

УДК 621.43.056

В.Е. КОСТЮК¹, В.Н. ГУСЕВ², А.А. КОНОПЛЕНКО¹

¹Национальный аэрокосмический университет
им. Н.Е. Жуковского «ХАИ», Харьков, Украина

²ГП «Ивченко-Прогресс», Запорожье, Украина

МЕТОДЫ РАСЧЕТА ВЫБРОСОВ ОКСИДОВ АЗОТА АВИАЦИОННЫМИ ГТД

Выполнен обзор подходов к математическому моделированию процессов в камерах сгорания авиационных газотурбинных двигателей, применяемых для прогнозирования уровней выбросов оксидов азота в окружающую среду. Рассмотрены способы нормирования и оценки уровней выбросов, основные механизмы химических реакций образования и разложения оксидов азота при горении реактивных топлив. Дана классификация математических моделей. Обоснован необходимый уровень физико-математического моделирования в зависимости от этапа разработки камер сгорания. Показаны особенности применения различных методов расчета.

газотурбинный двигатель, камера сгорания, оксиды азота, математическое моделирование

Введение

Оксиды азота, обозначаемые общей формулой NO_x , относятся к наиболее вредным примесям, поступающим в атмосферу с отработавшими газами авиационных газотурбинных двигателей (ГТД): они высоко токсичны, способствуют образованию «смога», кислотных дождей и истончению озонового слоя атмосферы.

Прогнозирование уровней выбросов NO_x на стадии проектирования позволяет существенно сократить время на изготовление и доводку принципиально новых малотоксичных конструкций камер сгорания (КС) ГТД. Обеспечение точности таких расчетов – актуальная научная задача, имеющая большое практическое значение.

Известные подходы к прогнозированию выбросов NO_x отличаются большим разнообразием, а оценки их эффективности применительно к авиационным ГТД – неоднозначностью [1 – 5].

Цель данной работы – на основе анализа современного состояния проблемы прогнозирования выбросов NO_x авиационными газотурбинными двигателями определить область применимости и приоритетные направления совершенствования различных подходов к математическому моделированию про-

цессов в КС для решения задач их разработки и модификации.

1. Нормирование и оценка выбросов

Экологическая оценка авиационных ГТД как источников загрязнения воздуха предполагает учет химического состава и количества отработавших газов, а также энергетических показателей ЛА в конкретных или осредненных условиях эксплуатации.

Украина, являясь членом Международной организации гражданской авиации (ИКАО), руководствуется нормами международного контроля за выбросами вредных веществ.

Основной нормой ИКАО является цикл «взлет – посадка». Этот цикл включает оба предельных режима работы двигателя – малый газ и взлетный режим (максимальной тяги). Первый дает основную часть выбросов продуктов недожога, второй – NO_x и дыма.

Выход вредного вещества j на каждом режиме работы двигателя оценивается индексом эмиссии EI_j , который представляет собой количество вредного вещества j в граммах, выделившегося при сгорании одного килограмма топлива.

В качестве контрольного параметра эмиссии Π_j используется отношение массы M_j вещества j в граммах, выделяющейся за стандартный цикл, к взлетной тяге двигателя $P_{взл}$ в килоньютонах.

Зная индекс эмиссии вещества EI_j на каждом режиме работы двигателя, можно вычислить массу вредного вещества, выделившегося за стандартный взлетно-посадочный цикл:

$$M_j = \sum_i (EI_j)_i G_{mi} t_i, \quad (1)$$

где G_{mi} – расход топлива в кг/с и t_i – время работы в с на каждом из i режимов стандартного цикла.

Если выразить значение G_{mi} через удельный расход топлива и тягу $G_{mi} = C_{yoi} P_i / 3600$ и разделить обе части равенства (1) на $P_{взл}$, то получим выражение параметра эмиссии в следующем виде:

$$\Pi_j = M_j / P_{взл} = 0,278 \sum_i (EI_j)_i C_{yoi} \bar{P}_i t_i. \quad (2)$$

Таким образом, величина Π_j зависит не только от совершенства КС, характеризуемого величинами EI_j , но и от значений C_{yoi} , которые характеризуют экономичность двигателя в целом и зависят от параметров его термодинамического цикла и совершенства всех узлов.

Для оксидов азота:

$$EI_{NO_x} = \frac{M_{NO_x}}{\mu} (1 + \alpha_i L_0) \kappa_{NO_x} \cdot 10^{-3}, \quad (3)$$

где $M_{NO_x} = 46,008$ – молекулярная масса NO_x ; $\mu = 29$ – молекулярная масса отработавших газов; κ_{NO_x} – концентрация NO_x в частях на миллион (ppm).

2. Механизмы образования NO

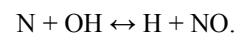
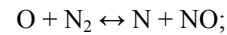
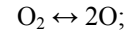
В КС авиационных ГТД возможны четыре механизма образования NO:

- через диссоциацию молекулярного кислорода при температурах выше 1800 К и взаимодействие атомов N с радикалами OH (термические NO);
- через взаимодействие азота с радикалами CH и CH_2 , образующимися при разрушении слож-

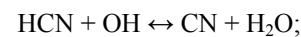
ных молекул углеводородного горючего во фронте пламени (быстрые NO);

- через реакции с образованием N_2O в качестве промежуточного соединения;
- в результате превращения NO_2 , возникшего в зоне горения, обратно в NO в послепламенной зоне.

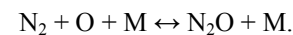
Термический механизм состоит из следующих элементарных реакций [6]:



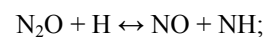
Механизм быстрого образования NO включает реакции [7]:



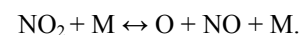
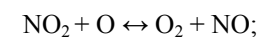
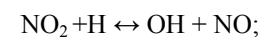
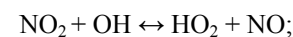
Механизм образования NO из N_2O аналогичен термическому механизму, но в присутствии третьей частицы M в реакции образуется молекула N_2O [8]:



NO образуется вследствие последующих реакций молекул N_2O с атомами O, H и молекулами CO:



Механизм образования NO из NO_2 включает реакции [9]:



3. Математические модели КС

В настоящее время отсутствует общепринятая классификация моделей КС, пригодных для расчета выбросов NO, так же как и само определение модели.

В работе [10] предложено наиболее общее определение: под моделью понимается объект любой природы, способный замещать исследуемый объект так, что его изучение дает новую информацию об этом объекте.

Будем называть моделью функциональную связь или связи между различными параметрами, характеризующими физический процесс. Эти связи могут выражаться посредством алгебраических, дифференциальных или интегральных уравнений, которые в общем случае не имеют явного решения. Моделирование можно определить как процедуру построения модели на основе экспериментальных результатов и (или) теоретических положений.

В зависимости от доли эксперимента и теории, положенных в основу модели КС, в работах [1, 2] их относят к эмпирическим, полуэмпирическим или теоретическим. Последние, в свою очередь, подразделяют на модульные и континуальные.

Эмпирические модели представляют собой корреляционные зависимости между экспериментально установленными индексами эмиссии NO_x , свойствами топлива и параметрами двигателя. Простейшие из них имеют вид линейных зависимостей, некоторые могут быть представлены в виде полиномов высоких степеней и других явных функций [11].

К полуэмпирическим относят модели, полученные на основе элементарных физических представлений, содержащие в качестве переменных режимные параметры или комбинацию режимных и конструктивных параметров [12].

В модульных моделях КС разбивается на модули (участки, зоны), в которых рассчитываются наиболее характерные для них процессы.

Многие модульные модели представляются различными комбинациями последовательно и параллельно расположенных химических реакторов того или иного типа: гомогенный (идеального смешения), проточный (идеального вытеснения) и др. [9, 13].

Континуальные модели КС широко применяются в методе вычислительной аэрогидродинамики (ВАГД) [14 – 16], использующем в качестве базовой физическую модель вязкой жидкости и ее математическую модель – систему уравнений Навье–Стокса с соответствующими краевыми условиями. К ним могут быть добавлены модели локальных явлений (химических реакций, дисперсной фазы, фазовых переходов, взаимодействия между фазами) и излучения.

Численное решение дифференциальных уравнений в частных производных осуществляется итерационно методами конечных разностей, конечных (контрольных) объемов или конечных элементов, а обыкновенных дифференциальных уравнений – методами типа Рунге-Кутты.

В работе [3] использована классификация методов, используемых при моделировании КС, с выделением интегрального, реакторного, струйного, последовательно-одномерного, сетевого, численного (ВАГД) и модульного методов.

В работе [5] предложено классифицировать модели КС по уровням сложности, традиционно применяемым для моделей ГТД.

В модели 1-го уровня сложности КС рассматривается как «черный ящик». Зависимости между входными и выходными параметрами аппроксимируются сложными функциями вида

$$Z = f(U; V),$$

где $Z = (z_1, z_2, z_3 \dots)$ – вектор основных параметров КС; U – вектор переменных параметров; V – вектор констант.

В качестве такой модели может быть использована, например, модель гомогенного реактора.

Модели 2-го уровня сложности представляют собой систему черных ящиков, каждый из которых описывает одну из основных зон КС.

В общем виде математическая модель 2-го уровня сложности запишется в виде

$$Z = f(U; X; V),$$

где $X = (x_1, x_2, x_3, \dots, x_n)$ – вектор параметров, учитывающих связь между отдельными зонами. Векторы X, V описывают каждую зону.

В моделях 3-го уровня сложности применяется квазиодномерная модель течения, где используются основные геометрические размеры проточной части. Модель в общем виде имеет вид

$$Z = f(R; U; V),$$

где $R = (r_1, r_2, r_3, \dots, r_n)$ – вектор геометрических параметров; U, V – векторы, описывающие изменение параметров по длине КС.

В целях приведения сложных моделей к более простым расчеты ведутся по упрощенным формулам. Возникающие ошибки компенсируются поправочными коэффициентами, которые уточняются при экспериментальных испытаниях.

В моделях 4-го уровня сложности используются уравнения для расчета пространственного течения, например трехмерные уравнения Навье–Стокса, позволяющие рассчитывать сложные течения с горением.

Нетрудно видеть, что рассмотренные выше классификации образуют пересекающиеся множества, в которых смысловая доминанта принадлежит эмпирическим, реакторным и континуальным (ВАГД) моделям.

Эмпирические модели фактически являются тщательно откорректированными обобщениями эксперимента, поэтому их нельзя применять для расчетов КС, значительно отличающихся от прототипов.

Реакторные модели КС практически не имеют ограничений по подробности описания химической кинетики, но используют упрощенное описание гидромеханики и теплообмена, вследствие чего требуют идентификации с данными натурного или вычислительного (методами ВАГД) эксперимента.

Современные методы ВАГД позволяют определять значения термогазодинамических и физико-

химических параметров среды практически в каждой точке объема КС с учетом турбулентного характера течения, наличия химических реакций, испаряющихся капель распыленного топлива и излучения, что открывает возможность прогнозирования эмиссионных характеристик проектируемой камеры с минимальным привлечением эмпирических данных. Недостатком континуальных моделей являются повышенные требования к вычислительным ресурсам, из-за чего, как правило, не удается включить в них сложные кинетические схемы.

В связи с этим находит применение «гибридный» метод расчета выбросов NO_x [9, 13], при котором результаты предварительного континуального моделирования КС в упрощенной постановке (поле течения, поле температуры, форма зоны реакции) затем используются для разработки подробной реакторной модели КС.

Заключение

1. Эмпирические методы расчета выбросов NO_x надежны только для экспериментально изученной совокупности условий. Область применения этих методов – этап формирования облика КС, незначительно отличающейся от прототипа, а также анализ рабочего процесса двигателя в целом.

2. Теоретические методы применимы для расчетов выбросов NO_x в широком диапазоне режимов работы и геометрии КС, поэтому они могут использоваться на всех этапах ее проектирования. В то же время они требуют значительных затрат времени на разработку и освоение соответствующего программного обеспечения.

3. Реакторные модели целесообразно использовать для детального исследования процессов образования NO_x , особенно в конструкциях, для которых имеется мало предыдущего опыта.

4. Применение континуальных моделей требует подробного описания геометрии и значительных

вычислительных ресурсов, поэтому расчет выбросов NO_x методами ВАГД целесообразен на этапах окончательного проектирования и доводки КС.

Литература

1. Меллор А.М. Загрязнение атмосферы газотурбинными двигателями // Образование и разложение загрязняющих веществ в пламени. – М.: Машиностроение, 1981. – С. 217-260.

2. Лефевр А. Процессы в камерах сгорания ГТД. – М.: Мир, 1986. – 566 с.

3. Харитонов В.Ф. Методы, используемые при моделировании камер сгорания ГТД // Изв. вузов. Авиационная техника. – 2001. – № 3. – С. 23-25.

4. Постников А.М. Снижение оксидов азота в выхлопных газах ГТУ. – Самара: Самарский НЦ РАН, 2002. – 286 с.

5. Мингазов Б.Г. Камеры сгорания газотурбинных двигателей. – Казань: Казан. гос. техн. ун-т, 2004. – 220 с.

6. Correa S.M. A review of NO_x formation under gas-turbine combustion conditions // Comb. Sci. Technol., 1992.

7. Fenimore C.P. Studies of fuel-nitrogen in rich flame gases // 17th Symp. (Int.) Combustion: The Combustion Institute. Pittsburg, 1979.

8. Wolfram J. Bildung von Stickstoffoxiden bei der Verbrennung // Chemie-Ingenieur-Technik, 1972.

9. Возможности применения детальной кинетики химических реакций для анализа рабочего процесса в камерах сгорания ГТУ / П.А. Бухштаб, В.М. Захаров, Р.С. Кашапов [и др.] // Первый межведом. науч.-техн. семинар по проблемам низкоэмиссионных камер сгорания газотурбинных установок «Опыт разработки, проблемы создания и перспективы развития низкоэмиссионных камер сгорания ГТУ»: Тез докл. (14-16 дек., 2004). – М.: ЦИАМ, 2004.

10. Тунаков А.П. Методы оптимизации при доводке и проектировании газотурбинных двигателей. – М.: Машиностроение, 1979. – 181 с.

11. Correlations adaptation for optimal emissions prediction / A. Tsalavoutas, N. Thoma, K. Mathioudakis [et al.] // Proceedings of ASME TurboExpo 2007. Montreal. (May 14-17, 2007) (GT2007-27060). – 11 pp.

12. Математическая модель процессов образования и расчета загрязняющих веществ и оптимизация камер сгорания ГТД / А.А. Саркисов, О.А. Рудаков, Н.Д. Саливон [и др.] // Теплоэнергетика. 2000. – № 5. – С. 52-55.

13. Micro Gas Turbine Combustor Emissions Evaluation Using the Chemical Reactor Modelling Approach / C. Russo, G. Mori, V.V. Anisimov [et al.] // Proceedings of ASME Turbo Expo 2007. Montreal. (May 14-17, 2007) (GT2007-27687). – 12 pp.

14. Куценко Ю.Г. Применение численных методов газовой динамики для расчета камеры сгорания газотурбинного двигателя ПС-90А // Изв. вузов. Авиационная техника. – 2004. – № 3. – С. 67-71.

15. Кобзарь С.Г., Халатов А.А. Апробация упрощенной модели расчета горения и формирования оксидов азота при сжигании жидкого топлива // Пром. теплотехника. – 2006. – № 3. – С. 62-69.

16. Сербин С.И., Мостипаненко А.Б. Исследование механизмов образования оксида азота в камере сгорания газотурбинной установки типа «Водолей» // Авиационно-космическая техника и технология. – 2006. – № 7 (33). – С. 93-97.

Поступила в редакцию 30.05.2008

Рецензент: д-р техн. наук, проф. П.М. Канило, Институт проблем машиностроения им. А.Н. Подгорного НАН Украины, Харьков.