

УДК 621.45.034

DOI: 10.15593/2224-9982/2022.70.02

**Ю.Б. Александров<sup>1</sup>, М.Ю. Вовк<sup>2</sup>, Б.Г. Мингазов<sup>1</sup>**<sup>1</sup>Казанский национальный исследовательский  
технический университет имени А.Н. Туполева – КАИ, Казань, Россия<sup>2</sup>Опытно-конструкторское бюро имени А. Люльки, Москва, Россия

## **ИССЛЕДОВАНИЕ ЭМИССИИ NO<sub>x</sub> В КАМЕРАХ СГОРАНИЯ НА ОСНОВЕ МНОГОУРОВНЕВОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ**

Рассматривается аналитический метод оптимизации характеристик камеры сгорания газотурбинного двигателя по эмиссионным характеристикам. В основе методики лежит определение качества смешения газо-воздушной смеси, что дает представление о смесеобразовании в области жаровой трубы. Качество подготовки смеси определяет полноту сгорания и температуру горения, что, в свою очередь, влияет на эмиссионные характеристики. Предложенный метод сопоставляется с численными расчетами тестовой камеры сгорания и экспериментальными данными. Численная трехмерная модель предусматривает расчет одного сектора камеры сгорания, содержащего одну жаровую трубу трубчато-кольцевого типа с концентрично установленным двухрядным завихрителем. Сеточная модель была выбрана по результатам расчета из нескольких вариантов по условию сеточной независимости выбранных для анализа параметров. В расчете учитывались эффекты турбулентности, химического взаимодействия топлива с воздухом, поступающего от компрессора двигателя. Для достоверности распределения температуры в области жаровой трубы производился расчет с учетом модели лучистого теплообмена. Произведено сравнение полученных результатов численного расчета в трехмерной постановке с расчетами по аналитической модели для различных углов установки лопаточного завихрителя, которое показало хорошее сопоставление и возможность применения методики для прогнозирования рабочих характеристик камер сгорания.

**Ключевые слова:** газотурбинный двигатель, камера сгорания, смешение, процесс горения, полнота сгорания, эмиссионные характеристики, аналитический расчет, численное моделирование, лопаточный завихритель.

**Yu.B. Aleksandrov<sup>1</sup>, M.Yu. Vovk<sup>2</sup>, B.G. Mingazov<sup>1</sup>**<sup>1</sup>Kazan National Research Technical University named  
after A.N. Tupolev – KAI, Kazan, Russian Federation<sup>2</sup> Experimental Design Bureau named after A. Lyulka, Moscow, Russian Federation

## **INVESTIGATION OF NO<sub>x</sub> EMISSION IN COMBUSTION CHAMBERS ON THE BASIS OF MULTILEVEL MODELING**

The paper considers an analytical method for optimizing the characteristics of the combustion chamber of a gas turbine engine by emission characteristics. The methodology is based on determining the quality of mixing of the gas-air mixture, which gives an idea of the mixture formation in the flame tube area. The quality of the mixture preparation determines the completeness of combustion and the combustion temperature, which in turn affects the emission characteristics. The proposed method is compared with numerical calculations of the test combustion chamber and experimental data. The numerical three-dimensional model provides for the calculation of one sector of the combustion chamber, containing one flame tube of a tubular-annular type with a concentrically mounted double-row swirler. The grid model was chosen based on the calculation results from several options under the condition of grid independence of the parameters selected for analysis. The calculation took into account the effects of turbulence, the chemical interaction of fuel with air coming from the engine compressor. For the reliability of the temperature distribution in the flame tube area, the calculation was carried out taking into account the radiant heat transfer model. A comparison of the results of a numerical calculation in a three-dimensional formulation with calculations using an analytical model for various blade swirler installation angles was made, which showed a good comparison and the possibility of using the technique to predict the performance characteristics of combustion chambers.

**Keywords:** gas turbine engine, combustion chamber, mixing, combustion process, combustion efficiency, emission characteristics, analytical calculation, numerical simulation, swirler blade.

Камера сгорания (КС) является основной частью авиационного газотурбинного двигателя (ГТД) или энергетической установки, созданной на его основе. От правильности проектирования КС зависит эффективность всей установки, а также ее экологические характеристики. Для

проектирования и доводки КС в последние годы стали широко применяться различные методы автоматизированного проектирования. Автоматизация проектирования и доводки двигателя невозможна без формализованного описания, т.е. моделирования, различных процессов, протекающих в отдельных его узлах, что, в свою очередь, требует пристального изучения всех явлений, обуславливающих эти процессы. Для понимания физических основ процессов горения и успешного применения их на практике необходимо рассмотрение основы химической кинетики, распространения пламени в потоке, закономерностей протекания основных характеристик КС и возможности их моделирования. Развитие общей теории может привести в перспективе к адекватным моделям, которые позволят конструкторам решать текущие задачи, однако ясно, что полученные на основе оценок рекомендации при создании КС необходимо проверять на основе экспериментальных испытаний. Таким образом, разработка новых методик определения основных характеристик, в том числе эмиссии вредных веществ, является весьма актуальной задачей, требующей неотложного решения.

### Цель исследования

1. Изучение влияния качества смешения газозвушной смеси на выбросы  $\text{NO}_x$  с выработкой методики, описывающей последовательность расчетов и мероприятий по доводке камеры сгорания.
2. Версификация методики с помощью численных методов и имеющихся экспериментальных данных

### Аналитический расчет выбросов из камеры сгорания

При анализе данных по уровням выбросов  $\text{NO}_x$  и  $\text{CO}$  для различных типов камер с разными схемами подготовки смеси установлено, что эмиссия  $\text{NO}_x$  зависит от неоднородности сжигаемой смеси. На рис. 1 приведены зависимости  $\text{NO}_x = f(\alpha)$  для неоднородных и однородных смесей при горении [1]. Видно, что для каждой кривой существует некоторое максимальное значение эмиссии  $\text{NO}_x$ , причем для неоднородных смесей имеет место более пологое протекание графика по сравнению с кривой для однородных смесей.

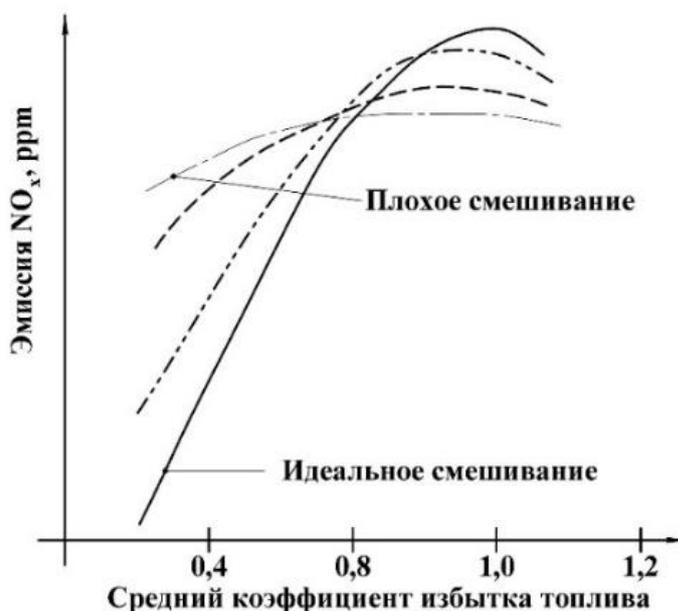


Рис. 1. Влияние неоднородности на эмиссию  $\text{NO}$

Неоднородность смеси в КС определяется качеством смешения. Смешение в КС условно можно разделить на две составляющие: а) смешение первичного воздуха, поступающего через фронтное устройство и участвующего в процессе горения, б) смешение вторичного воздуха, поступающего через отверстия в стенках жаровой трубы. В основе всех этих процессов лежат фундаментальные законы массообмена. В работах [2–4] содержатся подходы для описания смешения на основе турбулентного массообмена, которые послужили основой разработанной авторами методики. В первом случае для описания смешения газозвушной смеси от лопаточного завихрителя использовалось решение уравнения [5] для случая истечения газа из кольцевого источника в трубе с использованием функции Бесселя нулевого порядка и безразмерного параметра, учитывающего влияние диффузии. Коэффициент турбулентной диффузии  $D_T$  для закрученного потока определялся по материалам [6].

Во втором случае рассмотрение смешения от вторичного воздуха, поступающего через отверстия в жаровой трубе, сводилось к определению эффекта экранирования от втекающих струй воздуха. Для верификации предложенных подходов для расчета смешения в КС использовались разработанные экспериментальные установки, полученные результаты описаны в работах [7–8].

Смешение в КС оценивалось по следующей зависимости:

$$m_{T,i} = A_1 \frac{T_3}{T_3} \frac{R_B}{R_T} \frac{1}{\theta^{0.5}} \frac{W_3}{W_3} \frac{\exp K_X}{K_X} \frac{\Delta F_i(x)}{F_\Sigma},$$

где  $A_1$  – экспериментальный коэффициент, справедливый для завихрителей, применяемых в исследовании;  $T_3$ ,  $W_3$  – температура и скорость эжектируемого воздуха;  $T_3$ ,  $W_3$  – температура и скорость струи из завихрителя  $K_X$  – безразмерный параметр;  $F_\Sigma$  – площадь всех отверстий в жаровой трубе;  $F_i(x)$  – площадь одного  $i$  пояса отверстий, который находится на расстоянии  $x_i$  от фронтного устройства КС.

Также от качества смешения зависят состав смеси в зоне горения и соответственно полнота сгорания [9]. Полнота сгорания в КС определялась по зависимости, полученной на основе теории сгорания смеси  $l_i$  в турбулентном потоке с пульсационной скоростью  $W'$ , интенсивностью турбулентности  $\varepsilon$  и нормальной скоростью горения  $U_H$  на участке  $\Delta x$ :

$$\eta_\Gamma = \frac{3U_{T_0}^3}{W'^3} \left\{ \frac{1}{3} \left[ 1 - \exp\left(-\frac{3\Delta x \cdot \varepsilon}{l_i}\right) \right] - \frac{U_H}{U_{T_0}} \left[ 1 - \exp\left(-\frac{2\Delta x \cdot \varepsilon}{l_i}\right) \right] + \frac{U_H^2}{U_{T_0}^2} \left[ \left( 1 - \exp\left(-\frac{\Delta x \cdot \varepsilon}{l_i}\right) \right) \right] \right\},$$

где  $U_{T_0} = U_H + W'$  – скорость распространения пламени в турбулентном потоке.

Средняя температура газа в зоне горения определялась по тепловому балансу.

$$T_{3,\Gamma} = T_K^* + \frac{\eta_\Gamma \cdot Hu}{c_{p\Gamma} \cdot (1 + \alpha_{3,\Gamma} L_0)},$$

где  $T_K^*$  – температура газа за компрессором;  $c_{p\Gamma}$  – удельная теплоёмкость газа;  $Hu$  – теплотворная способность;  $\alpha_{3,\Gamma}$  – коэффициент избытка воздуха;  $L_0$  – стехиометрический коэффициент;  $\eta_\Gamma$  – полнота сгорания в зоне горения.

Выбросы NO<sub>x</sub>, %, определялись по упрощенной формуле Зельдовича.

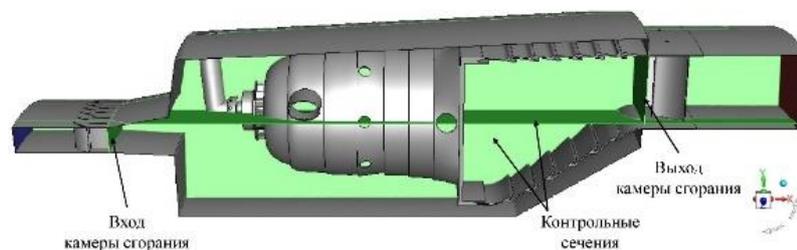
$$NO_x = 37 \cdot 10^{11} \cdot \sqrt{O_2} \cdot N_2 \cdot e^{-\frac{65000}{T_{3,\Gamma}}} \cdot \sqrt{\frac{P_0}{T_{3,\Gamma}}} \cdot t,$$

где  $t$  – время пребывания газа в зоне горения, NO<sub>x</sub>;  $N_2$  и  $O_2$  – мгновенные концентрации компонентов газовой смеси.

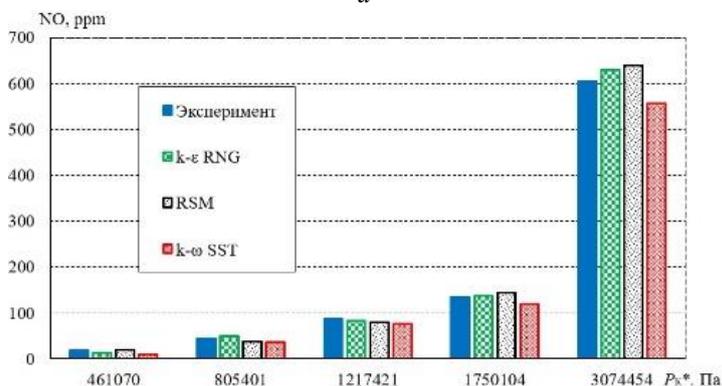
### Верификация метода на основе численного моделирования

Проверка работоспособности разработанной методики проводилась на численной трехмерной модели камеры сгорания двигателя ПС-90А. Моделировался один сектор камеры сгорания, содержащий одну жаровую трубу трубчато-кольцевого типа с концентрично установленным двухрядным завихрителем (рис. 2, а). Сеточная модель была выбрана по результатам расчета из нескольких вариантов по условию сеточной независимости выбранных параметров. Количество элементов для одного расчетного сектора составляло 34,2 млн [10].

Для расчета горения жидкого топлива было выбрано газофазное приближение (стационарное) ввиду того, что в современных камерах сгорания с высокими давлениями за компрессором преобладают высокие температуры воздуха на входе в КС, которые практически мгновенно испаряют жидкое топливо. Это упрощение позволяет сильно сэкономить на времени по сравнению с нестационарным, который учитывает распыл и испарения жидкого топлива. К тому же стационарный расчет имеет наилучшее соответствие с экспериментальными результатами замеров температур.



а



б

Рис. 2. Численное моделирование: а – трехмерная численная модель трубчато-кольцевой камеры сгорания; б – сравнение результата расчетов выбросы NO при использовании различных моделей турбулентности с экспериментальными данными

Влияние выбора модели турбулентности для расчета выброса NO. На рис. 2, б представлено сравнение данных эксперимента с результатами расчетов, проведенных для камер сгорания ПС-90А при пяти различных режимах работы двигателя с использованием моделей  $k-\varepsilon$  RNG, RSM,  $k-\omega$  SST. На режимах с высокими давлениями от компрессора наблюдается хорошее совпадение – отличие не превышает 8,1 % для всех моделей турбулентности, наихудшие показатели по NO прогнозируются моделью  $k-\omega$  SST. Модель турбулентности  $k-\varepsilon$  RNG прогнозирует наилучшее совпадение, с погрешностью не более 7 % для различных режимов работы двигателя. При режимах с низким значением давления от компрессора  $P_K^* = 461\,070$  Па наблюдается бедный состав смеси с  $\alpha = 6,19$  и лучшим образом прогнозируются выбросы NO с использованием RSM модели турбулентности.

Также по итогам предварительных расчетов и сопоставлений с экспериментальными данными выбраны: модель горения – модель ламинарных микропламён для неперемешанной смеси Flamelet (LF), где в качестве набора химических реакций для окисления керосина использовался химический механизм Jet-A (17 компонентов смеси:  $\text{H}_2$ ,  $\text{H}$ ,  $\text{O}$ ,  $\text{O}_2$ ,  $\text{OH}$ ,  $\text{NO}_2$ ,  $\text{C}$ ,  $\text{CH}$ ,  $\text{CO}$ ,  $\text{CO}_2$ ,  $\text{C}_2\text{H}_2$ ,  $\text{C}_{12}\text{H}_{23}$ ,  $\text{N}$ ,  $\text{NH}$ ,  $\text{NO}$ ,  $\text{H}_2\text{O}$ ,  $\text{N}_2$  и 28 химических реакций их взаимодействия); по рекомендациям работы [11] излучение в жаровой трубе рассчитывалось по модели дискретных ординат, с учетом сопряжённого теплообмена между продуктами горения и стенками жаровой трубы.

Многие авторы подходят к рассмотрению структуры потока и смешению в области закрученного течения с позиции численного расчета [12–14]. Однако сам по себе численный расчет, не подтверждённый экспериментальными данными, является не всегда достоверным. С целью верификации расчетных зависимостей проводилось сопоставление с экспериментальными данными для различных режимов работы двигателя, приведённые на рис. 3. Геометрические и режимные характеристики КС двигателя ПС-90А были взяты из [15].

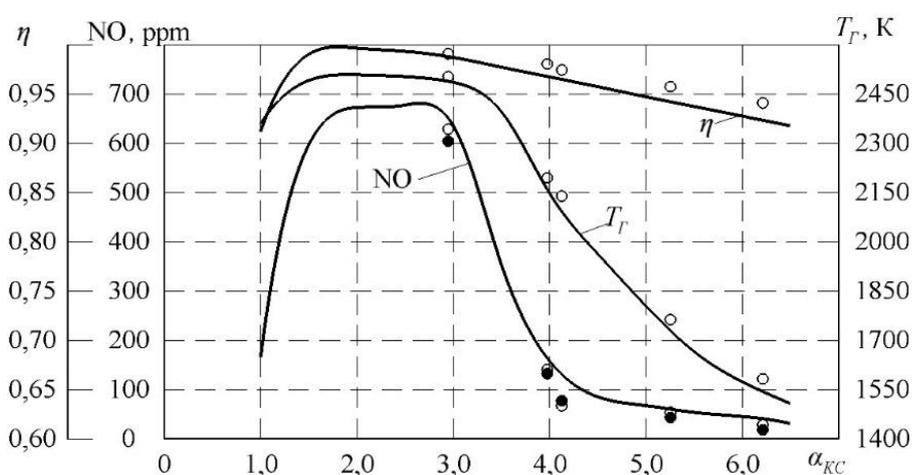


Рис. 3. Сравнение результата расчетов выбросы  $\text{NO}$  при использовании численного трехмерного и аналитического расчета с экспериментальными данными [16], где ● – эксперимент; ○ – численный трехмерный расчет; — – аналитический расчет по одномерной модели

Исследование влияния степени смешения на выбросы  $\text{NO}$  камеры сгорания проводилось на трех численных моделях с вариантами завихрителей, имеющих угол установки лопаток  $\varphi = 30^\circ$ ;  $45^\circ$ ;  $60^\circ$  (рис. 4).

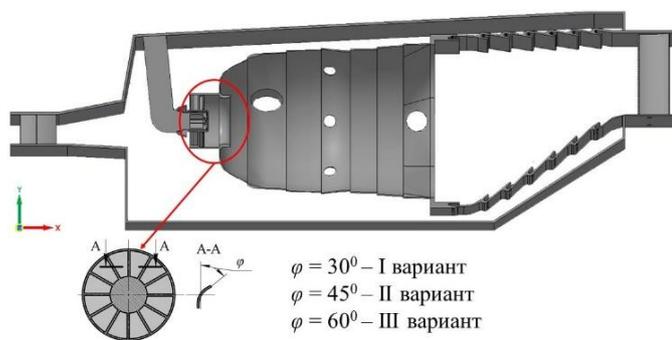


Рис. 4. Варианты расчетов при различной степени смешения за фронтным устройством

Из результатов расчета, представленных на рис. 4, видно, что угол крутки потока в завихрителе фронтного устройства оказывает влияние на формирование температурного поля в

зоне смешения. Очевидно, это происходит вследствие влияния закрутки на смешение топливо-воздушной смеси. При малых углах закрутки потока, например  $\varphi = 30^\circ$ , наблюдается недостаточное перемешивание, и догорание остаточного топлива происходит на выходе из жаровой трубы (см. рис. 5, а). При увеличении угла закрутки струи вторичный воздух более интенсивно смешивается с нагретыми газами, этим объясняется уменьшение их размеров в зоне смешения (см. рис. 5, б, в).

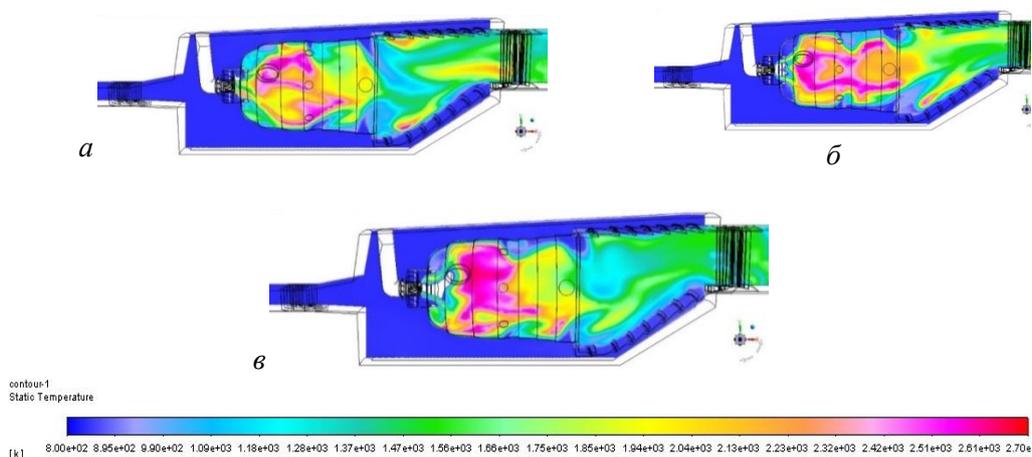


Рис. 5. Поля температур для моделей с разными углами крутки потока от завихрителя, расчет проводился на режиме:  $\alpha = 2,94$ ;  $P_K^* = 3\,074\,454$  Па;  $T_K^* = 856,0$  К;  $G_B = 79,32$  кг/с.  
Здесь: а –  $\varphi = 30^\circ$ ; б –  $\varphi = 45^\circ$ ; в –  $\varphi = 60^\circ$

Также были получены численные данные по выделению NO за камерой сгорания с тремя вариантами завихрителей для различных режимов работы КС. Из графиков, представленных на рис. 6, а, видно, что на изменение уровня эмиссии NO по составу смеси в камере сгорания влияют режим работы двигателя и уровень подготовки смеси за фронтным устройством. Максимальные выбросы NO при работе КС наблюдаются в диапазоне  $\alpha_{КС} = (2,0 - 3,0)$ , что соответствует составу в зоне горения  $\alpha_{ЗОТ} = (1,0 - 1,5)$ . Здесь же представлены экспериментальные данные.

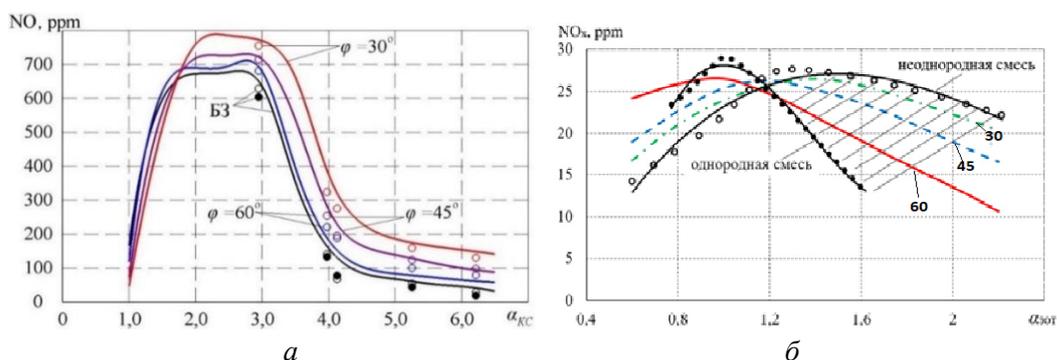


Рис. 6. Зависимость NO от состава смеси с различной степенью подготовки и неоднородности: а – сравнение результата расчетов выбросов NO при использовании численного трехмерного (3D) и аналитического расчета (1D) с экспериментальными данными для базового варианта (БЗ), где: ● – опытные данные работы [16]; ○ – численный трехмерный расчет; — – аналитический расчет; б – зависимости концентрации оксидов азота от состава смеси в ЗОТ за завихрителем, ● – заранее подготовленная смесь природного газа и воздуха; ○ – диффузионный факел природного газа; расчет: — — — —  $\varphi = 60^\circ$ ; — — — —  $\varphi = 45^\circ$ ; — — — —  $\varphi = 30^\circ$ ; начальная температура смеси  $T_3 = 473$  К, давление  $P_0 = 10^5$  Па

На рис. 6, б продемонстрировано влияние неоднородности смеси на одном из режимов работы двигателя. Для этого были проведены расчетные исследования эмиссии  $\text{NO}_x$  для закрученной струи с различной круткой, что соответствовало различной степени неоднородности смеси, истекающей из завихрителей. С увеличением крутки струи скорость смешения возрастает, т.е. смесь становится более однородной, и протекание кривой  $\text{NO}_x = f(\alpha_{\text{ЗОТ}})$  приближается к характеру, соответствующему горению однородных смесей. Очевидно, этот факт связан с тем, что при малых крутках в ЗОТ недостаточный уровень турбулентности, а соответственно и турбулентной диффузии, вследствие чего в зоне горения имеются локальные зоны с переобогащенными составами, которые способствуют смещению максимального значения  $\text{NO}_x$  в обедненную область, где  $\alpha > 1,0$ .

По мере увеличения крутки топливовоздушной струи  $\text{NO}_{x \text{ max}}$  смещается в стехиометрическую область. Необходимо отметить, что при горении хорошо перемешанных стехиометрических смесей возможно увеличение выбросов  $\text{NO}_x$  по сравнению с неоднородными составами и, наоборот, при горении обедненных однородных смесей достигается значительное уменьшение эмиссии  $\text{NO}_x$ . Следовательно, при диффузионном сжигании топлива существуют зоны с переобогащенными составами смеси, в которых отсутствует кислород, что затрудняет выделение  $\text{NO}_x$ . Однако недостатком диффузионного сжигания является рост эмиссии  $\text{CO}$ , уменьшение которого возможно только во второй зоне дожигания камеры сгорания. Отсюда следуют практические рекомендации для уменьшения выбросов  $\text{NO}_x$ : в случае использования газообразных топлив необходимо сжигать обедненные хорошо перемешанные топливовоздушные смеси, а при использовании жидких топлив, как правило, реализуется диффузионное горение в первичной зоне с последующим дожиганием  $\text{CO}$  во вторичной зоне.

Сравнение с результатами 3D-моделирования, а также с экспериментальными данными показывают их хорошее соответствие, что свидетельствует о правомерности принятых допущений и предпосылок при создании аналитических зависимостей по расчету характеристик камеры сгорания. Представленный алгоритм расчета характеристик камер сгорания позволяет определить влияние процессов смешения на выходные характеристики камер сгорания, что является важной частью проектирования и доводки камер сгорания.

### Выводы

Предлагаемый алгоритм расчета характеристик камер сгорания позволяет определить влияние процессов смешения на выходные характеристики камер сгорания, что является важной частью проектирования и доводки камер сгорания. Полученные результаты говорят о возможности совершенствования конструкции существующих камер сгорания путем применения моделей различного уровня.

### Библиографический список

1. Канило П.М., Подгорный А.Н., Христин В.А. Энергетические и экологические характеристики ГТД при использовании углеводородных топлив и водорода. Киев: Наукова думка, 1987. – 224 с.
2. Аэродинамика закрученной струи. / Р.Б. Ахмедов, Т.Б. Балагула, Ф.К. Рашидов, А.Ю. Сакаев. – М.: Энергия. – 1977. – 240 с.
3. Лефевр А. Процессы в камерах сгорания ГТД: пер. с англ. – М.: Мир, 1986. – 566 с.
4. Lewis В., Pease R.N., Taylor H.S. Combustion Processes. – Princeton University Press, 1955. – 696 p.
5. Мингазов Б.Г. Камеры сгорания газотурбинных двигателей. Конструкция, моделирование процессов и расчет: учеб. пособие. – Изд. 2-е, исправ. – Казань: Изд-во Казан. гос. техн. ун-та, 2006. – 220 с.
6. Хакер Д.С. Модель стабилизации пламени в закрученном потоке, основанная на упрощенной теории пути смешения // Ракетная техника и космонавтика. – 1974. – № 1. – С. 78 – 86.
7. Влияние угла установки лопаток завихрителя на эффективность смешения потока за фронтальным устройством камеры сгорания ГТД / Ю.Б. Александров, Т.Д. Нгуен, Б.Г. Мингазов, Е.В. Королькова, Р.Р. Шарафутдинов. // Вестник Московского авиационного института. – 2021. – Т. 28, № 3. – С. 146–158.

8. Экспериментальное исследование процесса смешения в камерах сгорания газотурбинных двигателей / Т.Д. Нгуен, Ю.Б. Александров, Б.Г. Мингазов, Е.В. Королькова, Р.Р. Шарафутдинов. // Вестник Рыбинской государственной авиационной технологической академии им. П. А. Соловьева. – 2021. – № 4 (59). – С. 22–30.
9. Численное моделирование рабочего процесса в высокотемпературной воздушно-керосиновой горелке / Е.В. Харлина, А.Д. Морозов, Н.Л. Бачев, Р.В. Бульбович. // Вестник Пермского национального исследовательского политехнического университета. Аэрокосмическая техника. – 2019. – № 59. – С. 1–9.
10. Александров Ю.Б., Нгуен Т.Д., Мингазов Б.Г. Проектирование и доводка камер сгорания газотурбинных двигателей на основе расчётов различного уровня сложности // Вестник Самарского университета. Аэрокосмическая техника, технологии и машиностроение. – 2021. – Т. 20, № 3. – С. 7–23.
11. Садьков А.В., Бутяков М.А. К решению уравнения переноса излучения методом дискретных ординат // Известия высших учебных заведений. Проблемы Энергетики. – 2017. – № 19(5-6). – С. 25–34.
12. Крашенинников С.В., Савченко О.В. Моделирование смешения в закрученном потоке в программе ANSYS CFX // Вестник Самарского государственного аэрокосмического университета. – 2013. – № 3 (41). Часть 2. – С. 128–132.
13. Влияние процесса горения на структуру закрученного потока за горелочным устройством камеры сгорания газотурбинной установки / И.А. Зубрилин, А.А. Диденко, Д.Н. Дмитриев, Н.И. Гураков, М.М. Эрнандэс. // Вестник Московского авиационного института. – 2019. – Т. 26, № 3. – С. 124–136.
14. Mohammed A. Azim Mixing in Outer Swirling Coaxial Jets // American Journal of Fluid Dynamics. – 2019. – № 9(1). – P. 27–34. DOI: 10.5923/j.ajfd.20190901.03
15. Авиационный двигателей ПС – 90А / А.А. Иноземцев, Е.А. Коняев, В.В. Медведев, А.В. Нерадько, А.Е. Ряссов. – М.: Либра-К, 2007. – 320 с.
16. Куценко Ю.Г. Численные методы оценки эмиссионных характеристик камер сгорания газотурбинных двигателей. – Екатеринбург – Пермь: Изд-во Урал. отд. РАН, 2006. – 140 с.

#### References

1. Kanilo P.M., Podgorny A.N., Khristich V.A. Energy and environmental characteristics of gas turbine engines using hydrocarbon fuels and hydrogen. Kyiv: Naukova Dumka, – 1987. 224 p.
2. Akhmedov R.B., Balagula T.B., Rashidov F.K., Sakaev A.Yu. Aerodynamics of a swirling jet. – Moscow: Ed. Energy. – 1977. – 240 p.
3. Lefebvre A. Processes in the combustion chambers of gas turbine engines: Per. from English. – M.: Mir. – 1986. – 566 p.
4. Lewis B., Pease R.N., Taylor H.S. Combustion Processes. Princeton University Press. – 1955. – 696 p.
5. Mingazov B.G. Combustion chambers of gas turbine engines. Design, Process Modeling and Calculation: Textbook. Second edition, corrected. Kazan: Kazan Publishing House. state tech. university – 2006. – 220 p.
6. Hacker D.S. Flame Stabilization Model in a Swirling Flow Based on a Simplified Mixing Path Theory. – 1974. – No. 1. S. 78 – 86.32.
7. Aleksandrov Yu.B., Nguyen T.D., Mingazov B.G., Korolkova E.V., Sharafutdinov R.R. Influence of the angle of installation of the swirler blades on the efficiency of mixing the flow behind the front device of the gas turbine engine combustion chamber. Bulletin of the Moscow Aviation Institute. – 2021. V. 28. No. 3. S. 146-158.
8. Nguyen T.D., Alexandrov Yu.B., Mingazov B.G., Korolkova E.V., Sharafutdinov R.R. Experimental study of the mixing process in the combustion chambers of gas turbine engines. Bulletin of the Rybinsk State Aviation Technological Academy. P. A. Solovyova. – 2021. No. 4 (59). pp. 22-30.
9. Kharlina E.V., Morozov A.D., Bachev N.L., Bulbovich R.V. Numerical modeling of the working process in a high-temperature air-kerosene burner // Bulletin of the Perm National Research Polytechnic University. Aerospace engineering. – 2019. – No. 59. – P. 1–9.
10. Alexandrov Yu.B., Nguyen T.D., Mingazov B.G. Design and development of combustion chambers for gas turbine engines based on calculations of various levels of complexity // Bulletin of the Samara University. Aerospace engineering, technologies and mechanical engineering. – 2021. V. 20. No. 3. S. 7-23.
11. Sadykov A.V. To the solution of the radiation transfer equation by the method of discrete ordinates / A.V. Sadykov, M.A. Butyakov // News of higher educational institutions. Energy Problems. – 2017 – 19(5-6) – S. 25 – 34.
12. Krasheninnikov S. V., Savchenko O. V. Simulation of mixing in a swirling flow in the ANSYS CFX program // Bulletin of the Samara State Aerospace University. 2013. No. 3 (41). Part 2. S. 128-132.

13. Zubrilin I.A., Didenko A.A., Dmitriev D.N., Gurakov N.I., Hernandez M.M. Influence of the combustion process on the structure of the swirling flow behind the burner device of the gas turbine combustion chamber // Bulletin of the Moscow Aviation Institute. 2019. V. 26. No. 3. S. 124-136.

14. Mohammed A. Azim Mixing in Outer Swirling Coaxial Jets // American Journal of Fluid Dynamics 2019, 9(1): 27-34. DOI: 10.5923/j.ajfd.20190901.03

15. Inozemtsev A.A., Konyaev E.A., Medvedev V.V., Neradko A.V., Ryassov A.E. Aviation engines PS – 90A // – М.: Libra-K. – 2007. – 320 s.

16. Kutsenko Yu.G. Numerical methods for estimating the emission characteristics of combustion chambers of gas turbine engines. – Yekaterinburg-Perm: Ur.O RAS, – 2006. – 140 p.

#### Об авторах

**Александров Юрий Борисович** (Казань, Россия) – кандидат химических наук, доцент кафедры «Реактивные двигатели и энергетические установки», Казанский национальный исследовательский технический университет имени А.Н. Туполева – КАИ (Казань, 420111, ул. К. Маркса, 10, e-mail: alexwischen@rambler.ru).

**Вовк Михаил Юрьевич** (Москва, Россия) – кандидат технических наук, заместитель главного конструктора, Опытно-конструкторское бюро имени А. Люльки, филиал ОДК-Уфимского моторостроительного производственного объединения, ОКБ имени А. Люльки (Москва, 129301, ул. Касаткина, 13, e-mail: mvovk@yandex.ru).

**Мингазов Биал Галавtdинович** (Казань, Россия) – доктор технических наук, профессор кафедры «Реактивные двигатели и энергетические установки», Казанский национальный исследовательский технический университет имени А.Н. Туполева – КАИ (Казань, 420111, ул. К. Маркса, 10, e-mail: BGMingazov@kai.ru).

#### About the authors

**Yuriy B. Aleksandrov** (Kazan, Russian Federation) – CSc in Chemical Sciences, Associate Professor, Department of jet engines and power plants, Kazan national research technical university named after A.N. Tupolev – KAI (10, Karl Marx str., 420111, Kazan, e-mail: alexwischen@rambler.ru).

**Mikhail Yu. Vovk** (Moscow, Russian Federation) – CSc in Technical Sciences, Deputy Chief Designer, Experimental Design Bureau named after A. Lyulka, branch of the UEC-Ufa Motor-Building Production Association (13, Kasatkina str., 129301, Moscow, e-mail: mvovk@yandex.ru).

**Bilal G. Mingazov** (Kazan, Russian Federation) – Doctor of Technical Sciences, Professor, Department of jet engines and power plants, Kazan national research technical university named after A.N. Tupolev – KAI (10, Karl Marx str., 420111, Kazan, e-mail: BGMingazov@kai.ru).

**Финансирование.** Исследование не имело спонсорской поддержки.

**Конфликт интересов.** Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

**Вклад авторов.** Все авторы сделали равный вклад в подготовку публикации.

Поступила: 27.05.2022

Одобрена: 20.06.2022

Принята к публикации: 05.12.2022

Просьба ссылаться на эту статью в русскоязычных источниках следующим образом: Александров, Ю.Б. Исследование эмиссии NO<sub>x</sub> в камерах сгорания на основе многоуровневого моделирования / Ю.Б. Александров, М.Ю. Вовк, Б.Г. Мингазов // Вестник Пермского национального исследовательского политехнического университета. Аэрокосмическая техника. – 2022. – № 71. – С. 17–25. DOI: 10.15593/2224-9982/2022.70.02

Please cite this article in English as: Aleksandrov Yu.B., Vovk M.Yu., Mingazov B.G. Investigation of NO<sub>x</sub> emission in combustion chambers on the basis of multilevel modeling *PNRPU Aerospace Engineering Bulletin*, 2022, no. 71, pp. 17-25. DOI: 10.15593/2224-9982/2022.71.02