

А.И. Запорожец О.И. Чумак, А.С. Якушенко, В.Н. Охмакевич

**ИСПОЛЬЗОВАНИЕ МАТЕМАТИЧЕСКОЙ МОДЕЛИ  
РАБОЧЕГО ПРОЦЕССА ГАЗОТУРБИННЫХ ДВИГАТЕЛЕЙ  
ПРИ РАСЧЕТЕ ИХ ЭМИССИОННЫХ ХАРАКТЕРИСТИК**

*Рассмотрены методы получения эмиссионных характеристик авиационных газотурбинных двигателей. Описана методика проведения численного эксперимента, позволяющая учесть влияние производственно-технологических и эксплуатационных факторов на эмиссионные характеристики двигателя. Приведены полученные в результате эксперимента эмиссионные характеристики двигателя ПС-90А.*

Одной из важных задач, возникающих при разработке и эксплуатации авиационного газотурбинного двигателя (ГТД), является определение его эмиссионных характеристик. Для решения этой задачи используются два взаимно дополняющих друг друга подхода.

Первый подход предусматривает определение эмиссионных характеристик двигателя в результате натурных и стендовых испытаний ГТД в различных условиях и на различных режимах работы. К недостаткам данного подхода относятся его трудоемкость, проблемы, возникающие при реализации экстремальных условий работы ГТД, и высокая себестоимость проведения испытаний. Для реализации данного подхода необходимо наличие специально оборудованных испытательных комплексов.

Второй подход предполагает использование расчетных методов определения эмиссионных характеристик, позволяющих при сравнительно небольшом объеме экспериментальных данных определять эмиссионные характеристики любого двигателя данного типа в широком диапазоне режимов и условий эксплуатации [1, 2]. При этом рассчитываемая эмиссионная характеристика может быть представлена как функция трех векторов:

$$\bar{E}_x = f(\bar{x}_1, \bar{x}_2, \bar{x}_3), \quad (1)$$

где  $\bar{x}_1$  - вектор параметров, определяемых функциональными характеристиками элементов проточной части среднестатистического ГТД данного типа;  $\bar{x}_2$  - вектор параметров рабочего процесса конкретного двигателя на рассматриваемом режиме;  $\bar{x}_3$  - вектор параметров, определяемых факторами, которые оказывают минимальное влияние на рабочий процесс двигателя, но изменяют его эмиссионные характеристики (содержание примесей в топливе, использование "бездымной" камеры сгорания и т.д.).

Выбор и уточнение зависимости (1) для конкретного типа двигателя осуществляется на основании анализа результатов испытаний ГТД. При практической реализации зависимостей (1) возникает необходимость в определении значений компонент вектора  $\bar{x}_2$ . Для этого используется математическая модель рабочего процесса (ММРП) двигателя, которая позволяет по заданным режимным параметрам его функционирования определять необходимые параметры рабочего процесса в рассматриваемом диапазоне внешних условий и режимов эксплуатации двигателя.

Для решения поставленной задачи наиболее подходит поэлементная имитационная ММРП ГТД, описывающая рабочий процесс в основных элементах его проточной части. Данный тип математической модели можно разделить на три уровня сложности по степени отображения связей, существующих между параметрами объекта [3, 4]:

- первый уровень, когда используется формальное описание ГТД в целом без привлечения каких-либо уравнений и взаимосвязей, основанных на физических представлениях (при этом ГТД рассматривается как "черный ящик");

- второй уровень, когда математические модели узлов ГТД представлены формальным описанием их характеристик и не раскрывают процессов, протекающих в отдельных элементах;

- третий уровень, когда математические модели узлов детализированы по отдельным элементам, например, по ступеням или отдельным лопаточным венцам компрессора и турбины.

Кроме того, ММРП может описывать процесс функционирования двигателя на стационарных и переходных режимах. Выбор уровня сложности ММРП определяется задачами исследования.

На рис. 1 показана схема расчета значений индексов эмиссии вредных веществ с помощью ММРП второго уровня сложности, которая описывает процесс установившегося функционирования ГТД.

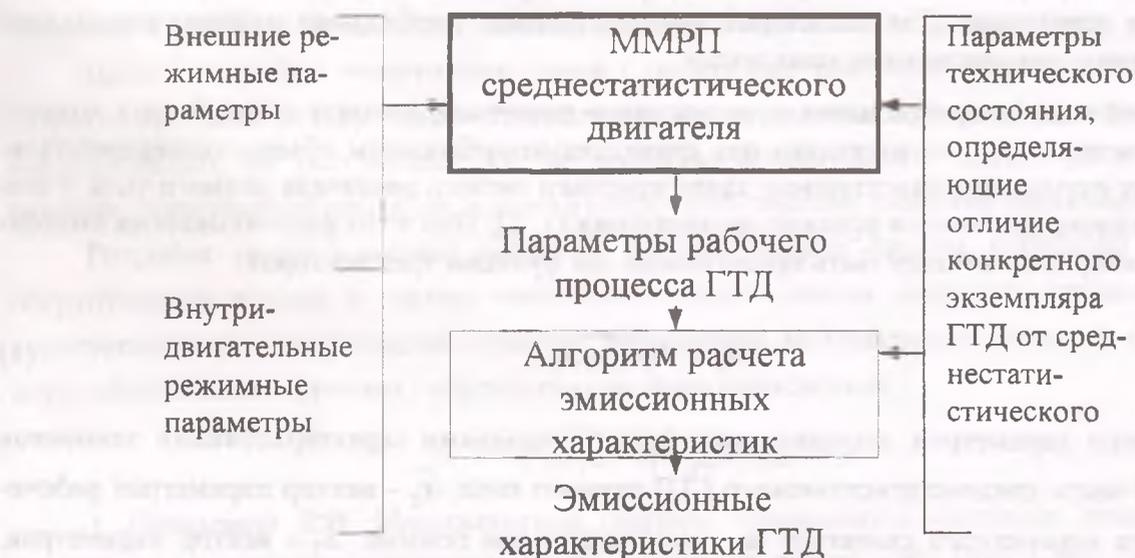


Рис. 1. Схема расчета эмиссионных характеристик ГТД

В качестве внешних факторов, оказывающих влияние на рабочий процесс ГТД, могут выступать параметры воздуха на входе в двигатель, отбор мощности и рабочего тела на внешние нужды (в систему кондиционирования воздушного судна, на работу гидронасосов) фракционный состав топлива.

Набор внутридвигательных режимных параметров, определяющих режим работы ГТД зависит от схемы двигателя, задач исследования и особенностей построения используемой ММРП. В качестве таких параметров могут использоваться частоты вращения роторов, рас

ход топлива, параметры рабочего тела в различных сечениях проточной части, углы установки винтов в турбовинтовых двигателях и т.д.

Набор параметров, определяющих отличие конкретного экземпляра ГТД от среднестатистического, зависит от функциональных характеристик основных элементов проточной части двигателя и характера влияния на них индивидуальных особенностей двигателя. Так, в работе [5] использован набор параметров, являющихся масштабными коэффициентами при соответствующих двухмерных функциональных характеристиках элементов проточной части ГТД.

В качестве примера использования рассмотренного подхода для двигателя ПС-90А был выполнен расчет величины относительного индекса эмиссии  $EI_{NOx}/EI_{NOx}^B$  ( $EI_{NOx}$  - значение индекса эмиссии окислов азота конкретного экземпляра двигателя на рассматриваемом режиме;  $EI_{NOx}^B$  - значение индекса эмиссии среднестатистического двигателя при работе на базовом режиме). При этом была использована зависимость [2]

$$\frac{EI_{NOx}}{EI_{NOx}^B} = \sqrt{\frac{p}{p^B}} \frac{\alpha^B}{\alpha} \exp \left[ \frac{T - T^B}{a} - \frac{h^B - h}{b} \right], \quad (2)$$

где  $p$  - давление воздуха на входе в камеру сгорания;  $\alpha$  - коэффициент избытка воздуха в камере сгорания;  $T$  - температура воздуха на входе в камеру сгорания;  $a$ ,  $b$  - эмпирические константы;  $h$  - влажность воздуха на входе в ГТД; индекс "Б" - базовый режим.

В качестве базового был принят режим работы среднестатистического двигателя ПС-90А на взлетном режиме при стандартных атмосферных условиях. При этом температура  $T^B = 830$  К,  $p^B = 30,8$  МПа,  $\alpha^B = 2,472$ .

При расчете компонент вектора  $\bar{x}_2$ , входящих в качестве аргументов в зависимость (2), была использована нелинейная, второго уровня сложности модель установившегося функционирования двигателя ПС-90А. При моделировании рабочего процесса ГТД в качестве параметров, определяющих смещение функциональных характеристик основных элементов проточной части относительно соответствующих характеристик среднестатистического двигателя, используется набор из 41 коэффициента (параметра состояния ММРП). Единичные значения параметров состояния отвечают техническому состоянию проточной части среднестатистического двигателя.

Внешними режимными параметрами данной ММРП являются параметры атмосферного воздуха, скорость полета воздушного судна, величины отборов от двигателя воздуха и механической энергии на потребности самолета. В качестве внутреннего режимного параметра может выступать любой из моделируемых параметров функционирования ГТД (в ходе расчетов в качестве такого параметра использовалась тяга двигателя).

Основу вычислительного процесса модели составляет итерационная процедура решения по методу Ньютона системы нелинейных уравнений относительно восьми параметров, задающих рабочий процесс основных элементов проточной части ГТД.

По описанной методике был выполнен расчет зависимостей величины  $EI_{NOx}/EI_{NOx}^B$  от тяги ГТД и температуры атмосферного воздуха  $T_{вх}$  на его входе.

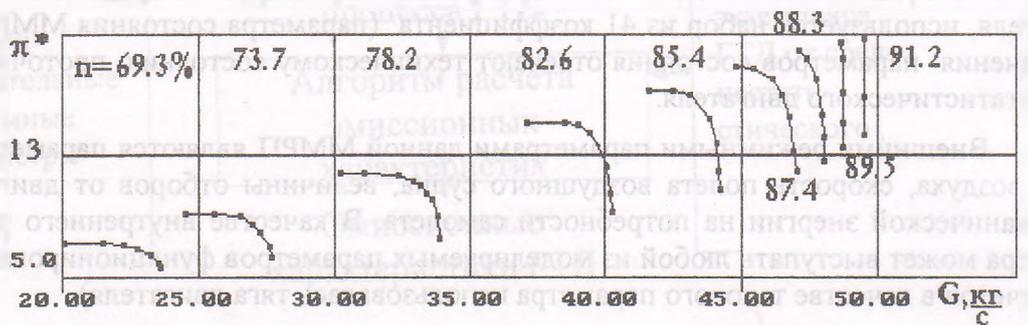
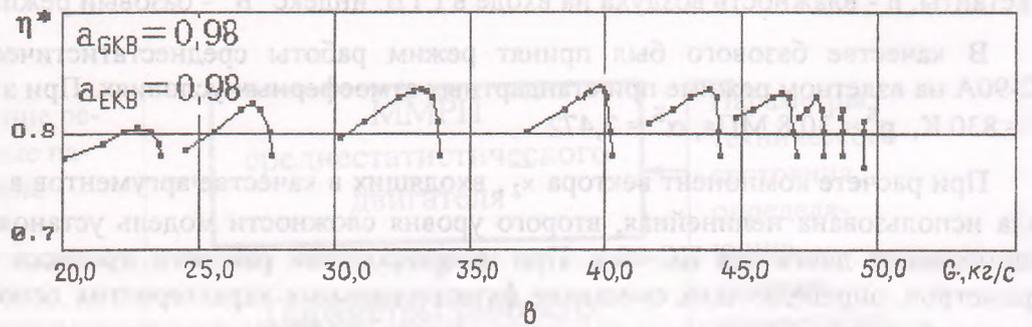
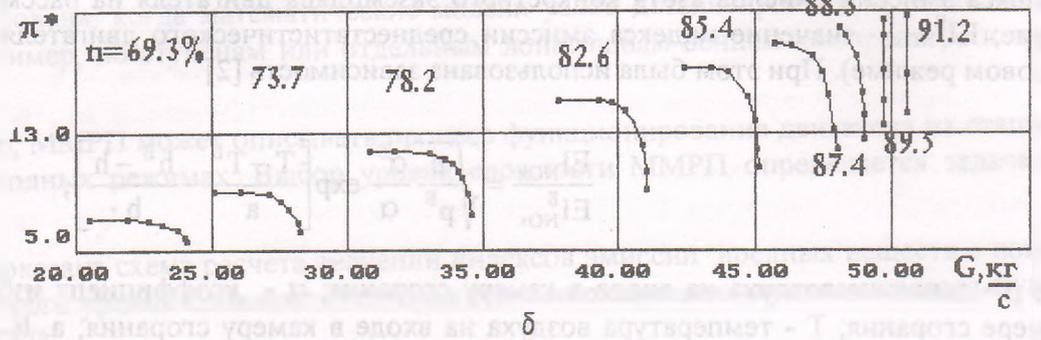
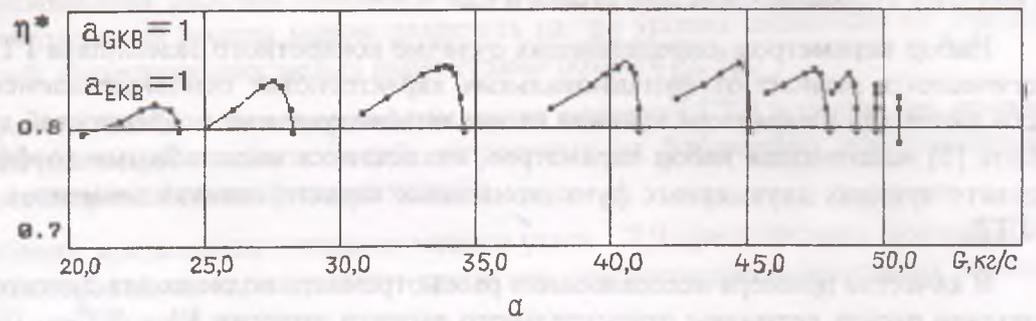


Рис.2. Функциональные характеристики каскада КВД среднестатистического двигателя ПС-90А (а, б) и двигателя с загрязненным КВД (в,г):  $n$  - приведенная частота вращения КВД

Зависимость величины  $EI_{NOx}/EI_{NOx}^B$  от тяги ГТД рассчитана для среднестатистического двигателя ПС-90А и для двигателя с загрязненными лопатками компрессора высокого давления (КВД). В последнем случае моделировалось изменение двухмерных функциональных характеристик рассматриваемого каскада путем введения в ММРП двигателя масштабных коэффициентов при функциональной характеристике КВД: масштаб расхода  $a_{ГКВ}$  и коэффициента полезного действия  $a_{ЕКВ}$ . Зависимость коэффициента полезного действия каскада по параметрам торможения  $\eta^*$ , расхода воздуха через КВД  $G$  показана на рис. 2, а, б, зависимость степени повышения давления торможения  $\pi^*$  от расхода воздуха через КВД  $G$  показана на рис. 2, б, г.

Зависимость величины  $EI_{NOx}/EI_{NOx}^B$  от температуры на входе в двигатель  $T_{ВХ}$  была рассчитана для среднестатистического двигателя на различных барометрических высотах.

Полученные в результате расчета эмиссионные характеристики двигателя показаны на рис. 3, 4.

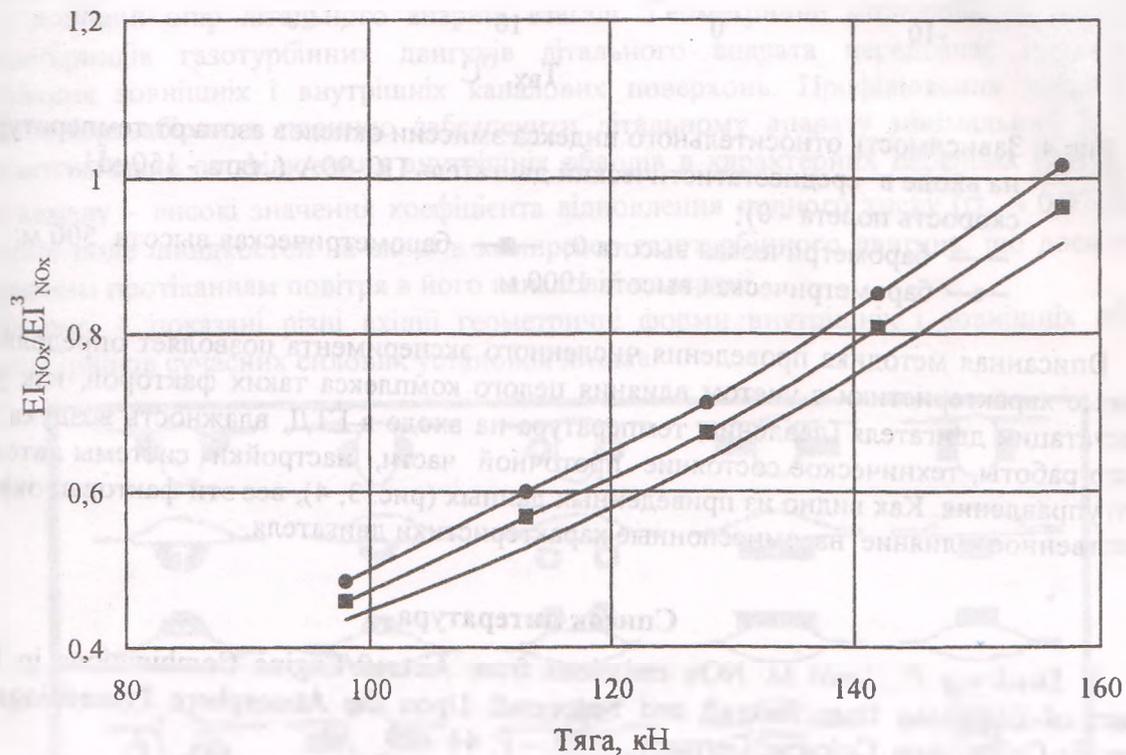


Рис. 3. Зависимость относительного индекса эмиссии окислов азота от тяги двигателя ПС-90А (стандартные атмосферные условия):

- среднестатистический ГТД;
- деградация КВД ( $a_{ГКВ}=0,98$ ,  $a_{ЕКВ}=0,98$ );
- деградация КВД ( $a_{ГКВ}=0,96$ ,  $a_{ЕКВ}=0,96$ )

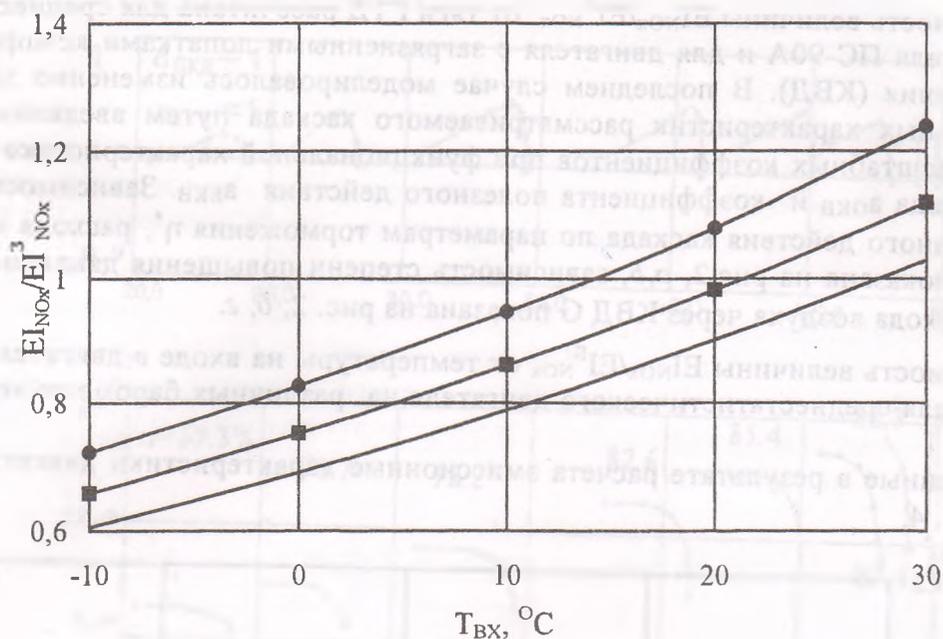


Рис.4. Залежність відносного індекса емісії окислів азота від температури на вході в середнестатистичний двигун ПС-90А ( тяга - 150 кН, швидкість польоту - 0):

— барометрична висота 0; —■— барометрична висота 500 м;  
—●— барометрична висота 1000 м

Описана методика проведення чисельного експерименту дозволяє визначати емісійні характеристики з урахуванням впливу цілого комплексу таких факторів, як умови експлуатації двигуна (тиск, температура на вході в ГТД, вологість повітря), режими його роботи, технічний стан проточної частини, налаштування системи автоматичного управління. Як видно з наведених даних (рис. 3, 4), всі ці фактори мають суттєвий вплив на емісійні характеристики двигуна.

#### Список літератури

1. *Deidewig F., Ledit M.* NO<sub>x</sub> emissions from Aircraft/Engine Combinations in Flight // Impact of Emissions from Aircraft and Spacecraft Upon the Atmosphere Proceedings of Int. Scientific Colloquium, Cologne, Germany, 1994. – P. 44 – 49.
2. *Руководство по расчету факторов неблагоприятного воздействия воздушных судов ГА на окружающую среду.* – М.: МГА, 1986. – 244 с.
3. *Тунаков А.П.* Методи оптимізації при доводці та проектуванні газотурбінних двигунів. – М.: Машинобудування, 1979. – 184 с.
4. *Математичне моделювання експлуатаційних характеристик газотурбінних двигунів / А.П. Тунаков, Э.В. Мац, В.И. Орланов и др.* – К: КИИГА, 1989. – 148 с.
5. *Игнатович С.Р., Якушенко А.С.* Использование математической модели рабочего процесса ГТД при прогнозировании его остаточного ресурса // Прогресс – технология – качество: Тр. Второго конгресса двигателестроителей Украины: ИМиС, 1997. – С. 279 – 281.

Стаття надійшла до редакції 3 квітня 2000 року.