузионного пламени, образованного при горении пластины полимера толщиной δ в атмосфере окислителя, лежащей на термостатированной подложке. Система уравнений, определяющая распределение температуры и концентраций в приближении приведенной пленки, при диффузионном горении имеет вид

$$\begin{aligned} \frac{d^2(\tau T)}{dx^2} - \frac{u}{\kappa} \frac{d(\tau T)}{dx} &= -F, \\ \frac{d^2(\alpha_i a_i)}{dx^2} - \frac{u}{D} \frac{d(\alpha_i a_i)}{dx} &= F, \end{aligned} \quad (1)$$

где a_i — массовые концентрации реагентов; $F = z a_1 a_2 \exp(-E/RT)$ — аррениусовская функция тепловыделения; z — предэкспонент; E — эффективная энергия активации реакции горения; T — температура; R — универсальная газовая постоянная; D и κ — коэффициенты диффузии и температуропроводности; α_i и τ — коэффициенты, устанавливающие соотношение между потреблением исходных реагентов в зоне реакции и

выделением тепла. С помощью коэффициентов α_i можно записать соотношение между потоком окислителя в зону реакции $(\rho u)_{\text{ок}}$, скоростью выгорания полимера ρu и суммарной скоростью потребления реагентов в зоне реакции $(\rho u)_0$

$$(\rho u)_0 = (1 + \psi) \rho u = \frac{1 + \psi}{\psi} (\rho u)_{\text{ок}},$$

где $\psi = \alpha_1/\alpha_2 a_2^0$; a_2^0 — начальная концентрация кислорода в атмосфере; ρ — плотность. При написании системы (1) учитывался перенос вещества и тепла только по оси x , направленной поперек фронта пламени.

Граничные условия на горячей поверхности полимера ($x = 0$):

$$\begin{aligned} \lambda_r \frac{dT}{dx} &= L \rho u + \lambda_k \varphi, \\ \rho u &= \rho u a_1 - \rho D \frac{da_1}{dx}, \\ 0 &= \rho u a_2 - \rho D \frac{da_2}{dx}, \\ T &= T_s, \end{aligned} \quad (2)$$

на внешней стороне приведенной пленки ($x = l$):

$$a_1 = 0, \quad a_2 = a_2^0, \quad T = T_0, \quad (3)$$

где φ — градиент температуры в конденсированной фазе у поверхности пиролиза; λ_k и λ_r — теплопроводность полимера и газа; L — скрытая теплота газификации полимера. В предельном случае стационарного выгорания бесконечно толстого слоя полимера у поверхности устанавливается естественный градиент температуры $\varphi_0 = \frac{\gamma}{\alpha} (T_s - T_0)$. Теплопотерь в этом случае нет, и температура горения равна адиабатической температуре горения перемешанной стехиометрической смеси продуктов разложения полимера с окислителем атмосферы $T_{\text{ад}}$. Если толщина слоя полимера δ конечна, то градиент φ может быть больше φ_0 , что приведет к понижению температуры горения даже в случае бесконечно быстрой реакции в газовой фазе.

Температура горячей поверхности полимера зависит от механизма термического разложения. В работе рассмотрены случаи, когда а) температура поверхности горения постоянна $T_s = \text{const}$ и б) температура поверхности и скорость выгорания связаны законом термической деструкции $\rho u = k_0 \exp(-E_1/2RT_s)$, где k_0 — предэкспонент; E_1 — эффективная энергия активации деструкции полимера.

Система (1) с граничными условиями (2), (3) в случае $D = \kappa$ может быть сведена к уравнению второго порядка

$$\begin{aligned} \frac{d^2 \Theta}{d\xi^2} - \frac{p}{1 + \psi} \frac{d\Theta}{d\xi} &= \text{Da} \left[\Theta_0 - \Theta - (1 + \psi) (\Theta_M - \Theta_0) \left(e^{\frac{p(\xi-1)}{1+\psi}} - 1 \right) \right] \times \\ &\times \left[\Theta_0 + \Theta'_0 - \Theta - (1 + \psi) (\Theta_M - \Theta_0 - \Theta'_0) \left(e^{\frac{p(\xi-1)}{1+\psi}} - 1 \right) \right] e^{\frac{\Theta}{1+\gamma\Theta}} \end{aligned} \quad (4)$$

с граничными условиями

$$\begin{aligned} \xi = 0: \quad \Theta &= \Theta_s, \quad \frac{d\Theta}{d\xi} = \frac{p}{1 + \psi} (\Theta_s + \psi (\Theta_0 + \Theta'_0) - (1 + \psi) \Theta_M), \\ \xi = 1: \quad \Theta &= \Theta_0, \end{aligned} \quad (5)$$

где $\Theta_s = \text{const}$ в случае а) или Θ_s связана с $(\rho u)_0$ законом термической деструкции

$$\frac{(\rho u)_0}{M} = A \exp \left(\frac{E_1}{2E} \frac{\Theta_s}{1 + \gamma \Theta_s} \right)$$

в случае б).

В уравнении (4) и граничных условиях (5) использовали следующие обозначения: $\Theta = \frac{E(T - T_{ад})}{RT_{ад}^2}$ — безразмерная температура; $\xi = x/l$ —

безразмерная координата; $Da = \left(\frac{LM\Theta'_0}{\rho\kappa\alpha_2 a_2^0} \right)^2 \frac{1}{2I}$ — число Дамкелера; M —

массовая скорость горения эквивалентной газовой смеси; $M^2 = \frac{2z}{\alpha_1 \alpha_2} \rho \kappa I \times$

$\times \left(\frac{\tau RT_{ад}^2}{E} \right)^3 \exp(-E/RT_{ад})$; $\Theta_M = (\Theta_s - \Theta_0) \left\{ (1 + \psi) \left[\exp\left(\frac{\rho u}{M} \frac{Pe}{1 + \psi} \right) - 1 \right] - \right.$

температура горения в предельном случае быстрой реакции, но с учетом теплопотерь; $Pe = M\delta/\rho\kappa$ — число Пекле, рассчитанное на ско-

рость горения эквивалентной газовой смеси; $\Theta_0 = \Theta(T_0)$; $\Theta'_0 = \frac{\alpha_2 a_2^0 E}{\tau RT_{ад}^2}$;

$p = (\rho u)_0 l / \rho \kappa$; $\gamma = RT_{ад}/E$; $I = \int_{-\frac{1}{\gamma}}^0 \Theta^2 \exp[\Theta/(1 + \gamma\Theta)] d\Theta$; $\Theta_s = \Theta(T_s)$.

Уравнение (4) решалось численно, методом пристрелки. Алгоритм решения заключался в следующем: при заданном наборе параметров путем вариации параметра p отыскивалось решение уравнения (4), удовлетворяющее граничным условиям (5). В качестве начального приближения p использовали значение $p = p_0$, полученное из аналитического решения задачи в предельном случае быстрой реакции

$$p_0 = -(1 + \psi) \ln \left(1 - \frac{\Theta_s - \Theta_0 - \Theta'_0}{(1 + \psi)(\Theta_M - \Theta_0 - \Theta'_0)} \right).$$

Уравнение (4) с граничными условиями (5), описывающее распределение температуры при горении внутри пограничного слоя, в зависимости от соотношения между параметрами Da и Pe может иметь либо два решения, либо не иметь решений. Горению отвечают только высокотемпературные решения. Удобно представить результаты расчета в виде зависимости максимальной температуры (температуры горения Θ_m) от числа Da (рис. 1). В отсутствие теплопотерь (при $Pe \gg 1$) по мере увеличения числа Дамкелера температура горения стремится к адиабатической температуре горения эквивалентной газовой смеси ($\Theta_m \rightarrow 0$). При уменьшении числа Da температура горения уменьшается за счет чрезмерной интенсификации горения, а высоко- и низкотемпературные решения сближаются и при $Da = Da^*$ совпадают. При $Da < Da^*$ уравнение (4) решений не имеет. Это означает срыв горения.

Будем в дальнейшем называть предел с максимальной интенсивностью горения передней кромкой диффузионного пламени. На передней кромке пламени $\Theta_m = \Theta_1$. Величина Θ_1 зависит от кинетики газофазных реакций горения и начального состава смеси и может меняться в пределах от -2 до -1 . Для рассмотренного на рис. 1 случая $\Theta_1 = -1.45$. При увеличении теплопотерь (уменьшении числа Пекле) температура горения падает с увеличением Da даже в предельном случае быстрой реакции. Температура горения при конечной скорости реакции в этом случае при возрастании Da от значения, соответствующего передней кромке пламени, сначала увеличивается, проходит через максимум, а затем вновь начинает уменьшаться вплоть до второго предела, но уже с минимальной интенсивностью горения. На этом пределе температура составляет величину порядка Θ_1 в отличие от предельного случая быстрой реакции с учетом теплопотерь. Таким образом, каждому значению числа $Pe > Pe^*$ соответствуют два критических значения числа Da . Меньшему Da отвечает передняя кромка пламени, большему — вторая низкотемпературная граница. При увеличении теплопотерь (при уменьшении толщины слоя полимера δ) обе границы сближаются и при

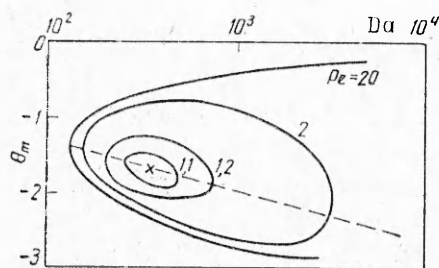


Рис. 1. Зависимость максимальной температуры диффузионного пламени θ_m от числа Дамкелера. Расчет при $\theta_0 = -4,5$, $\theta'_0 = 10$, $E_1/2E = 1,5$, $\psi = 1$, $a_2^0 = 0,5$.

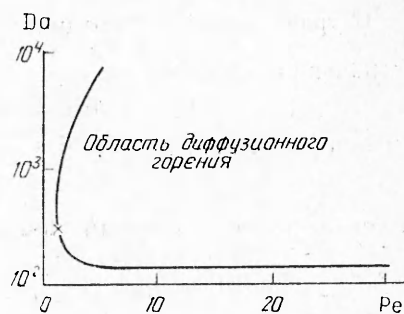


Рис. 2. Зависимость числа Дамкелера на пределе горения от числа Пекле (полуостров диффузионного горения).

$Pe = Pe^*$ совпадают, что соответствует условию полного гашения диффузионного пламени. В рассмотренном варианте $Pe^* = 1,0$ (см. рис. 1).

В координатах $Da = Da(Pe)$ область горения имеет вид полуострова (рис. 2). Внутри области, ограниченной кривой $Da(Pe)$, пламя существует, вне этой области горение невозможно. Отметим, что зависимость $Da(Pe)$ была получена нами ранее [4] в предположении, что на пределе горения переходит в диффузионно-кинетический режим. В настоящей работе эта зависимость найдена непосредственно из решения системы уравнений (1). Кроме того, здесь определен не только вид полуострова диффузионного горения, но и рассчитаны температуры горения внутри этого полуострова.

Внешняя кривая $Da(Pe)$ напоминает аналогичную кривую, полученную для пределов горения предварительно перемешанных газовых смесей в трубах [5]. Однако, по существу, эти кривые отличаются. Для предварительно перемешанных газов горению соответствует только верхняя ветвь кривой, а для диффузионного пламени — область, заключенная внутри нее; общее между этими кривыми — условие полного гашения. Это условие в обоих случаях описывается точкой $Da = Da(Pe^*)$.

Важнейшим в теории пределов диффузионного пламени является вопрос об интенсивности горения на передней кромке пламени и на пределах горения. Согласно проведенным в настоящей работе расчетам, интенсивность переработки реагентов в зоне реакции в отсутствие теплопотерь на передней кромке пламени зависит от кинетики горения и может в 2—3 раза превышать интенсивность горения эквивалентной газовой смеси. Вблизи полного предела диффузионного горения скорость переработки реагентов уменьшается примерно в e раз по сравнению со скоростью на передней кромке пламени в отсутствие теплопотерь.

ЛИТЕРАТУРА

1. Я. Б. Зельдович. ЖТФ, 1949, 19, 10, 1199.
2. А. Д. Марголин, В. Г. Крупкин. Докл. АН СССР, 1978, 242, 6, 1326.
3. А. Д. Марголин, В. Г. Крупкин. ФГВ, 1981, 17, 2, 3.
4. А. Д. Марголин, В. Г. Крупкин. Хим. физика, 1982, 7, 994.
5. Я. Б. Зельдович. ЖЭТФ, 1941, 11, 1, 159.