

УДК 629.194.34:536.468

В.А. ЩУКИН, Ф.М. ВАЛИЕВ, О.В. ДУНАЙ

*Казанский национальный исследовательский технический университет имени А.Н. Туполева, Республика Татарстан, Россия***ОСОБЕННОСТИ ОБРАЗОВАНИЯ ТОКСИЧНЫХ ВЕЩЕСТВ ПРИ ТУРБУЛЕНТНОМ ДИФФУЗИОННОМ ГОРЕНИИ ГАЗОВ**

Представлены главные отличительные особенности протекания реакций в турбулентном диффузионном пламени. Приведены полуэмпирические соотношения пространственно-временных характеристик турбулентного диффузионного пламени. Оценка основных пространственно-временных характеристик (скорости распространения пламени, времени горения) проведена на уровне простых полуэмпирических соотношений для турбулентного диффузионного пламени с использованием понятия массовой скорости потребления недостающего компонента и линейной скорости распространения ламинарного диффузионного пламени. Результаты расчета выхода токсичных веществ (несгоревших углеводородов-НС, окиси углерода-СО, окислов азота - NO_x) при турбулентном диффузионном горении и сопоставление их с экспериментальными данными показывают, что полуэмпирические соотношения качественно правильно отражают наблюдаемые экспериментальные факты.

Ключевые слова: горение, турбулентное диффузионное пламя, критерий механизма турбулентного диффузионного пламени, степень диффузионности факела пламени

Введение

В камерах сгорания авиационных ГТД, энергетических установок и других промышленных топливосжигающих устройств, как правило, имеет место турбулентное диффузионное горение. Поэтому представляет практический интерес анализ особенностей образования токсичных веществ при турбулентном диффузионном горении на уровне полуэмпирических соотношений.

В первом приближении роль турбулентности при диффузионном горении можно учесть по аналогии с ролью турбулентности предварительно перемешанной смеси, используя понятия турбулентного коэффициента диффузии (D_T).

Оценку основных пространственно-временных характеристик (скорости распространения пламени, времени горения) на уровне простых полуэмпирических соотношений для турбулентного диффузионного пламени можно получить, используя понятия массовой скорости потребления недостающего компонента, линейной скорости распространения ламинарного диффузионного пламени, и некоторых дополнительных физических соображений.

Необходимо отметить, понятие линейной скорости распространения пламени при диффузионном горении не имеет прямого физического смысла, в отличие от скорости распространения пламени предварительно перемешанных смесей, носит несколько условный характер и зависит главным обра-

зом от характеристик смешения, геометрии горелки и от общего соотношения воздуха и топлива.

Результаты исследований

Средняя для всего диффузионного фронта пламени массовая скорость потребления недостающего компонента ($\rho U_{д.л.}$) непосредственно связана через поверхность фронта пламени с высотой диффузионного пламени. Поскольку поверхность диффузионного фронта пламени пропорциональна произведению высоты пламени на диаметр трубки подвода недостающего компонента ($S_f \sim d h_{д.пл.}$), то в соответствии с законом Гуи-Михельсона линейная скорость распространения ламинарного диффузионного фронта пламени может быть оценена соотношениями:

– в случае общего избытка воздуха ($\alpha_\Sigma \geq 1$):

$$U_{д.л.} \approx \frac{D}{d} \cdot \ln \left[\frac{\alpha_\Sigma \cdot (L_0 + 1)}{(\alpha_\Sigma \cdot L_0 + 1)} \right], \quad (1)$$

– в случае общего избытка топлива ($\alpha_\Sigma \leq 1$):

$$U_{д.л.} \approx \frac{D}{d} \cdot \ln \left[\frac{(L_0 + 1)}{(\alpha_\Sigma \cdot L_0 + 1)} \right], \quad (2)$$

где D – коэффициент диффузии;

L_0 – стехиометрический коэффициент

Физическую картину диффузионного горения в турбулентном потоке можно представить сле-

дующим образом. Имеется поток воздуха и топлива, где среднее значение коэффициента избытка воздуха одинаков по сечению и длине камеры. Идеализованно такой случай может выглядеть как поток хорошо перемешанных черных и белых шаров, если принять за черные шары турбулентные моли топлива, а белые – за турбулентные моли воздуха, причем диаметры шаров соответствуют Эйлеровым масштабам турбулентности. До поступления в факел пламени не происходит смешения молей воздуха и топлива. В факеле локальный фронт пламени занимает такое положение, где местный состав близок к стехиометрии. В этих условиях моль недостающего компонента будет сгорать диффузионно с поверхности. Далее используя понятие линейной скорости распространения ламинарного диффузионного пламени ($U_{д.л.}$) и по аналогии с «поверхностной» моделью турбулентного горения заранее перемешанных смесей получаем полуэмпирические соотношения для скорости распространения турбулентного диффузионного пламени ($U_{т.д.}$) и времени горения в подобных условиях ($\tau_{т.д.}$):

$$U_{т.д.} = A_2 \cdot \theta \cdot U_{д.л.} + \frac{A_5 \cdot w'}{\sqrt{\ln\left(1 + \frac{w'}{U_{д.л.}}\right)}}, \quad (3)$$

$$\tau_{т.д.} = B \cdot \frac{1}{w'} \cdot \ln\left(1 + \frac{w'}{U_{д.л.}}\right), \quad (4)$$

где A_2 , A_5 , B – эмпирические постоянные;

w' – пульсационная скорость потока;

l – масштаб молей недостающего компонента.

θ – относительное повышение температуры, равное отношению температуры горения и начальной температуры (T_f/T_0).

Эти соотношения с точностью до эмпирических постоянных правильно отражают основные пространственно-временные характеристики турбулентного диффузионного факела пламени.

В отличие от горения предварительно перемешанных смесей, время турбулентного диффузионного горения по общему коэффициенту избытка воздуха изменяется с максимумом, расположенным вблизи стехиометрического состава. Это свойство проявляется в реальных форсажных камерах сгорания, когда при приближении общего состава к стехиометрии наблюдается падение полноты сгорания топлива.

Далее представляется возможным аналогично критерию механизма турбулентного горения предварительно перемешанных смесей использовать понятие критерия механизма турбулентного диффузионного горения ($K_{м.д.}$) как отношение характерного времени горения в ламинарном диффузионном

фронте пламени к времени турбулентного диффузионного горения, т.е.:

$$K_{м.д.} = \frac{\tau_{л.д.}}{\tau_{т.д.}}. \quad (5)$$

Отсюда следует, что закономерности выхода токсичных веществ (несгоревших углеводородов-НС, окиси углерода-СО, окислов азота- NO_x) при турбулентном диффузионном горении главным образом определяются закономерностями их выхода при ламинарном диффузионном горении. Влияние турбулентности сводится в основном к изменению структуры факела пламени и тем же эффектам, которые проанализированы при рассмотрении турбулентного горения заранее перемешанных смесей [2].

Соотношения для характеристик горения турбулентного диффузионного факела получены для идеализованного случая постоянства среднего состава по сечению и длине камеры. Причем естественно существование пределов распространения пламени и горения в этих условиях по общему коэффициенту избытка воздуха. Абсолютные уровни «бедной» (α_{Σ}^{\max}) и «богатой» (α_{Σ}^{\min}) границ распространения и горения могут быть определены либо экспериментально, либо расчетом, рассматривая критические условия переброса локальных диффузионных фронтов с одного горящего моля на другой. Реальное турбулентное диффузионное пламя в камерах сгорания имеет место при отдельной подаче топлива и воздуха, когда состав смеси изменяется как по сечению камеры, так и по длине. Используя модель черных и белых шаров применительно к слою смешения топлива и воздуха при турбулентном режиме течения и основываясь на закономерностях, вытекающих из рассмотрения характеристик горения в идеализованных условиях постоянства среднего состава по сечению и длине камеры, удастся проанализировать главные закономерности выхода токсичных веществ в реально встречающихся турбулентных диффузионных пламенах.

В первом приближении можно воспользоваться подходом, аналогичным рассмотрению ламинарного диффузионного пламени [3], а именно:

- осредненный фронт турбулентного диффузионного пламени занимает над горелкой такое положение, где осредненный местный состав соответствует стехиометрии;

- за время горения средний состав отклоняется от стехиометрии;

- закономерности изменения концентраций НС, СО, NO_x в зоне горения турбулентного диффузионного факела аналогичны закономерностям их изменения в идеализованном случае при значении

общего коэффициента воздуха, равном среденно-му значению для всего факела пламени.

Тогда среднее значение коэффициента избытка воздуха в зоне горения турбулентного диффузионного пламени (α_ϕ) можно оценить соотношениями:

- в случае общего избытка воздуха ($\alpha_\Sigma \geq 1$):

$$\alpha_\phi = \frac{1}{L_0} \cdot \left(1 + \frac{1}{\alpha_\Sigma \cdot L_0}\right)^{-1} \times \frac{1}{\exp\left\{\frac{\ln\left[\frac{\alpha_\Sigma \cdot (L_0 + 1)}{\alpha_\Sigma \cdot L_0 + 1}\right]}{1 + \tau_{т.г.}/\tau_{ст}}\right\} - 1}; \quad (6)$$

- в случае общего избытка топлива ($\alpha_\Sigma \leq 1$):

$$\alpha_\phi = \frac{1}{L_0} \times \left[(1 + \alpha_\Sigma \cdot L_0) \cdot \exp\left\{\frac{\ln\left[\frac{(L_0 + 1)}{\alpha_\Sigma \cdot L_0 + 1}\right]}{1 + \tau_{т.г.}/\tau_{ст}}\right\} - 1 \right], \quad (7)$$

где $\tau_{т.г.}$ – характерное время турбулентного горения стехиометрической смеси, определяется соотношением

$$\tau_{т.г.} = B \cdot \frac{l_0}{w'} \cdot \ln\left(1 + \frac{w'}{U_n}\right), \quad (8)$$

где B – эмпирическая постоянная, U_n – нормальная скорость распространения пламени исходной смеси.

В соотношениях 6 и 7 время турбулентного смешения до стехиометрии ($\tau_{ст}$) определяются соотношениями:

- вдоль оси струи топлива при общем избытке воздуха ($\alpha_\Sigma \geq 1$)

$$\tau_{ст} = \frac{d^2}{16 \cdot D_T \cdot \ln\left[\frac{\alpha_\Sigma \cdot (L_0 + 1)}{\alpha_\Sigma \cdot L_0 + 1}\right]}, \quad (9)$$

- вдоль оси струи воздуха при общем недостатке воздуха

$$\tau_{ст} = \frac{d^2}{16 \cdot D_T \cdot \ln\left[\frac{(L_0 + 1)}{\alpha_\Sigma \cdot L_0 + 1}\right]}, \quad (10)$$

где d – диаметр трубки.

По величине среднего коэффициента избытка воздуха для факела (α_ϕ) определяются скорость распространения фронта воспламенения ($U_{т.д.}$), потребное время горения ($\tau_{т.д.}$) и значение критерия механизма турбулентного диффузионного горения ($K_{м.д.}$). Закономерности образования токсичных веществ в турбулентном диффузионном пламени также полностью определяются полуэмпирическими уравнениями кинетических кривых (на примере образования HC), полученные в работе [1, 2], при значениях $\alpha_\Sigma = \alpha_\phi$.

В случае большого избытка одного из компонент, когда суммарный коэффициент избытка воздуха в камере больше «бедного» концентрационного предела распространения пламени ($\alpha_{кр}^{max}$) или же меньше «богатого» предела ($\alpha_{кр}^{min}$), возможно проявление эффекта гашения пламени избыточным компонентом. Этот эффект проявляется только в том случае, когда потребное время горения превышает время турбулентного смешения до верхнего или нижнего концентрационного предела.

Время турбулентного смешения до концентрационного предела ($\tau_{кр.см.}$) можно оценить следующими соотношениями:

- в случае $\alpha_\Sigma > \alpha_{кр.см}^{max}$:

$$\tau_{кр.см.} = \frac{d^2}{16 \cdot D_T} \times \frac{\ln\left(\alpha_{кр}^{max} \cdot \frac{1 + L_0}{1 + L_0 \cdot \alpha_{кр}^{max}}\right)}{\ln\left(\frac{\alpha_\Sigma}{\alpha_{кр}^{max}} \cdot \frac{1 + L_0 \cdot \alpha_{кр}^{max}}{1 + L_0 \cdot \alpha_\Sigma}\right) \cdot \ln\left(\alpha_\Sigma \cdot \frac{1 + L_0}{1 + \alpha_\Sigma \cdot L_0}\right)}, \quad (11)$$

- в случае $\alpha_\Sigma < \alpha_{кр.см}^{min}$:

$$\tau_{кр.см.} = \frac{d^2}{16 \cdot D_T} \times \frac{\ln\left(\frac{1 + L_0}{1 + L_0 \cdot \alpha_{кр}^{min}}\right)}{\ln\left(\frac{1 + L_0 \cdot \alpha_{кр}^{min}}{1 + L_0 \cdot \alpha_\Sigma}\right) \cdot \ln\left(\alpha_\Sigma \cdot \frac{1 + L_0}{1 + \alpha_\Sigma \cdot L_0}\right)}. \quad (12)$$

Если $\tau_{кр.см.} / \tau_{т.д.} > 1,0$ эффекты гашения пламени избыточным компонентом не проявляются, если же $\tau_{кр.см.} / \tau_{т.д.} < 1,0$, то имеет место гашение пламени избыточным компонентом.

Закономерности изменения концентраций HC , CO , NO_x в запламенной области определяются теми же зависимостями, что и в запламенной области ламинарного диффузионного пламени [3]. Отличия заключаются лишь во входных значениях концентраций токсичных веществ, которые в данном случае соответствуют концентрациям на выходе из зоны горения турбулентного диффузионного пламени.

Для примера на рис. 1 представлены результаты расчетов индексов эмиссии (EI) HC , CO , NO_x , с учетом особенностей турбулентного диффузионного пламени и экспериментальные результаты работы [4]. Расчеты выполнены для диффузионного горения испаренного керосина в воздухе при атмосферном давлении, общем коэффициенте избытка воздуха

$\alpha_{\Sigma} = 1,02$ и при различных начальных температурах воздуха на входе в камеру.

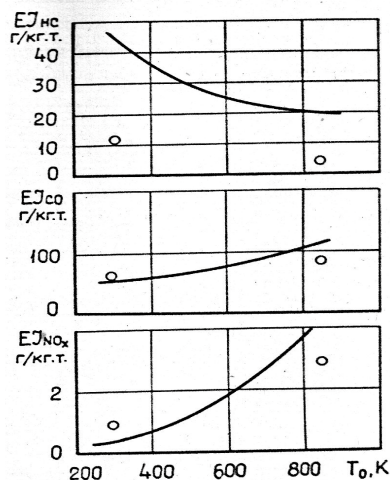


Рис. 1. Сопоставление экспериментальных и расчетных зависимостей изменения индексов эмиссии HC , CO , NO_x по температуре: — расчет по полуэмпирическим соотношениям; о экспериментальные данные [4]

Видно, что полуэмпирические соотношения качественно правильно отражают наблюдаемые экспериментально факты. О количественном соотношении трудно судить вследствие неопределенности характеристик турбулентности в условиях проведения экспериментов.

Для практики представляет интерес выделение области, когда характеристики горения и закономерности выхода основных токсичных веществ при диффузионном горении близки к характеристикам и закономерностям при горении предварительно перемешанных смесей. Для этого удобно ввести понятие степени диффузионности факела (K_d), представляющую собой отношение массовой скорости потребления недостающего компонента ($G_{п.г.}$) к массовой скорости смешения этого компонента в стехиометрическом соотношении ($G_{см}$):

$$K_d = \frac{G_{п.г.}}{G_{см}} \quad (13)$$

Как показано Я.Б. Зельдовичем [5] массовая скорость потребления реагентов в ламинарном пламени предварительно перемешанной стехиометрической смеси является максимальным значением массовой скорости потребления реагентов, которое может иметь место в ламинарном диффузионном пламени. Тогда предельное значение массовой скорости потребления недостающего компонента можно представить соотношением:

$$G_{п.г.} = S_{\phi} \cdot \rho \cdot U_{н,\alpha=1}, \quad (14)$$

где S_{ϕ} – поверхность фронта пламени;

ρ – плотность недостающего компонента;

$U_{н,\alpha=1}$ – нормальная скорость распространения пламени стехиометрической смеси.

Массовая скорость смешения недостающего компонента в стехиометрическом соотношении в соответствии с уравнением диффузии определяется:

$$G_{см} = S_{\phi} \cdot \rho \cdot Q_{п.г.}, \quad (15)$$

где S_{ϕ} – поверхность стехиометрического состава

ρ – плотность недостающего компонента;

$Q_{п.г.}$ – объемный расход недостающего компонента на единицу поверхности стехиометрического состава.

Тогда степень диффузионности можно определить соотношениями:

- в случае общего избытка воздуха $\alpha_{\Sigma} > 1,0$:

$$K_d \approx \frac{d \cdot U_{н,\alpha=1}}{D} \cdot \frac{1}{\ln \left[\frac{\alpha_{\Sigma} \cdot (L_0 + 1)}{(\alpha_{\Sigma} \cdot L_0 + 1)} \right]}, \quad (16)$$

- в случае общего недостатка воздуха $\alpha_{\Sigma} < 1,0$:

$$K_d \approx \frac{d \cdot U_{н,\alpha=1}}{D} \cdot \frac{1}{\ln \left[\frac{(L_0 + 1)}{(\alpha_{\Sigma} \cdot L_0 + 1)} \right]}. \quad (17)$$

Выводы

Если значение $K_d > 1,0$, т.е. когда скорость потребления реагентов во фронте пламени намного выше скорости образования стехиометрической смеси, то характеристики горения, включая и эмиссионные, контролируются смешением и закономерности выхода токсичных веществ определяются закономерностями диффузионного пламени.

При $K_d < 1,0$, т.е. когда скорость потребления реагентов во фронте пламени меньше скорости образования стехиометрической смеси, то характеристики горения, включая и эмиссионные, близки к характеристикам горения предварительно перемешанных смесей.

Литература

1. Шукин, В.А. Физико-химическая модель выхода несгоревших углеводородов из ламинарного пламени однородной смеси [Текст] / В.А. Шукин, Ф.М. Валиев, О.В. Дунай // Вестник КГТУ им. А.Н. Туполева. – Казань: Изд-во Казан. гос. техн. ун-та. – 2010. – № 1. – С. 17-24.
2. Моделирование образования токсичных веществ в турбулентном пламени однородной смеси [Текст] / В.А. Шукин, Ф.М. Валиев, О.В. Дунай, Ф.В. Шукин // Проблемы и перспективы развития авиации, наземного транспорта и энергетики АНТЭ-2011: Матер. VI Междунар. науч.-техн. конф. – Казань: Изд-во Казан. гос. техн. ун-та. – 2011. – Т. 1. – С. 40-48.

3. Шукін, В.А. Моделирование образования токсичных веществ в ламинарном диффузионном пламени [Текст] / В.А. Шукін, Ф.М. Валиев, О.В. Дунай // Матер. IV Междунар. симпозиума по реактивному движению и энергетике. – Китай, г. Сиань, 2012. – С. 365-369.

4. Образование окиси азота в турбулентном диффузионном факеле природного газа [Текст] / Б.С. Сорока, И.Я. Сигал, Н.А. Гуревич и др. // Теплоэнергетика. – 1978. – № 1. – С. 45-49.

5. Зельдович, Я.Б. Горение неперемешанных газов [Текст] / Я.Б. Зельдович // ЖЭТФ. – 1949. – Т. 19. – С. 1199-1210.

Поступила в редакцию 3.06.2013, рассмотрена на редколлегии 13.06.2013

Рецензент: д-р техн. наук, проф., проф. кафедры АДЭУ Б.Г. Мингазов, Казанский национальный исследовательский технический университет им. А.Н.Туполева, Казань.

ОСОБЛИВОСТІ УТВОРЕННЯ ТОКСИЧНИХ РЕЧОВИН ПРИ ТУРБУЛЕНТНОМУ ДИФУЗІЙНОМУ ЗГОРЯННІ ГАЗІВ

В.А. Шукін, Ф.М. Валиєв, О.В. Дунай

Представлено головні відмітні особливості протікання реакцій в турбулентному дифузійному полум'я. Наведено напівемпіричні співвідношення просторово-часових характеристик турбулентного дифузійного полум'я. Оцінку основних просторово-часових характеристик (швидкості розповсюдження полум'я, часу горіння) проведено на рівні простих напівемпіричних співвідношень для турбулентного дифузійного полум'я із використанням поняття масової швидкості споживання недостатнього компоненту і лінійної швидкості розповсюдження ламинарного дифузійного полум'я. Результати розрахунку виходу токсичних речовин (вуглеводнів, що не згоріли - HC, окису вуглецю - CO, окисів азоту - NOx) при турбулентному дифузійному горінні та співставлення їх із експериментальними даними показують, що напівемпіричні співвідношення якісно правильно відбивають експериментальні факти, що спостережують.

Ключові слова: горіння, турбулентне дифузійне полум'я, критерій механізму турбулентного дифузійного полум'я, ступінь дифузійності факелу полум'я.

PARTICULARITIES OF THE FORMATION TOXIC SUBSTANCES IN TURBULENT DIFFUSION COMBUSTION GAS

V.A. Schukin, F.M. Valiev, O.V. Dunay

The presented main to discriminating particularities current reaction in turbulent diffusion flame. They are brought semitheoretical correlations space-temporary features turbulent diffusion flame. The estimation main space-temporary features (the velocities of the spreading the flame, time of the combustion) is organized at a rate of simple semitheoretical correlations for turbulent diffusion flame with use the notion to mass velocity of the consumption lacking component and linear velocity of the spreading laminar diffusion flame. The results of the calculation of the output toxic material (unburned hydrocarbons-HC, oxide of carbon-CO, nitrogen oxides - NOx) under turbulent diffusion combustion and collation them with experimental data show that semitheoretical correlations qualitative it is correct reflect the observed experimental facts.

Key words: combustion, turbulent diffusion flame, criterion of the mechanism turbulent diffusion flame, degree diffusion torchlight of the flame.

Шукін Владимир Андреевич – канд. техн. наук, доцент, доцент кафедри «Авиационные двигатели и энергетические установки» Казанского национального исследовательского технического университета им. А.Н. Туполева, Казань, Республика Татарстан, Россия, e-mail: adeu@adeu.kstu-kai.ru.

Валиев Фарид Максимович - канд. техн. наук, доцент, доцент кафедри «Авиационные двигатели и энергетические установки» Казанского национального исследовательского технического университета им. А.Н. Туполева, Казань, Республика Татарстан, Россия, e-mail: ValievFM@mail.ru.

Дунай Олег Васильевич - канд. техн. наук, доцент, доцент кафедри «Авиационные двигатели и энергетические установки» Казанского национального исследовательского технического университета им. А.Н. Туполева, Казань, Республика Татарстан, Россия, e-mail: adeu@adeu.kstu-kai.ru.