

МОДЕЛИРОВАНИЕ ЯВЛЕНИЯ БЕДНОГО СРЫВА В КАМЕРЕ СГОРАНИЯ ГАЗОТУРБИННОГО ДВИГАТЕЛЯ

© 2007 Л. Ю. Гомзиков, Ю. Г. Куценко, С. Ф. Онегин

ОАО «Авиадвигатель», г. Пермь

Дано описание модели турбулентного горения, позволяющей смоделировать процесс дестабилизации фронта пламени. Эта модель позволяет учесть различные физико-химические процессы, которые приводят к срыву пламени. Проведено сравнение результатов расчетов с данными эксперимента для двухзонной камеры сгорания газотурбинного двигателя. Результаты расчетов показали хорошее согласование с экспериментом, тем не менее требуется дальнейшее тестирование и развитие модели.

Введение. Современные нормы по эмиссии вредных веществ привели к разработке и использованию технологии горения заранее перемешанной бедной топливовоздушной смеси в камерах сгорания газотурбинных двигателей промышленного применения. Хорошее смешение бедной смеси в камере сгорания на номинальном режиме работы уменьшает уровень эмиссии NO, но на режимах частичной нагрузки может иметь место бедный срыв пламени. Для того чтобы обеспечить безопасный режим работы газотурбинного двигателя на всех нагрузках применяются камеры сгорания с двумя зонами горения: дежурной (диффузионной) и основной (гомогенной). Принцип работы этих камер сгорания основан на использовании дежурного горелочного модуля, создающего диффузионное пламя, для того, чтобы обеспечить стабилизацию в гомогенной зоне пламени на низких режимах работы путем притока тепла. Однако при диффузионном горении расположение фронта пламени определяется смешением, пламя стабилизируется на поверхности стехиометрии, что приводит к высокой температуре горения смеси и повышает уровень эмиссии NO. Уменьшить уровень эмиссии NO можно путем уменьшения расхода топлива в дежурную зону. Однако при этом может возникнуть другая проблема, уже касающаяся зоны горения заранее перемешанной топливовоздушной смеси. В основной зоне должна быть обеспечена требуемая полнота сгорания топлива и стабилизация пламени. Следовательно, должен быть найден компромисс по распределению расходов

воздуха и топлива в дежурную и основную зоны для того, чтобы обеспечить низкий уровень эмиссии NO и полноту сгорания на всех режимах работы камеры сгорания.

Проектирование и доводка двухзонной камеры сгорания – сложный процесс, требующий большого объема экспериментальных и конструкторских работ. Этот объем можно значительно сократить с помощью использования трехмерного численного моделирования процессов в камере сгорания. Следовательно, есть необходимость в разработке математических моделей, способных описать процессы стабилизации и срыва пламени в диффузионных и гомогенных зонах горения, а также предсказать уровень эмиссии оксида азота.

Существуют два широко используемых класса моделей турбулентного горения:

1. Модели, основанные на понятии поверхностного горения во фронте пламени.
2. Модели, в рамках которых подразумевается, что процесс горения происходит в объеме топливовоздушной смеси.

Типичный представитель первого класса моделей – «флеймлет» модель, являющаяся привлекательным методом для моделирования физико-химических процессов в камере сгорания. Концепция «флеймлет» модели была разработана независимо несколькими группами исследователей: Гибсон, Либби [1, 2], Уильямс [3], Кузнецов [4], Билгер [5], Петерс [6]. В рамках этой модели процесс горения происходит в тонком слое, называемом фронтом пламени. Существуют две модификации «флеймлет» модели, описывающие

процессы поверхностного горения в диффузионном и гомогенном пламени. Одним из достоинств «флеймлет» модели является то, что она дает реалистичную информацию относительно распределения атомарного кислорода O и уровня температуры во фронте пламени, что позволяет получить хорошее согласование с данными эксперимента по уровню эмиссии NO . Но в рамках применяемых ранее постановок эта модель не может корректно описать процесс срыва пламени.

В данной работе процесс дестабилизации горения был численно исследован в рамках «флеймлет» модели с использованием модифицированной формулы Зимонта и выражения скорости распространения фронта пламени в гомогенной смеси.

Структура фронтов пламени. Как известно, в традиционных камерах сгорания ГТД процесс окисления топлива и, как следствие, выделения тепла происходит в так называемой зоне фронта пламени. Следовательно, фронт пламени является поверхностью, разделяющей свежую и сгоревшую топливовоздушную смесь. На рис. 1 представлены поле температуры и расположение фронтов в двухзонной камере сгорания. В первичную зону камеры сгорания подается топливо, формирующее диффузионный факел, через ос-

новные отверстия подается гомогенная смесь. Внутри этой камеры сгорания существуют два различных типа фронта пламени.

Первый тип – диффузионный фронт пламени. Формирование поверхности диффузионного фронта пламени определяется процессом смешения топлива и окислителя. Следовательно, возникновение и существование диффузионного фронта пламени зависит от взаимодействия процессов кинетики химических реакций и радиационного теплообмена, отвечающих за тепловой баланс пламени, а также турбулентной диффузии компонентов смеси внутри фронта пламени.

Второй тип фронта пламени – гомогенный фронт пламени. Он образуется в случае горения заранее перемешанной смеси топлива с воздухом. В этом случае возникновение фронта пламени зависит от скорости протекания химических реакций. Разрушение фронта пламени происходит при уменьшении тепловыделения из-за обеднения топливовоздушной смеси из-за разрыва его поверхности турбулентными вихрями. Очевидно, что при обеднении смеси необходим постоянный источник тепла, поддерживающий достаточно высокую скорость реакций во фронте. Этим источником является диффузионный фронт пламени, передающий тепловую энер-

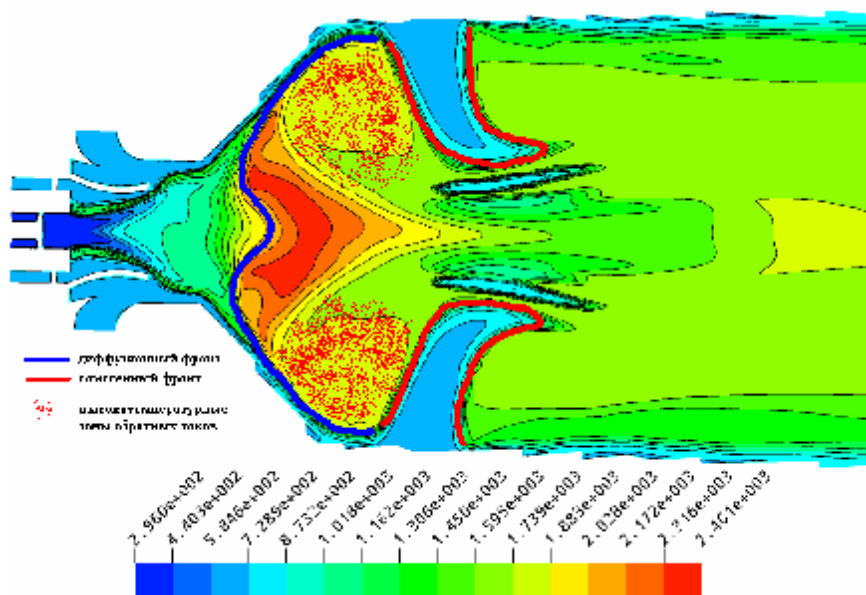


Рис. 1. Схематическое расположение фронтов пламени внутри двухзонной камеры сгорания ГТД

Таблица 1. Физический смысл функций

Функция	Член	Физический смысл
ZT	$S_L(Z, T)$	Влияние состава и температуры смеси на скорость распространения фронта пламени
	$Z_{огр}(Z)$	Пределы воспламенения смеси: концентрация топлива (богатый и бедный)
	$T_{огр}(Z, T, C)$	Пределы воспламенения смеси: температура воспламенения
C	$C_f(Z, C)$	Уменьшение скорости распространения фронта пламени вследствие присутствия продуктов сгорания
	$C_{огр}(Z, C)$	Пределы существования фронта пламени вследствие задержки воспламенения и высокой концентрации продуктов сгорания
E	$E_{огр}$	Разрушение фронта пламени вследствие влияния мелкомасштабных турбулентных вихрей

Заключение. Разработана математическая модель для моделирования явления бедного срыва пламени. Эта модель основана на принципах «флеймлет» модели горения с модифицированной формулой Зимонта для того, чтобы учесть дестабилизацию фронта пламени из-за влияния процесса турбулентности. Также предложена новая формула для расчета скорости распространения фронта пламени в ламинарном потоке. Эта формула учитывает влияние концентрационных пре-

делов воспламенения, нагрева топливовоздушной смеси, температуры воспламенения и состава частично сгоревшей смеси.

Предложенная математическая модель была применена для моделирования процесса бедного срыва в гомогенной зоне камеры сгорания газотурбинного двигателя. Результаты расчетов показали хорошее согласование с экспериментом, тем не менее требуется дальнейшее тестирование и развитие модели.

Таблица 2. Результаты расчетов

α гом. зоны	2,23	2,06	1,86
α деж. зоны, эксперимент	3,0...3,54	3,60...4,17	4,25...5,27
α деж. зоны, расчет	3,03...3,24	3,73...4,04	4,85...5,39

Список литературы

1. P. A. Libby and K. N.C. Bray. Implications of Laminar Flamelet Model in Premixed Turbulent Combustion, *Combust. Flame*, 39:33.
2. C. H. Gibson and P. A. Libby. On turbulent, flows with fast chemical reaction. Part II - the distribution of reactants and products near a reacting surface. *Combustion Science and Technology*, Vol. 6, pp. 29-35, 1972.
3. R. A. Williams. Recent advances in theoretical descriptions of turbulent diffusion flames. In S. N. B. Murthy, editor, *Turbulent Mixing in Nonreactive and Reactive Flows*, pp. 189-208, Plenum Press, New York, 1975.

4. Yu. Ya. Buriko, V.R. Kuznetsov, D. V. Volkov, S. A. Zaitsev and A. F. Uryvsky. A test of a flamelet model for turbulent nonpremixed combustion *Combustion and Flame*, Volume 96, Issues 1-2, 1994, pp. 104-120.

5. Fletcher R. S., Heywood J. B. A model for nitric oxide emissions from aircraft gas turbine engines. – AIAA Paper № 71-123.

6. N. Peters. Laminar diffusion flamelet models in non-premixed turbulent combustion, *Prog. Energy Combust. Sci.*, 1984, vol. 10, pp. 319-339.