

УДК 621.43.055 : 621.458.081

В.П. ГЕРАСИМЕНКО, д-р техн. наук

*Национальный аэрокосмический университет им. Н.Е. Жуковского "ХАИ"*

## О НЕУСТОЙЧИВОСТИ ГОРЕНИЯ В КАМЕРАХ СГОРАНИЯ ГТД

Виконане дослідження умов зриву полум'я вуглеводневих палив та запропоновано його математичну модель в малоemisійних камерах згорання газотурбінних двигунів.

Conditions of stall carbon-hydrogen fuel's flame are investigating and the mathematical model this flame is given in low-emission combustors of gasturbine engines.

В связи с созданием малоэмиссионных камер сгорания газотурбинных двигателей (ГТД) весьма актуальная задача – обеспечение устойчивости горения [1, 2]. Факельная стабилизация горения в таких камерах сгорания [3] свидетельствует о существенном влиянии на срывные характеристики горения углеводородных топлив реакций предпламенных процессов химического их преобразования. Устранение вибрационного горения в малоэмиссионных камерах сгорания ГТД [4, 5] требует математического описания условий срыва пламени, как одной из причин такого горения.

Целью данной статьи является определение условий срыва пламени в малоэмиссионных камерах сгорания ГТД газоперекачивающих агрегатов (ГПА).

Известно, что улучшение смесеобразования топлива с воздухом с целью снижения вредных выбросов (особенно  $\text{NO}_x$  и дыма) в камере сгорания ГТД приводит к сужению концентрационного предела стабилизации пламени, в том числе по "бедному" срыву, который зависит от теплоты сгорания  $H_u$  и состава топлива, начальной температуры  $T_0$  и теплоемкости продуктов сгорания  $C_p$  [6]. Процессы как химической реакции окисления топлива, так и диссоциации продуктов горения, в общем имеют неустановившийся характер, что усугубляет динамическую неустойчивость горения у границ концентрационных пределов. Температура пламени при стехиометрическом горении углеводородных топлив  $C_nH_m$  и коэффициенте полноты сгорания  $\eta_r \rightarrow 1$  зависит от структуры топлива, т.е. отношения  $n/m$ , т.к. при этом меняются  $H_u$  и  $C_p$ . А именно, чем больше содержание в топливе водорода, тем ниже температура пламени [7].

Температура в зоне горения стехиометрической метано-воздушной смеси составляет  $T_{зr} \cong 2200 \text{ K}$  [8], тогда как минимальная температура, соответствующая "бедному" и "богатому" пределу распространения пламени, опускается до значения  $\sim 1400 \text{ K}$ . "Бедный" предел соответствует коэффициенту избытка воздуха  $\alpha \cong 2,0$  и практически не зависит от давления в диапазоне  $0,01 \dots 5 \text{ МПа}$ , но зависит от скорости и температуры реакции: с повышением температуры область распространения пламени расширяется [3, 8]. При воспламенении метано-воздушной смеси он составляет  $\alpha \cong 1,67$  [4]. Повышение  $\alpha$  от 1,0 до 1,67 приводит к значительному снижению скорости срыва пламени от  $\sim 240 \text{ м/с}$  до  $\sim 40 \text{ м/с}$ , что объясняется увеличением времени задержки воспламенения  $\tau \sim \alpha \exp(E/RT)$  [7, 9]. Срыв пламени является также источником возмущений при вибрационном горении.

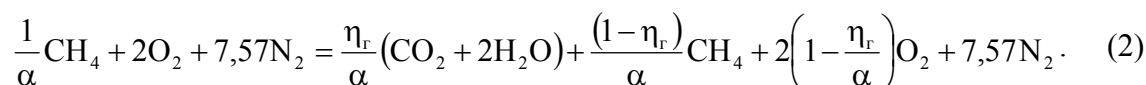
Скорость тепловыделения характеризуется уравнением материального баланса

[7, 8], описывающим скорость горения топливо-воздушной смеси

$$G_b \eta_r / \alpha = C_{cf} V T^{0.5} \exp(-E/RT) \rho^a X_T^b X_o^{a-b}, \quad (1)$$

где  $G_b$  – расход воздуха;  $C_{cf}$  – фактор соударений [7, 8];  $V$  – объем зоны горения;  $\rho$  – плотность продуктов горения ( $\rho = p/RT$ );  $p$  – давление в камере сгорания;  $X_T$  и  $X_o$  – концентрации топлива и кислорода;  $a$  – порядок реакции;  $b$  – показатель степени.

Здесь  $X_T$  и  $X_o$  могут быть определены по модели "суммарной реакции", в которой рассматривают только исходные и конечные вещества с учетом недогорания топлива  $(1 - \eta_r)$ . Модель горения "бедной" ( $\alpha > 1,0$ ) метано-воздушной смеси имеет вид:



Формула (2) записана для метана  $\text{CH}_4$  и воздуха, в котором 20,9 % по объему составляет кислород и 79,1 % – азот. Отсюда получим  $X_T$  и  $X_o$  в продуктах сгорания

$$X_T = \frac{(1 - \eta_r)/\alpha}{L_0 + 1/\alpha}; \quad X_o = \frac{0,209L_0(1 - \eta_r/\alpha)}{L_0 + 1/\alpha}, \quad (3)$$

где  $L_0 = 9,57 \text{ м}^3/\text{м}^3$  – объемный стехиометрический коэффициент.

В этой модели предполагается, что топливо сгорает до  $\text{CO}_2$  и  $\text{H}_2\text{O}$ , а вредные вещества  $\text{NO}_x$  и  $\text{CO}$  имеют малую величину в сравнении с другими составляющими и поэтому они в явном виде не выделены. В зоне горения полнота сгорания обычно  $\eta_r \approx 0,8 \dots 0,85$ . Несгоревшее топливо и кислород, доли которых соответственно равны  $(1 - \eta_r)$  и  $(1 - \eta_r/\alpha)$ , предполагаются единственными продолжающими реагировать веществами далее за основной зоной горения по мере роста  $\eta_r$  ( $\eta_r \rightarrow 1,0$ ).

Подставив концентрации  $X_T$  и  $X_o$  (3) в формулу (1) для реакции второго порядка  $a = 2$  и  $b = 1$  с учетом уравнения состояния  $\rho = p/RT$ , получим зависимость:

$$\frac{G_b}{Vp^2} = \frac{C_{cf}}{R^2 T^{1.5} \exp(E/RT)} \cdot \frac{0,209L_0}{(L_0 + 1/\alpha)^2} \cdot \frac{(1 - \eta_r)(1 - \eta_r/\alpha)}{\eta_r}, \quad (4)$$

в которой значение второго множителя правой части по мере выгорания топлива в зоне горения изменяется мало, а поэтому зависимость (4) можно заменить соотношением

$$\frac{G_b}{Vp^2} \sim \frac{1}{T^{1.5} \exp(E/RT)} \cdot \frac{(1 - \eta_r)(1 - \eta_r/\alpha)}{\eta_r}. \quad (5)$$

Левая часть в этих выражениях характеризует скорость отвода тепла (т.е. количество тепла, необходимое для нагрева свежей топливо-воздушной смеси до температуры в зоне горения). Правая же часть представляет зависимость скорости тепловыделения от  $\eta_r$ . При малых  $\eta_r$  скорость тепловыделения мала из-за низкой температуры горения. С повышением  $\eta_r$  по мере развития горения рост температуры  $T$  приводит к увеличению скорости тепловыделения, которая достигает своего максимума при некотором  $\eta_r = 0,7 \dots 0,9$  [8]. Дальнейшее повышение  $\eta_r$  вплоть до

$\eta_r = 1,0$  приводит к снижению скорости тепловыделения из-за снижения концентрации  $X_T$  и  $X_0$ .

Для устойчивого горения скорость тепловыделения должна быть равна скорости теплоотвода. Если же увеличивать расход воздуха  $G_v$  или  $\alpha$ , то из-за превышения скорости теплоотвода произойдет срыв пламени. Очевидно, что предельное значение  $\alpha$  при обеднении топливо-воздушных смесей, при котором происходит срыв пламени, уменьшается вследствие замедления нарастания  $\eta_r$  вдоль камеры сгорания. Это приводит к тому, что максимум на характеристике зависимости скорости тепловыделения от  $\eta_r$  (доли сгоревшего топлива) смещается в сторону больших значений  $\eta_r \approx 0,9$ . Поэтому возможен срыв пламени при более высоких значениях  $\eta_r$ , ввиду уменьшения наклона предельной линии  $G_v/Vp^2$  при ее соприкосновении с кривой тепловыделения. Срыв происходит из-за недостатка тепла для нагрева свежей смеси до температуры активации.

Таким образом, обеднение топливо-воздушной смеси в зоне горения смещает область дефлаграции (тонкий слой быстрых химических превращений со свечением и значительным градиентом температуры и концентрации) по потоку, создавая предпосылки для неустойчивости горения. Применение факельной "богато-бедной" стабилизации пламени вместо рециркуляционной [3] позволяет существенно расширять границы устойчивого горения бедной метано-воздушной смеси в камерах сгорания ГТД [1, 2].

#### Литература

1. Романовский Г. Ф. Технология малоэмиссионного сжигания топлива в камерах сгорания газотурбинных двигателей / Г.Ф. Романовский, С.И. Сербин, В.Г. Ванцовский, В.В. Вилкул // Вестник Национального технического ун-та "ХПИ". – 2005. – № 6. – с. 154–160.
2. Коротич Е. В. Экологические характеристики и конструктивные особенности камер сгорания с диффузионным горением / Е. В. Коротич, В. Е. Спицын, Б. В. Исаков, В. В. Романов // [www.ciam.ru/conf/lemision/doc/16.doc](http://www.ciam.ru/conf/lemision/doc/16.doc).
3. Ведешкин Г. К., Марков Ф. Г., Свердлов Е. Д. Сравнительные характеристики факельной и газодинамической стабилизации горения // Авиационно-космическая техника и технология: Зб. наук. праць. – Харків: ХАІ. – 2001. – Вип. 26. – с. 42–45.
4. Герасименко В. П., Налесный Н. Б. Вибрационное горение в камерах сгорания ГТД // Вестник Национального технического ун-та "ХПИ". – 2006. – № 5. – с. 53–58.
5. Герасименко В. П., Налесный Н. Б. Механизмы вибрационного горения в камерах сгорания ГТД // Авиационно-космическая техника и технология. – 2006. – №3 (29). – с. 48–52.
6. Оджерс, Кретчмер, Холпин. Бедные пределы срыва пламени в однородных газовых смесях // Тр. амер. общ. инж.-мех. Сер.: Энергетические машины и установки. – 1985. – №1. – с. 9–17.
7. Химия горения / Под ред. У. Гардинера, мл. Пер. с англ. – М.: Мир, 1988. – 464 с.
8. Лефевр А. Процессы в камерах сгорания ГТД. – М.: Мир, 1986. – 566 с.
9. Мингазов Б. Г. Камеры сгорания газотурбинных двигателей. Конструкция, моделирование процессов и расчет: Учебное пособие. – Казань: Казан. гос. техн. ун-т, 2004. – 220 с.

© Герасименко В.П., 2007