

УДК 532.46.001.57

**АНАЛИЗ ОСОБЕННОСТЕЙ ПРОЦЕССА ТУРБУЛЕНТНОГО ГОРЕНИЯ
В КАМЕРЕ СГОРАНИЯ С ПРЕДВАРИТЕЛЬНЫМ СМЕШЕНИЕМ
ГОРЮЧЕГО И ОКИСЛИТЕЛЯ**

© 2011 г.

К.Я. Якубовский, А.Б. Лебедев, Е.Д. Свердлов

Центральный институт авиационного моторостроения им. П.И. Баранова, Москва

k_yakubovsky@rambler.ru

Поступила в редакцию 15.06.2011

Проведено расчетное и экспериментальное исследование процесса турбулентного горения в камере сгорания с предварительным смешением горючего (метана) и окислителя (воздух) в широком диапазоне коэффициента избытка воздуха ($\alpha = 1.6\text{--}3.6$). Рассматривались особенности влияния неравномерности поля концентрации горючего на входе в зону горения на эмиссию загрязняющих веществ, а также низкочастотные и высокочастотные колебания в камере сгорания. При расчетном исследовании использовались методы RANS и URANS. Для проведения расчетного исследования неравномерности поля концентрации горючего (метод RANS) во всем диапазоне α оказалось необходимым модифицировать модель турбулентного горения [1] для учета догорания за фронтом пламени. Методом URANS в трехмерном случае удалось получить режим низкочастотных (расходных) колебаний, частота которых существенно ниже частоты первой акустической моды.

Ключевые слова: турбулентное горения, камера сгорания, эмиссия поллютантов, низкочастотные и высокочастотные осцилляции.

Одной из актуальных и нерешенных проблем процесса турбулентного горения в современных камерах сгорания с предварительным смешением горючего и окислителя является влияние неравномерности поля концентрации смеси на входе в зону горения на эмиссию загрязняющих веществ. Имеющиеся экспериментальные и теоретические исследования указывают на то, что неравномерность поля концентрации может заметно увеличивать эмиссию NO_x в камере сгорания (см., например, [2, 3]) при горении метано-воздушной смеси. В настоящей работе выполнено экспериментальное и расчетное исследование влияния указанной неравномерности на эмиссию загрязняющих веществ, а также расчетным путем получены режимы высоко- и низкочастотных колебаний в камере сгорания. Камера сгорания имела следующие значения параметров на входе: давление $P = 3$ МПа, температура $T_b = 828$ К, коэффициент избытка воздуха варьировался в диапазоне $\alpha = 1.6\text{--}3.6$, характерное время пребывания $t = 0.010\text{--}0.015$ с. В эксперименте на режиме $P = 3$ МПа, $T_b = 828$ К, $\alpha = 2.4$ получена эмиссия NO_x 15 ppm, CO 20 ppm. При расчетном моделировании использовался программный пакет Fluent и два подхода (RANS и URANS) для расчета стационарных и нестационарных

трехмерных турбулентных реагирующих течений. Осредненные уравнения Навье – Стокса, диффузии компонентов и полной энергии замыкались двухпараметрической $k\text{--}\epsilon$ моделью турбулентности.

В качестве модели горения была выбрана известная фронтовая модель [1] с уравнением для полноты сгорания S . Ранее в [4–7] были проведены экспериментальное и расчетное исследование модельной гомогенной камеры сгорания, отличающейся от рассматриваемой здесь большими линейными размерами и отсутствием неравномерности поля концентрации. В [5–7] было показано, что эта модель расчета позволила количественно описать важнейшие особенности турбулентного течения, горения и эмиссионные характеристики такой камеры. Однако в случае камеры сгорания с неравномерным полем концентрации горючего результаты расчета дают значительно меньшие (на порядок величин) значения по сравнению с опытными данными по эмиссии окислов азота. Кроме того, из результатов расчета следует, что уже при $\alpha > 2.1\text{--}2.2$, после отключения источника зажигания, происходит «погасание» пламени в камере сгорания, что противоречит экспериментальным данным. Таким образом, возникла необходимость в модификации исходной фронтовой модели горения [1]. Для моделирования под-

жигания смеси в начальный момент времени в части зоны обратных токов полагалось $C = 1$. Температура газа определялась в виде $T = T_u(1 - C) - T_b(Z)C$, а при аппроксимации во фронтальной модели [1] источников члена $W = \rho_u U_T |\text{grad } C|$ дополнительно учитывался объемный механизм догорания за фронтом пламени в виде $W_v = W_v(Z, C)$, где T_b – температура сгоревшего газа, ρ_u – плотность свежей смеси. Окончательный вид источников члена в уравнении для C имеет вид $W = \max\{\rho_u U_T |\text{grad } C|; W_v\}$, где $U_T = U_T(U_i(Z), P, T_u, k, \epsilon)$ – скорость турбулентного горения. При этом в модель вводится еще одно дифференциальное уравнение для восстановленной концентрации горючего Z .

Скорость нормального ламинарного распространения пламени U_l и температура за фронтом T_b аппроксимировались в виде аналитических функций локального значения Z по результатам решения ряда U_n -задач с использованием кинетической схемы GRI-Mech 3.0 горения смеси метан–воздух в широком диапазоне исходных значений параметров. Источник W_v также был получен на основе результатов расчетов U_n -задачи.

Для расчета концентрации загрязняющих веществ (NO , NO_2 , CO) использовались уравнения диффузии с источниками членами, полученными из результатов решения U_n -задачи внутри и за ламинарным фронтом пламени как функции от Z и C . Использование модифицированной методики позволило провести расчеты горения в камере сгорания во всем диапазоне изменения коэффициента избытка воздуха ($\alpha = 1.6\text{--}3.6$). Для рассмотренных условий аппроксимация скорости образования NO , полученная из решения ряда U_n -задач, имеет вид $W_{\text{NO}} = 2.298 \cdot 10^{20} \cdot Z^{14.926}$ [1/с]. Видно, что скорость образования NO с обогащением смеси (увеличением Z и температуры за фронтом) будет быстро увеличиваться, поэтому для богатых смесей ($\alpha = 1.6\text{--}1.8$) неравномерность поля концентрации горючего должна сильно влиять на выход NO_x . Для бедных смесей эффект значительно слабее. Качественно это можно объяснить очень сильной (по механизму Зельдовича)

зависимостью образования NO от температуры (а, следовательно, от α или Z). Используемый модифицированный метод, однако, не позволил получить в расчетах ожидаемой сильной чувствительности эмиссии NO_x к неравномерности концентрации горючего. Это может быть связано с недостатками используемой k - ϵ модели турбулентности, не позволяющей правильно описывать процессы на фронте и за фронтом пламени. В окрестности фронта пламени эта модель из-за невыполнения условий реализуемости ($k \ll 2\nu_t S$, где ν_t – турбулентная вязкость, S – второй инвариант тензора скоростей деформации) завышает градиенты скорости. Это, в свою очередь, приводит к росту турбулентной вязкости и энергии турбулентности, смешение резко интенсифицируется и исходная неравномерность поля концентрации сглаживается. По-видимому, при решении таких задач методом RANS необходимо использовать нелинейные модели турбулентности. Особенно сильное влияние на образование окислов азота может сказаться учет в методе расчета нестационарности течения, а также применение вместо модели [1], которая предназначена только для описания процессов вблизи фронта пламени, «квазиламинарной» модели горения [5]. Отметим также, что в этом расчетном исследовании не был учтен ряд других важных эффектов (наличие стенки, излучение и т.д.).

Методом URANS в трехмерном случае удалось получить режим низкочастотных (расходных) колебаний, частота которых существенно ниже частоты первой акустической моды. На рис. 1 представлены мгновенные положения фронта пламени в разные моменты времени (низкочастотные колебания). Отчетливо видно начало колебания фронта пламени. Частота колебаний давления в зоне обратных токов составляла 139 Гц, а амплитуда 3.9%. На рис. 2 показаны мгновенные положения фронта пламени в разные моменты времени (высокочастотные колебания, осесимметричная постановка). Отметим, что в осесимметричной постановке были получены результаты, в которых наблюдались только акустические колебания.

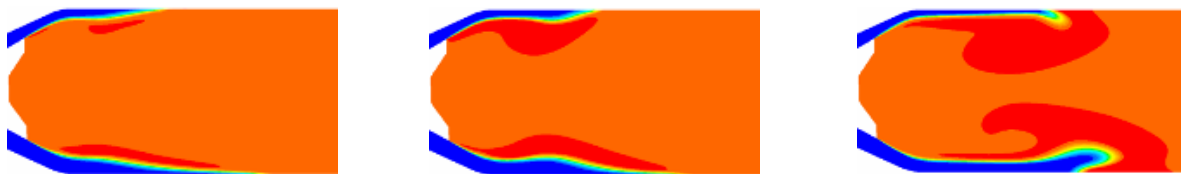


Рис. 1

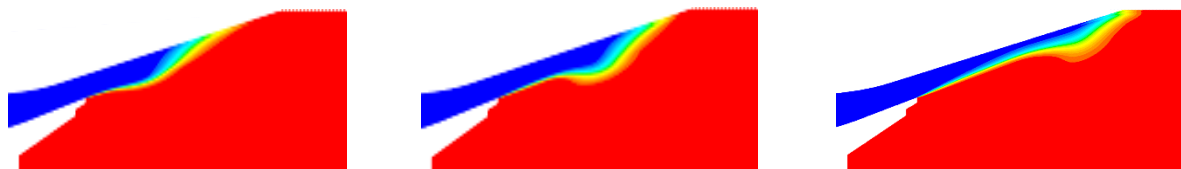


Рис. 2

Список литературы

1. Zimont V.L. // Experimental Thermal and Fluid Science. 2000. V. 21, No 1–3. P. 179.
2. Burnes J.C., Mellor A.M. // ASME Paper 97-GT-73, 1997.
3. Гольцев В.Ф., Гомзякова И.И. // Экологические проблемы авиации: Труды ЦИАМ. №1347. М.: Torus-Press, 2010. С. 291–303.
4. Vedeshkin G. et al. // Proc. Intern. Gas Turbine Congress. Tokyo. 2007. P. 4.
5. Козлов В.Е., Лебедев А.Б., Секундов А.Н., Якубовский К.Я. // Теплофизика высоких температур. 2009. Т. 47, №6. С. 1–8.
6. Козлов В.Е., Лебедев А.Б., Секундов А.Н., Якубовский К.Я. // Химическая физика. 2010. Т. 29, №7. С. 37–47.
7. Лебедев А.Б., Секундов А.Н., Якубовский К.Я. // Теплофизика высоких температур. 2009. Т. 47, №3. С. 476–480.

ANALYSIS OF THE FEATURES OF THE PROCESS OF TURBULENT COMBUSTION IN A COMBUSTION CHAMBER WITH A PREMIX OF FUEL AND OXIDIZER

K. Ya. Yakubovsky, A. B. Lebedev, E. D. Sverdlov

A computational and experimental study of turbulent combustion in the combustion chamber for premixed fuel (methane) and oxidizer (air) in a wide range of excess air ratio ($\alpha = 1.6\text{--}3.6$) was performed. The features of the influence of the inhomogeneous character of the field of fuel concentration at the inlet to the combustion zone on the emission of pollutants, as well as low-frequency and high-frequency oscillations in the combustion chamber were considered. The calculation methods used RANS and URANS. To carry out the calculation studies of the effect of inhomogeneous field of fuel concentration (method of RANS) in the entire range of α , it proved necessary to modify the model of turbulent combustion to account for after-burning of the flame front. Due to URANS method, in three-dimensional case, the low-frequency mode (consumables) vibrations, whose frequency is significantly lower frequency of the first acoustic mode were obtained.

Keywords: turbulent combustion, combustion chamber, emission of pollutants, low frequency and high frequency oscillations.