

УДК [536. 46:533.7]:662.613.12.001.57

В.А. ЩУКИН, Ф.М. ВАЛИЕВ, О.В. ДУНАЙ*Казанский национальный исследовательский технический университет им. А.Н. Туполева
(КНИТУ-КАИ)*

ОСОБЕННОСТИ ОБРАЗОВАНИЯ ГАЗООБРАЗНЫХ ТОКСИЧНЫХ ВЕЩЕСТВ В АВИАДВИГАТЕЛЯХ ПРИ ДВУХСТАДИЙНОМ ПРОЦЕССЕ СЖИГАНИЯ ТОПЛИВА

Представлены результаты расчетной оценки образования газообразных токсичных веществ (НС, СО и NO_x) при двухстадийном процессе сжигания топлива в зависимости от доли топлива, сжигаемого в первой стадии при давлении в камере сгорания равному 10⁵ Па, температуре воздуха на входе в камеру 500 К, суммарном коэффициенте избытка воздуха равному 4,0.

Ключевые слова: горение, однородная топливовоздушная смесь, стадийное сжигание топлива, эмиссия токсичных веществ.

Опубликован ряд книг [1,2,3], где приводятся основные методы снижения эмиссии токсичных веществ, а также отдельные результаты, показывающие эффективность тех или иных методов в конкретных конструкциях камер сгорания. Эти методы следующие:

- обеднение состава смеси в зоне горения жаровой трубы;
- интенсификация процесса распыливания;
- испарение топлива и смешение с воздухом во фронтном устройстве жаровой трубы;
- предварительная подготовка горючей смеси до поступления в зону горения жаровой трубы;
- применение регулируемых по распределению воздуха и топлива конструкций камер сгорания;
- многостадийное (ступенчатое) сжигание топлива;
- многозонное сжигание топлива;
- использование рециркуляции продуктов горения;
- впрыск воды и использование добавок к топливу;
- использование каталитических поверхностей и прочее.

Несмотря на большое разнообразие методов уменьшения выбросов токсичных веществ, эффекты от внедрения этих мероприятий различны для различных токсичных компонент, зависят от конкретных условий. Проанализированные [4, 5] физико-химические закономерности выхода токсичных веществ в различных типах пламен и предложенный подход при их моделировании, позволяют количественно оценить эффективность различных методов применительно к конкретным условиям.

Для значительного уменьшения выбросов всех токсичных веществ авиадвигателями наибольший интерес представляют два метода: организация в камере сгорания сжигания предварительно подготовленной смеси бедного состава и организация многостадийного (ступенчатого) процесса сжигания.

Преимущества предварительного испарения жидкого топлива и его смешение с воздухом перед сжиганием заключаются в том, что с обеднением смеси от стехиометрии наблюдается одновременное снижение практически всех основных токсичных веществ. При этом максимальное обеднение смеси ограничено пределами стабилизации пламени и устойчивым распространением его в поток горючей смеси. Вблизи пределов распространения пламени и устойчивого горения из-за эффекта гашения пламени (прекращение реакций горения) происходит резкое увеличение выбросов несгоревших углеводородов (НС), окиси углерода (СО) и уменьшение выбросов окислов азота (NO_x). Существенное снижение выбросов НС, СО и NO_x в камерах сгорания при этом могут быть достигнуты при условии, когда время пребывания газа в зоне горения жаровой трубы достаточно для завершения процесса устойчивого горения бедной смеси, а избыточный воздух подводится всегда за пределами факела пламени и исключается эффект гашения пламени избыточным компонентом.

В этих условиях выбросы НС, СО и NO_x из камеры сгорания определяются закономерностями их выхода в пределах зоны горения предварительно подготовленных смесей и закономерностями их изменения в послепламенной области по закономерностям простой кинетики, осложненной процессом смешения

избыточным воздухом в течение времени пребывания на участке зоны смешения камеры сгорания. Подобные условия протекания процесса горения практически могут быть реализованы лишь в камере сгорания изменяемой геометрии.

Однако практическая реализация таких условий сжигания жидкого топлива требует решение ряда технических задач:

- обеспечение надлежащего предварительного испарения и смешения топлива с воздухом;
- обеспечение условий стабилизации пламени при работе камеры сгорания на различных режимах эксплуатации;
- обеспечение неизменного состава смеси в зоне горения;
- исключение эффекта гашения пламени избыточным компонентом по режимам работы двигателя и т.п.

Преимущества двухстадийного метода сжигания топлива и особенности образования HC , CO и NO_x при этом можно проиллюстрировать на примере идеализированной камеры сгорания. Расчетная схема этой камеры представлена на рис. 1.

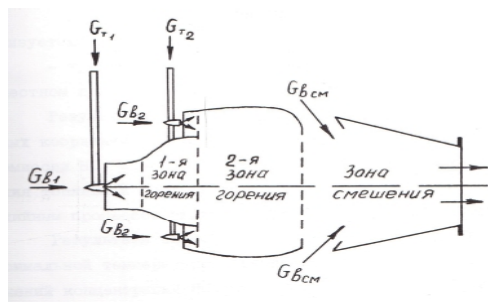


Рис. 1. Идеализированная схема камеры сгорания с двухстадийным процессом сжигания топлива

Для примера положим, что давление в камере сгорания равно 10^5 Па, температура воздуха на входе в камеру 500 К, суммарный коэффициент избытка воздуха равен 4,0. Принимаем, что общий расход топлива и общий расход воздуха поддерживается неизменным, процессы испарения и смешения топлива с воздухом протекают мгновенно, горение в 1-ой и во 2-ой стадиях реализуется в ламинарном режиме течения.

Для простоты расчетов дополнительно накладываем следующие ограничения:

- суммарный коэффициент избытка воздуха в 1-ой и во 2-ой зонах горения равен единице;
- время пребывания в 1-ой и во 2-ой зонах тождественно равно соответствующим значениям времени горения;
- на границе между 1-ой и 2-ой зонами го-

рения происходит мгновенное смешение продуктов горения 1-ой зоны с топливоздушной смесью 2-ой зоны;

- продукты горения 2-ой зоны мгновенно перемешиваются с воздухом зоны смешения и все химические реакции замораживаются.

По уравнениям кинетических кривых изменения HC , CO и NO_x в пределах зоны горения ламинарного пламени [4] были рассчитаны эмиссионные характеристики камеры сгорания в зависимости от доли топлива, сжигаемого в первой стадии

$$g_{T1} = G_{T1} / (G_{T1} + G_{T2}).$$

Расчеты выполнялись для трех характерных случаев:

- первый случай, когда горение в 1-ой стадии организуется при местном постоянном коэффициенте избытка воздуха $\alpha = 1,5$ в диапазоне $g_{T1} = 0 \dots 0,66$, а в пределах $g_{T1} = 0,66 \dots 1,0$ значение α изменяется от 1,5 до 1,0 в соответствии с ограничением стехиометричности суммарного состава в зонах горения;
- второй случай, когда горение в 1-ой и во 2-ой стадиях организуется при стехиометрическом составе смеси;
- третий случай, когда горение в 1-ой стадии организуется при местном постоянном коэффициенте избытка воздуха $\alpha = 0,6$.

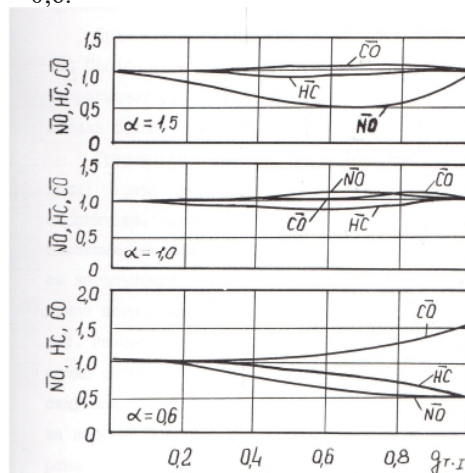


Рис. 2. Расчетные зависимости концентраций HC , CO и NO_x от доли топлива, сжигаемого в первой стадии

Результаты расчетов представлены на рис. 2 в относительных координатах, т.е. по оси ординат отложены отношения индексов эмиссии HC , CO и NO_x камеры с двухстадийным процессом сжигания топлива к соответствующим индексам эмиссии камеры сгорания с одностадийным процессом сжигания при прочих равных условиях. По оси абсцисс – доля топлива

сжигаемого в первой стадии.

Результаты расчетов свидетельствуют, что, несмотря на постоянство максимальной температуры горения, и термодинамических равновесных значений концентраций HC , CO и NO_x (при $\bar{\tau} = \infty$), стадийность сжигания топлива оказывает влияние на выбросы при малых временах пребывания (при $\bar{\tau} = 1,0$).

Характерно, что при двухстадийном процессе сжигания топлива не ожидается заметного одновременного снижения выбросов HC , CO и NO_x .

С точки зрения максимального снижения выбросов HC , CO и NO_x желательнее сжигание всего топлива в 1-ой стадии при переобогащенных составах с последующим дожиганием продуктов горения во 2-ой стадии, хотя в этих условиях возникает проблема уменьшения выбросов CO .

Сжигание топлива в 1-ой стадии при переобогащенных составах эффективно с точки зрения уменьшения выбросов NO_x , а выбросы HC , CO при этом не претерпевают заметных изменений.

В соответствии с полуэмпирическими закономерностями изменения HC , CO и NO_x стадийность сжигания топлива оказывает влияние на выбросы через кинетику, в част-

ности, посредством изменения неравновесных условий протекания реакций в пламени.

Литература

1. Канило П.М., Токсичность ГТД и перспективы использования водорода. К. Наукова думка, 1982, 140 с.
2. Образование и разложение загрязняющих веществ в пламени. Пер. с англ. Под ред. Чигир Н.А. М. Машиностроение, 1981, 407 с.
3. Христинич В.А., Тумановский А.Г. Газотурбинные двигатели и защита окружающей среды. К. Техника, 1983, 144 с.
4. Шукин В.А., Валиев Ф.М., Дунай О.В. Физико-химическая модель выхода несгоревших углеводородов из ламинарного пламени однородной смеси. Вестник КГТУ им. А.Н. Туполева, № 1, Казань, Изд-во Казан. гос. тех. ун-та, 2010 г.
5. Шукин В.А., Валиев Ф.М., Дунай О.В., Шукин Ф.В. Моделирование образования токсичных веществ в турбулентном пламени однородной смеси. Материалы VI Международной научно-технической конференции «Проблемы и перспективы развития авиации, наземного транспорта и энергетики АНТЭ-2011». Казань, Изд-во Казан. гос. техн. ун-та; т.1; 2011 г.

Поступила в редакцию 10.06.2015

В. А. Шукин, Ф. М. Валиев, О. В. Дунай. Особенности утворення газоподібних токсичних речовин в авіадвигунах при двостадійному процесі спалювання палива

Представлено результати розрахункового оцінювання утворення газоподібних токсичних речовин (HC , CO і NO_x) при двостадійному процесі спалювання палива залежно від частки палива, що спалюється в першій стадії при тиску у камері згоряння рівному 105 Па, температурі повітря на вході в камеру 500 К, сумарному коефіцієнті надлишку повітря рівному 4,0.

Ключові слова: горіння, однорідна паливоповітряна суміш, стадійне спалювання палива, емісія токсичних речовин.

V.A. Schukin, F.M. Valiyev, O.V. Dunai. Peculiarities of gaseous toxic substances formation in aircraft engines as a result of two-stage fuel burning

The main idea of the article is to provide the reader the results of estimation of gaseous toxic substances formation during two-stage process of fuel burning depending on the fraction of fuel burnt at the first stage in the combustion chamber at pressure equal to 105 Pa, combustion chamber inlet temperature of 500 K and total excess air factor equal to 4.0.

Key words: burning, uniform fuel mixture, stage fuel burning, emission of toxic substances.