

## ОПРЕДЕЛЕНИЕ ПОЛНОТЫ СГОРАНИЯ, ТЕМПЕРАТУРЫ И ЭМИССИОННЫХ ХАРАКТЕРИСТИК В ЗАКРУЧЕННОМ ПОТОКЕ НА ОСНОВЕ ТЕОРИИ ТУРБУЛЕНТНОГО ГОРЕНИЯ

© 2024

**Ю. Б. Александров** кандидат химических наук, доцент кафедры «Реактивные двигатели и энергетические установки»; Казанский национальный исследовательский технический университет им. А.Н. Туполева; alexwischen@rambler.ru

**Б. Г. Мингазов** доктор технических наук, профессор кафедры «Реактивные двигатели и энергетические установки»; Казанский национальный исследовательский технический университет им. А.Н. Туполева; bmingazov@kai.ru

Проведено исследование характеристик горения в закрученной струе с позиции теории турбулентного горения. Особое внимание уделено зоне обратных токов, образуемой от лопаточного завихрителя. По известному составу смеси последовательно определяются параметры скорости распространения фронта пламени, полноты сгорания, температуры и эмиссии оксидов азота. Созданная аналитическая методика апробирована в диапазоне горения неоднородной и однородной смесей. Расчёты показали зависимость эмиссии от параметров смешения.

*Закрученная струя; коэффициент смешения; нормальная и турбулентная скорости горения; полнота и температура сгорания*

---

*Цитирование:* Александров Ю.Б., Мингазов Б.Г. Определение полноты сгорания, температуры и эмиссионных характеристик в закрученном потоке на основе теории турбулентного горения // Вестник Самарского университета. Аэрокосмическая техника, технологии и машиностроение. 2024. Т. 23, № 1. С. 123-136. DOI: 10.18287/2541-7533-2024-23-1-123-136

---

### Введение

В камерах сгорания (КС) газотурбинных двигателей и энергетических установках осуществляется сжигание топлива с целью преобразования его химической энергии в тепловую с последующим переходом её в кинетическую. Воздух, подаваемый из компрессора, попадает в КС и делится на первичный, проходящий через фронтное устройство, и вторичный, поступающий в жаровую трубу через отверстия. Первичный воздух поступает в область жаровой трубы камеры сгорания через лопаточный завихритель, где поток воздуха претерпевает закрутку и перемешивается с газообразным или испарённым жидким топливом. Фронтное устройство обеспечивает стабилизацию горения, образование хорошо перемешанной топливовоздушной смеси, полноту сжигания топлива и температурное состояние, как в области жаровой трубы, так и на выходе из КС. Вторичный воздух распределяется по длине жаровой трубы, проходя через отверстия в её стенке, и расходуется на их охлаждение, процессы догорания топлива и формирование требуемых полей температур на выходе из КС.

Описание процессов в закрученных потоках фронтных устройств описано в большом количестве работ [1 – 3]. Основное влияние на процесс горения оказывает образующаяся в закрученном потоке рециркуляционная зона, так называемая зона обратных токов (ЗОТ). За счёт ЗОТ эжектируется внешний воздух, что приводит к увеличению площади струи. Рециркуляция раскалённых продуктов сгорания в корень пламени постоянно поджигает свежую смесь, что стабилизирует горение. Закрутка потока при-

водит к увеличению турбулентных пульсаций и интенсифицирует горение, в то же время сокращает длину зоны горения.

В настоящей работе рассматривается ЗОТ в следе за закрученной свободной струей при горении газозадушной смеси. Последовательно рассматриваются следующие вопросы: расчёт процессов смешения закрученного потока с внешней средой и формирования смеси в ЗОТ, расчёт полноты сгорания, определение температурных полей и расчёт эмиссионных характеристик.

### Расчёт смешения в зоне обратных токов

В закрученной струе структура потока в рециркуляционной зоне имеет сходство с зоной за плохообтекаемым телом. В отличие от плохообтекаемого тела в закрученной струе, нет твёрдых стенок взаимодействующих с потоком, и все воздействие на поток происходит за счёт аэродинамических сил.

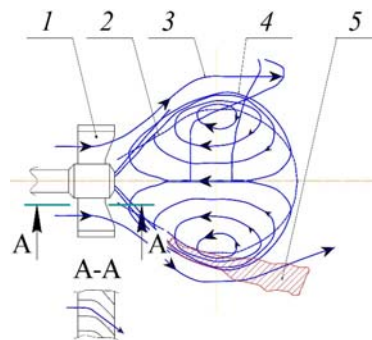


Рис. 1. Схема рециркуляционного течения за лопаточным завихрителем:  
1 – лопаточный завихритель; 2 – внешняя граница зоны обратных токов;  
3 – внешний поток; 4 – зона рециркуляционного течения; 5 – область горения

Размеры ЗОТ определяются конструкцией завихрителя и имеют функциональную зависимость от параметра крутки  $n_k$ , описанного в работе Померанцева В.В. [4]. Относительную длину ЗОТ можно рассчитать по эмпирической зависимости, предложенной в работе [2]:

$$\frac{L_{\text{ЗОТ}}}{D_{\text{ЗОТ}}} = (1 + 1,5 n_k^{0,5}), \quad (1)$$

где  $n_k$  – параметр крутки;  $D_{\text{ЗОТ}}$  – диаметр ЗОТ;  $L_{\text{ЗОТ}}$  – длина ЗОТ.

Созданная лопаточным завихрителем ЗОТ эжектирует внешний воздух. В работах [2; 5] описана зависимость в виде относительного расхода эжектированного воздуха  $m_{\text{ЗОТ}}$ , поступающего в ЗОТ:

$$m_{\text{ЗОТ}} = G_{\text{Э}} / G_{\text{ЗАВ}} \quad (2)$$

где  $G_{\text{Э}}$  – расход эжектированного в область ЗОТ воздуха;  $G_{\text{ЗАВ}}$  – расход воздуха через лопаточный завихритель.

Коэффициент смешения  $m_{3OT}$  в области ЗОТ с учётом представления закрученной струи в виде кольцевого источника [5] можно представить в виде следующей зависимости:

$$m_{3OT} = A_1 \frac{T_{3AB} R_B W_{\text{Э}} \exp K_X}{T_{\text{Э}} R_{\Gamma} W_{3AB} K_X}, \quad (3)$$

где  $A_1$  – опытный коэффициент, определённый в работе [5] для завихрителей, используемых в экспериментах,  $A_1 = 2,0$ ;  $R_B$ ,  $R_{\Gamma}$  – универсальная газовая постоянная для воздуха и газа;  $T_{\text{Э}}$ ,  $W_{\text{Э}}$  – температура и скорость эжектируемого воздуха;  $T_{3AB}$ ,  $W_{3AB}$  – температура и скорость струи выходящей из завихрителя;  $K_X$  – безразмерный параметр, определяемый по формуле:

$$K_X = \frac{R_{\text{НЗ}} W_{3AB}}{4D_T}, \quad (4)$$

где  $R_{\text{НЗ}}$  – наружный радиус завихрителя;  $D_T$  – коэффициент турбулентной диффузии.

Коэффициент турбулентной диффузии  $D_T$  для закрученного потока можно определить по уравнению, приведенному в работе [6]:

$$D_T = 0,003(1 + \kappa_1^2 \operatorname{tg}^2 \varphi)^{0,5} W_{3AB} R_{\text{НЗ}}, \quad (5)$$

где  $\varphi$  – угол закрутки потока;  $\kappa_1$  – коэффициент, учитывающий особенности конструкции завихрителя, для осевого завихрителя  $\kappa_1 \approx 10$ .

Из описанных выше зависимостей можно сделать вывод, что инжекционная способность закрученной струи зависит от скоростей и температуры потоков, а также от угла закрутки потока лопаточным завихрителем.

Для определения состава смеси в ЗОТ, характеризуемую коэффициентом избытка воздуха  $\alpha_{3OT}$ , можно использовать зависимость, предложенную в работе [7]:

$$\alpha_{3OT} = \alpha_{3AB} m_{3OT} \left( 1 + \frac{1}{\alpha_{3AB} L_0} \right) + \alpha_{3AB}, \quad (6)$$

где  $\alpha_{3AB}$  – состав смеси на выходе из завихрителя;  $L_0$  – стехиометрический коэффициент.

### Определение полноты сгорания

Для определения полноты сгорания в условиях наличия закрученного потока могут быть использованы различные подходы. В работе [8] имеются сведения о применении гомогенного реактора, который позволяет определить полноту сгорания при условии однородности смеси. При использовании такой модели есть затруднения, связанные с определением коэффициентов химической реакции. Ограничением приме-

нения такой модели также может служить и то, что в области ЗОТ наблюдается неоднородность топливо-воздушной смеси.

Ещё одна модель, впервые предложенная Г. Дамкёлером [9] и развитая в работах К.И. Щелкина [10] и А.В. Талантова [11], основана на предположении, что в зоне горения скорость пребывания ограничивает процессы химического реагирования, и сгорание смеси происходит на поверхности фронта пламени.

На основе модели сгорания осреднённого «моля» смеси, процесс выгорания смеси в зоне горения происходит за время пребывания  $t$  [10], это можно представить в виде зависимости для определения полноты сжигания топлива  $\eta_\Gamma$  в следующем виде:

$$\eta_\Gamma = \frac{3U_\Gamma^3 t_0^3}{l_0^3} \left[ \frac{1}{3} \left( 1 - e^{-\frac{3t}{t_0}} \right) - \frac{U_H}{U_\Gamma} \left( 1 - e^{-\frac{2t}{t_0}} \right) + \frac{U_H^2}{U_\Gamma^2} \left( 1 - e^{-\frac{t}{t_0}} \right) \right], \quad (7)$$

где  $U_\Gamma$  – турбулентная скорость горения;  $U_H$  – нормальная скорость распространения пламени, пропорциональная процессу химического реагирования смеси и зависящая от состава смеси;  $V_{\text{ЗОТ}}$ ,  $G_{\text{ЗОТ}}$  – объём и расход газа в ЗОТ,  $G_{\text{ЗОТ}} = G_{\text{ЗАВ}}(1 + m_{\text{ЗОТ}}) + G_\Gamma$ ;  $G_\Gamma$  – расход газообразного топлива;  $\rho_\Gamma$  – плотность газа в ЗОТ;  $l_0$ ,  $W'$  – масштаб турбулентности и пульсационная скорость в рассматриваемом сечении потока;  $t_0 = \frac{l_0}{W'}$  – время существования пульсации;  $t = \frac{V_{\text{ЗОТ}} \rho_\Gamma}{G_{\text{ЗОТ}}}$  – время пребывания смеси в ЗОТ.

Зависимость (7) позволяет определять полноту сгорания с учётом кинетических и гидродинамических факторов. Влияние кинетических факторов определяет нормальная скорость распространения фронта пламени  $U_H$ , а гидродинамических – учёт пульсационной составляющей скорости  $W'$  и масштаба турбулентности  $l_0$ . Также учитывается формирование осреднённых значений температур и скорости газового потока, состава смеси по испаренному и смешанному топливу в каждом сечении. Такой подход позволяет более точно описывать процесс горения в камере сгорания.

Нормальная скорость распространения фронта пламени  $U_H$  представляет собой линейную скорость перемещения фронта пламени относительно ещё не воспламенившейся смеси и направлена по нормали к поверхности фронта пламени в данной точке. Зависит от температуры, давления и коэффициента избытка воздуха и является физико-химической константой для фиксированного состава смеси при заданных условиях. Согласно теории, описанной в работе Я.Б. Зельдовича [12]:

$$U_H = \left[ 2a_M C_0 \left( \frac{T_K}{T_\Gamma} \right)^2 \frac{A \exp(-E/(RT_\Gamma))}{(T_\Gamma - T_K)} \left( \frac{RT_\Gamma}{E} \right)^3 \right]^{0,5}, \quad (8)$$

где  $a_M$  – коэффициент температуропроводности;  $C_0$  – начальная концентрация;  $E$  – энергия активации;  $T_K$  – начальная температура;  $T_\Gamma$  – температура горения;  $A$  – константа;  $R$  – универсальная газовая постоянная.

При расчёте нормальной скорости распространения фронта пламени по зависимости (8) было получено, что количественные результаты расчётов сильно отличаются от

экспериментальных. Поэтому для практических расчётов часто используют эмпирические зависимости, например, приведённые в работах [2; 13; 14], а скорость рассчитывают по формуле:

$$U_H = U_{H0} \left( \frac{T_i}{T_0} \right)^\delta \left( \frac{P_i}{P_0} \right)^\gamma, \quad (9)$$

где  $U_{H0}$  – нормальная скорость распространения фронта пламени при давлении среды  $P_0 = 10^5$  Па и начальной температуре  $T_0 = 873$  К;  $P_i$ ,  $T_i$  – давление и температура в рассматриваемом сечении зоны горения;  $\delta$  и  $\gamma$  – показатели степени, рассчитываются согласно [13]:  $\delta = 2,98 - \frac{0,8}{\alpha}$ ;  $\gamma = -0,38 + \frac{0,22}{\alpha}$  или принимаются постоянными согласно [2]:  $\delta = 1,8$ ;  $\gamma = -0,2$ ;  $\alpha$  – коэффициент избытка воздуха.

В литературных источниках существует множество значений  $\delta$  и  $\gamma$  как в виде зависимостей от коэффициента избытка воздуха, так и в виде постоянных значений. Для того, чтобы значения  $U_{H0}$ ,  $\delta$  и  $\gamma$  соответствовали заданному топливу при конкретных рабочих условиях были аппроксимированы экспериментальные данные работ [2; 15] и определены зависимости  $U_{H0} = f(\alpha)$ ,  $\delta = f(\alpha)$ ,  $\gamma = f(\alpha)$ :

$$U_{H0} = -3,55\alpha^4 + 25,49\alpha^3 - 66,31\alpha^2 + 70,82\alpha - 22,3; \quad (10)$$

$$\delta = 2,03\alpha^2 - 4,46\alpha + 4,05; \quad (11)$$

$$\gamma = -0,63\alpha^2 + 1,28\alpha - 1,04. \quad (12)$$

Представленные в уравнении (9) степенные коэффициенты  $\delta$ ,  $\gamma$  и скорость  $U_{H0}$  были рассчитаны по уравнениям (10 – 12) для широкого диапазона значений по коэффициенту избытка воздуха  $\alpha$  и сопоставлены с имеющимися экспериментальными данными (рис. 2). Как видно на рисунке, рассчитанные значения по формулам (10 – 12) хорошо согласуются с экспериментальными данными. Полученные таким образом зависимости коэффициентов были подставлены в формулу (9) и определены значения нормальной скорости распространения фронта пламени  $U_H$  при различных начальных температурах смеси. Полученные расчётные данные сопоставлены в широком диапазоне значений по коэффициенту избытка воздуха  $\alpha$  с экспериментальными [2] (рис. 3).

Анализ зависимостей, приведённых на рис. 3, на основе сопоставлении расчётных значений  $U_H$  с экспериментальными данными показывает, что предложенные формулы (9 – 12) с достаточно хорошей точностью описывают зависимость  $U_H = f(\alpha)$ .

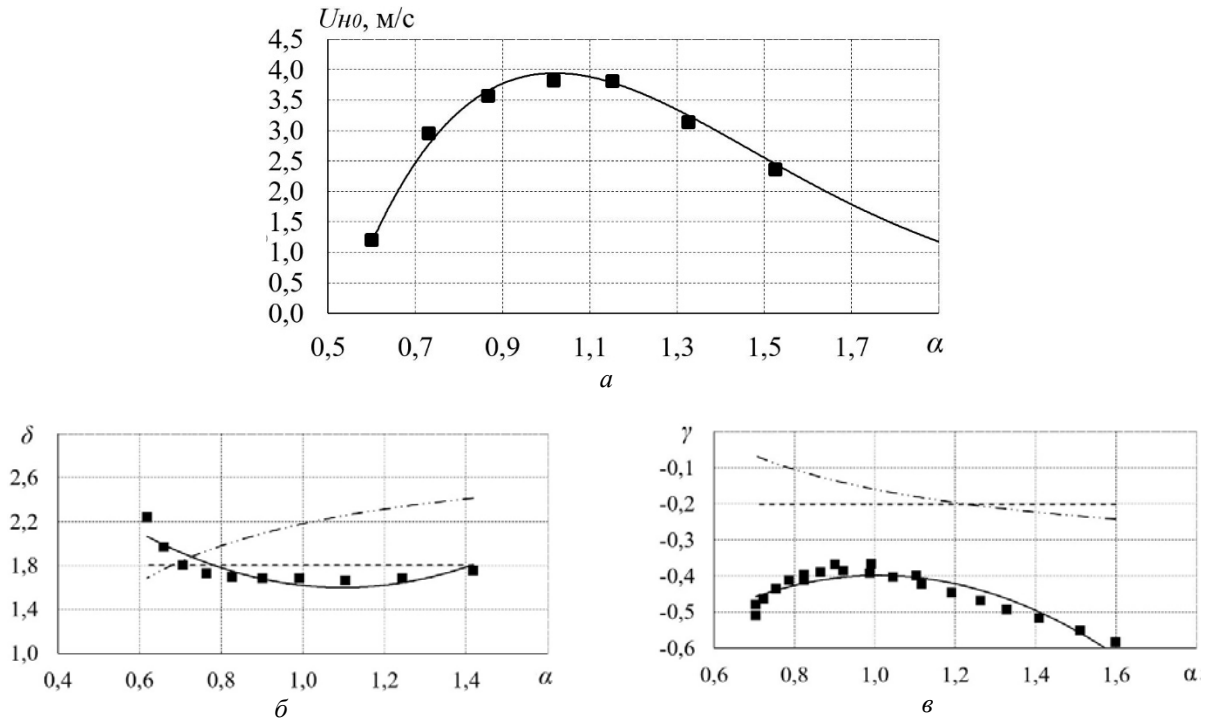


Рис. 2. Зависимости параметров  $U_{H0}$ ,  $\delta$ ,  $\gamma$  от коэффициента избытка воздуха  $\alpha$  :

- $a - U_{H0}$ ;  $b - \delta$ ;  $v - \gamma$ , где
- – экспериментальные данные работ [2; 15];
  - • • – расчёты по данным работы [13];
  - — — значения коэффициентов по данным работы [2];
  - — — зависимости, полученные авторами

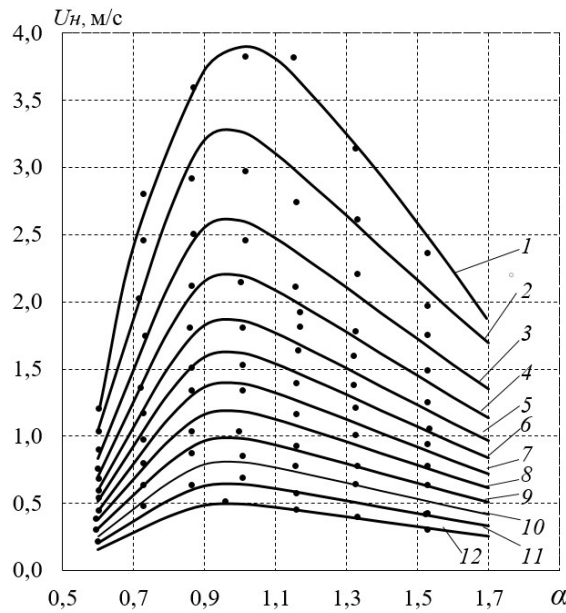


Рис. 3. Сопоставление расчётных и экспериментальных значений  $U_H$  :

- – экспериментальные данные из работы [2], при различных начальных температурах:  
 $T_0^{(1)} = 873 \text{ K}$ ,  $T_0^{(2)} = 823 \text{ K}$ ,  $T_0^{(3)} = 773 \text{ K}$ ,  $T_0^{(4)} = 723 \text{ K}$ ,  $T_0^{(5)} = 673 \text{ K}$ ,  $T_0^{(6)} = 623 \text{ K}$ ,  
 $T_0^{(7)} = 573 \text{ K}$ ,  $T_0^{(8)} = 523 \text{ K}$ ,  $T_0^{(9)} = 473 \text{ K}$ ,  $T_0^{(10)} = 423 \text{ K}$ ,  $T_0^{(11)} = 373 \text{ K}$ ,  $T_0^{(12)} = 323 \text{ K}$ ;
- — — расчётные значения

Процессы горения в камере сгорания происходят в турбулентном потоке. Для определения турбулентной скорости горения фронта пламени  $U_T$  и полноты сгорания, помимо нормальной скорости распространения пламени  $U_H$  в ламинарном потоке, необходимо знать масштаб турбулентности  $l_0$  и пульсационную скорость  $W'$ .

Пульсационная скорость определяется по формуле:

$$W' = \varepsilon W, \quad (13)$$

где  $\varepsilon$  – интенсивность турбулентности;  $W$  – скорость потока за горелочным устройством.

Интенсивность турбулентности можно определить по эмпирической зависимости [16]:

$$\varepsilon = 0,041 \left( 1 + \kappa_1^2 \operatorname{tg}^2 \varphi \right)^{0,5} \left( \frac{x}{R_{\text{НЗ}}} \right)^{-0,5}, \quad (14)$$

где  $x$  – расстояние от среза завихрителя.

Для определения масштаба турбулентности  $l_0$  необходимо провести ряд преобразований. В теории турбулентности коэффициент турбулентной диффузии определяется по следующей зависимости:

$$D_T = l_{\text{CM}} W', \quad (15)$$

где  $l_{\text{CM}}$  – лагранжев масштаб турбулентности.

Приравняв правые части в уравнениях (5) и (15) и учитывая, что  $l_0 = 0,5 l_{\text{CM}}$ , можно получить выражение для расчета масштаба турбулентности в закрученном потоке:

$$l_0 = 0,014 \frac{D_{\text{ЗОТ}}}{2} \left( \frac{x}{R_{\text{НЗ}}} \right)^{0,5}. \quad (16)$$

Подставив все найденные параметры в уравнение (7), получим зависимости полноты сгорания от коэффициента избытка воздуха при различных начальных температурах газа и углах закрутки потока (рис. 4). Зависимость полноты сгорания при разных углах закрутки была сопоставлена с экспериментальными данными работы [2] (рис. 4, б).

Определённая таким образом полнота сгорания в ЗОТ учитывает кинетические факторы, состав смеси, а также количество эжектированного закрученным потоком воздуха и параметры турбулентности. Влияние начальной температуры на полноту сгорания (рис. 4, а) объясняется изменением нормальной скорости распространения фронта пламени. Влияние угла закрутки потока, показанное на рис. 4, б, проявляется в том, что с увеличением крутки потока в области горения «бедной» смеси (высокие значения  $\alpha > 1,0$ ) полнота сгорания ухудшается. При горении в области горения «богатой» смеси (низкие значения  $\alpha < 1,0$ ) с увеличением крутки потока полнота сгорания улучшается.

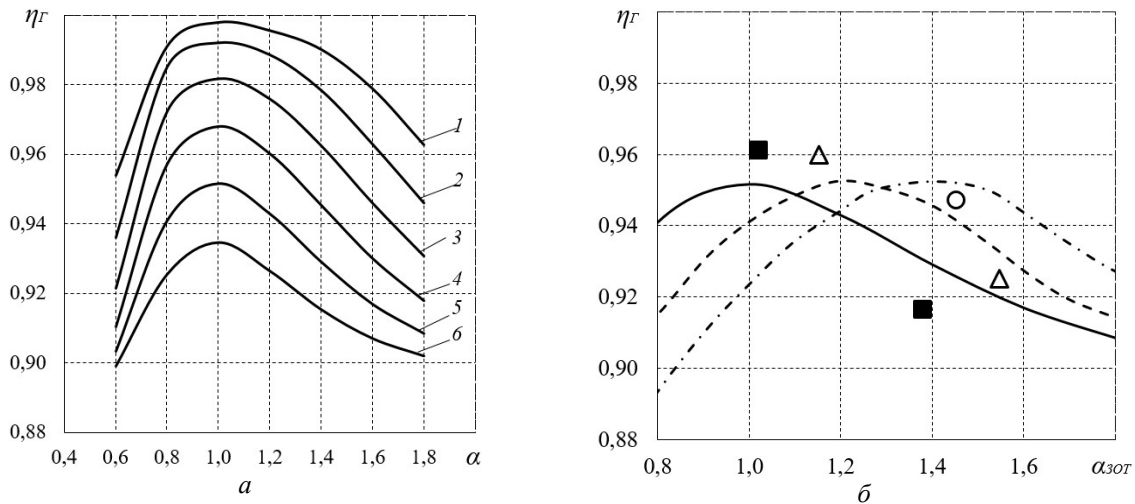


Рис. 4. Результаты расчёта полноты сгорания в зоне обратных токов:  
 а – влияние начальной температуры:

$$T_0^{(1)} = 873 \text{ K}, T_0^{(2)} = 773 \text{ K}, T_0^{(3)} = 673 \text{ K}, T_0^{(4)} = 573 \text{ K}, T_0^{(5)} = 473 \text{ K}, T_0^{(6)} = 373 \text{ K};$$

б – влияние угла закрутки потока при начальной температуре  $T_{зав} = 473 \text{ K}$ :

экспериментальные данные [2]:  $\blacksquare$  –  $\varphi = 60^\circ$ ,  $\blacktriangle$  –  $\varphi = 45^\circ$ ,  $\bullet$  –  $\varphi = 30^\circ$ ;

расчётные данные: — — — —  $\varphi = 60^\circ$ , - - - -  $\varphi = 45^\circ$ , - · - · -  $\varphi = 30^\circ$

Это можно объяснить тем, что при увеличении крутки потока происходит интенсификация смешения с окружающим воздухом (эжектирование), что приводит к «обеднению» топливо-воздушной смеси. Поэтому при увеличении крутки потока для смеси с  $\alpha > 1,0$  полнота сгорания снижается, а при  $\alpha < 1,0$  увеличивается.

Таким образом, полученные зависимости для расчёта полноты сгорания в ЗОТ закрученной струи на основе теории «поверхностного» распространения пламени в турбулентном потоке позволяют учитывать влияние процесса смешения в струе.

### Расчёт температуры горения в зоне обратных токов

Для определения средней температуры горения в ЗОТ необходимо составить уравнение теплового баланса, в котором суммарное тепло в ЗОТ  $Q_{см}$  определяется как сумма тепла, вносимого эжектируемым воздухом в ЗОТ  $Q_э$ , внесённым от закрученного потока  $Q_з$ , и подведённого в зону горения от сгорания топлива  $Q_\Gamma$ :

$$Q_{см} = Q_э + Q_з + Q_\Gamma. \quad (17)$$

Схематически источники тепла в области закрученного потока представлены на рис. 5.



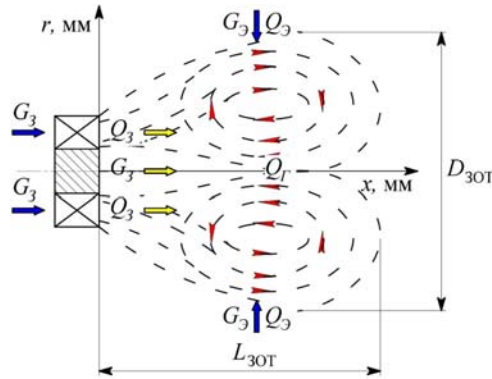


Рис. 5. Схематическое представление подвода тепла в зону обратных токов

Для определения температуры горения в ЗОТ  $T_{Г,ЗОТ}$  в зависимости от состава смеси и с учётом коэффициента смешения на основе теплового баланса могут быть использованы следующие выражения:

при  $\alpha \geq 1$ :

$$T_{Г,ЗОТ} = \frac{m_{ЗОТ}T_Э + T_{ЗАВ}}{m_{ЗОТ} + 1} + \frac{\eta_{Г}Hu}{c_{ПГ}(1 + \alpha_{ЗОТ}L_0)}, \quad (18)$$

при  $\alpha < 1$ :

$$T_{Г,ЗОТ} = \frac{m_{ЗОТ}T_Э + T_{ЗАВ}}{m_{ЗОТ} + 1} + \frac{\eta_{Г}Hu}{c_{ПГ}\left(L_0 + \frac{1}{\alpha_{ЗОТ}}\right)}, \quad (19)$$

где  $Hu$  – теплотворная способность топлива;  $T_Э$  – температура среды, эжектированной из внешней среды;  $\alpha_{ЗОТ}$  – коэффициент избытка воздуха в зоне обратных токов.

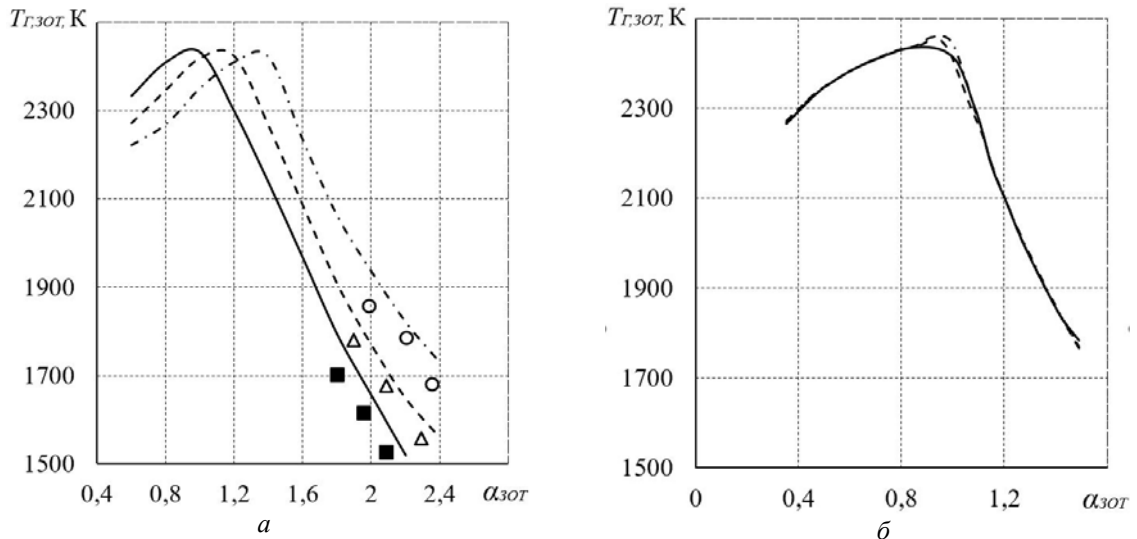


Рис. 6. Зависимости температуры горения от состава смеси в зоне обратных токов при разных углах крутки струи, начальная температура смеси  $T_{ЗАВ} = 473$  К:

а – с учётом зависимости полноты сгорания в зоне обратных токов от степени крутки потока, где: экспериментальные данные [17]: ■ –  $\phi = 60^\circ$ ;  $\Delta$  –  $\phi = 45^\circ$ ;  $\circ$  –  $\phi = 30^\circ$ ;

расчёт: — –  $\phi = 60^\circ$ ; - - - –  $\phi = 45^\circ$ ; - · - · - –  $\phi = 30^\circ$ ;

б – при условии независимости от крутки потока полноты сгорания в зоне обратных токов

Зависимость температуры горения от коэффициента избытка воздуха  $T_{Г,ЗОТ} = f(\alpha_{ЗОТ})$  представлена на рис. 6. Она соответствует общепринятым зависимостям, где максимальная температура достигается при  $\alpha_{ЗОТ} \approx 1$ , а в «бедной» и «богатой» областях наблюдается её снижение.

Зависимость температуры горения от крутки потока повторяет описание для полноты сгорания. При высокой полноте сгорания наблюдается высокая температура горения и наоборот. Таким образом, вследствие разбавления топливо-воздушной смеси эжектированным воздухом при закрутке изменяется коэффициент избытка воздуха, состав смеси и полнота, тем самым внося влияние на температуру горения. Увеличение угла закрутки приводит к снижению температуры горения в области горения при  $\alpha_{ЗОТ} > 1$ , и, наоборот, к увеличению температуры при  $\alpha_{ЗОТ} < 1$  (рис. 6, а).

На рис. 6, б представлены расчётные значения  $T_{Г,ЗОТ}$  при условии постоянства полноты сгорания  $\eta_{Г} = 0,9$  в ЗОТ. Без учёта влияния крутки на полноту сгорания расчётные значения  $T_{Г,ЗОТ}$  для разных углов крутки практически совпадают, что не соответствует экспериментальным данным. Следовательно, в расчётах необходимо учитывать изменение полноты сгорания в ЗОТ, связанное с влиянием эжекционной способности закрученной струи. Можно отметить, что закрутка струи в целом вносит существенное влияние на процесс горения в камерах сгорания.

### Расчёт эмиссии $\text{NO}_x$ в зоне обратных токов

Для определения эмиссии  $\text{NO}_x$  существует множество моделей авторов: Lefebvre A.H., Odgers J., Lewis G.D., Bakken L.E., Diehl L.A., Лукачев С.В и др. Среди различных моделей хорошо себя показала упрощённая зависимость, полученная на основе термического механизма Я.Б. Зельдовича [12]:

$$\text{NO}_x = 37 \cdot 10^{11} \sqrt{\text{O}_2} \text{N}_2 e^{-\frac{65000}{T_{Г,ЗОТ}}} \sqrt{\frac{P_0}{T_{Г,ЗОТ}}} t, \quad (20)$$

где  $t = \frac{V_{ЗОТ} \rho_{Г}}{G_{ЗОТ}}$  – время пребывания газовой смеси в зоне обратных токов,  $\text{NO}_x$ ;  $\text{N}_2$  и  $\text{O}_2$  – мгновенные концентрации компонентов газовой смеси.

Полнота сгорания и температура горения изменяются в зависимости от степени крутки потока за завихрителем, что повлияет и на эмиссию  $\text{NO}_x$  вследствие термического механизма его образования. На рис. 7 представлены результаты расчётов зависимости  $\text{NO}_x = f(\alpha)$ , которые сопоставлены с границами изменения эмиссии для однородной и неоднородных смесей (по данным работы [18]).

С целью выявления влияния неоднородности смеси были проведены расчётные 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  $\text{NO}_x = f(\alpha_{ЗОТ})$  приближается к характеру, соответствующему горению однородных смесей. Очевидно, этот факт связан с тем, что при малых крутках в ЗОТ недостаточный уровень турбулентности и соответственно смешения, вследствие чего в зоне горения имеются локальные зоны с переобогащёнными составами, которые способствуют смещению максимального значения  $\text{NO}_x$  в обеднённую область, где  $\alpha > 1,0$ .

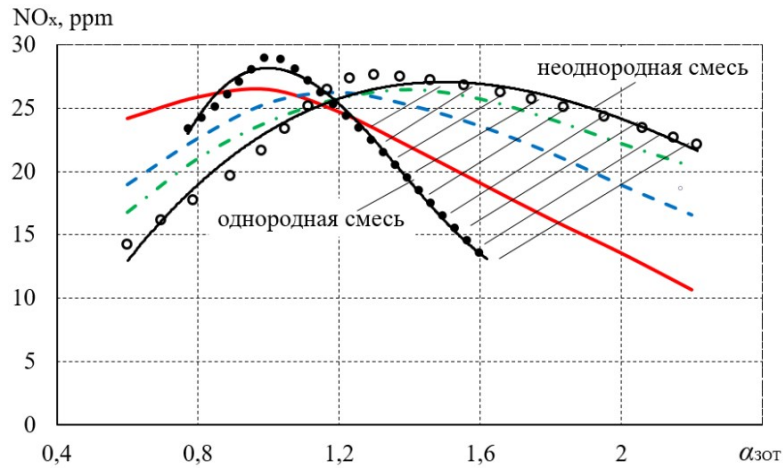


Рис. 7. Зависимость концентрации оксидов азота от состава смеси в зоне обратных токов за завихрителем с начальной температурой смеси  $T_{\text{зав}} = 473 \text{ K}$  и давлением  $P_0 = 10^5 \text{ Па}$ ,

обобщённые экспериментальные данные [18]:

- – подготовленная смесь природного газа и воздуха; ○ – диффузионный факел природного газа;
- расчёт: — — —  $\phi = 60^\circ$ ; — — —  $\phi = 45^\circ$ ; — — —  $\phi = 30^\circ$

Необходимо отметить, что при горении хорошо перемешанных стехиометрических смесей возможно увеличение выбросов  $\text{NO}_x$  по сравнению с неоднородными составами и наоборот – при горении обеднённых однородных смесей достигается значительное уменьшение эмиссии  $\text{NO}_x$ . При сжигании неоднородной смеси существуют зоны с переобогащёнными составами смеси, в которых отсутствует кислород, что затрудняет выделение  $\text{NO}_x$ . Сочетание этих двух методов сжигания топлива часто используется на практике для уменьшения эмиссии азота в реальных камерах сгорания. На рис. 8 представлена схема работы камеры сгорания двигателя CFM-56, реализующая концепцию LPP (Lean Premixed Prevaporized) с применением системы TAPS (Twin Annular Premixed Swirler).

У такой камеры сгорания концентрически завихрителю расположены форсунки с двумя зонами горения. Первая зона обеспечивает подачу топлива и смешение его с большим количеством закрученного воздуха (бедное горение), а вторая поддерживает горение за счёт дежурного факела (богатое горение), что особенно важно при режимах малой тяги.

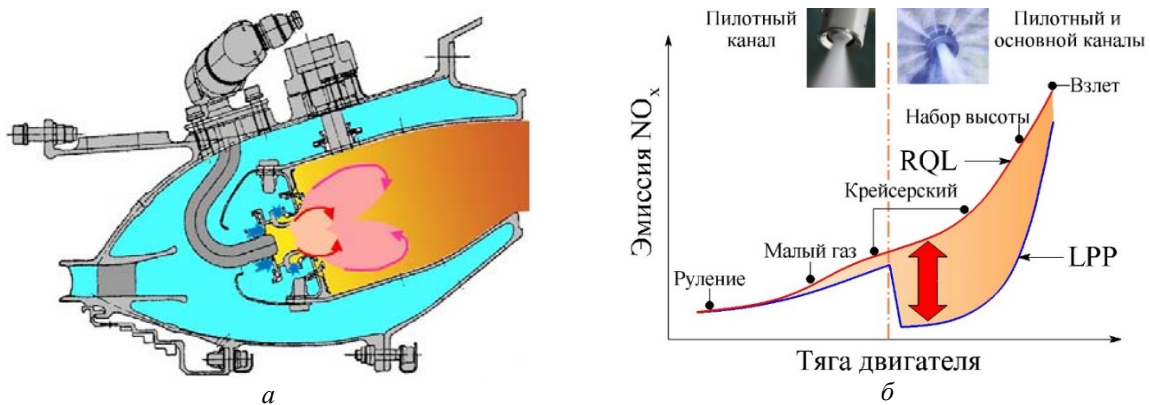


Рис. 8. Схема организации горения по схеме LPP в концепции LDI (Lean Direct Injection):  
а – камера сгорания двигателя CFM-56; б – эмиссия  $\text{NO}_x$  для различных режимов работы камеры сгорания с применением системы TAPS

Работа такой камеры осуществляется при подаче 70% воздуха во фронтное устройство. При работе двигателя на малой тяге, малых оборотах происходит горение однородной смеси. Увеличение оборотов двигателя приводит к включению основных многорасходных форсунок и горению неоднородной смеси в более «богатой области», что позволяет резко снизить выбросы  $\text{NO}_x$ .

### Выводы

На основе теории смешения описаны зависимости для определения состава топливо-воздушной смеси в зоне обратных токов. Рассчитанный состав смеси определяет нормальную скорость горения, что в совокупности с теорией поверхностного распространения пламени в турбулентном потоке позволило получить зависимости для расчёта полноты сгорания в ЗОТ. Полнота сгорания определяет температуру горения, а последняя, в свою очередь, эмиссии оксидов азота.

Предложенная методика предназначена для расчёта процессов горения и эмиссии в условиях работы кольцевой, трубчатой и трубчато-кольцевой камер сгорания в широком диапазоне рабочих режимов. В качестве фронтного устройства камеры сгорания рассмотрена возможность установки осевого лопаточного завихрителя, но данная методика может быть применена и для более сложных конструкций, с учётом однонаправленного и в том числе разнонаправленного движений закрученных потоков, при условии дополнительных доработок зависимостей.

### Библиографический список

1. Gupta A.K. Modulated swirl combustor // 2nd European Symposium on Combustion (September, 1-5, 1975, Orleans, France).
2. Мингазов Б.Г. Камеры сгорания газотурбинных двигателей: конструкция, моделирование процессов и расчёт: учеб. пособие. Казань: Казанский государственный технический университет, 2006. 220 с.
3. Лефевр А. Процессы в камерах сгорания ГТД. М.: Мир, 1986. 566 с.
4. Основы практической теории горения: учеб. пособие / под ред. В.В. Померанцева. Л.: Энергоатомиздат. Ленингр. отд-ние, 1986. 312 с.
5. Сулаиман А.И., Александров Ю.Б., Мингазов Б.Г., Нгуен Т.Д. Исследование смешения потоков за фронтным устройством камеры сгорания газотурбинных двигателей // Известия высших учебных заведений. Авиационная техника. 2019. № 2. С. 102-107.
6. Хакер Д.С. Модель стабилизации пламени в закрученном потоке, основанная на упрощённой теории пути смешения // Ракетная техника и космонавтика. 1974. Т. 12, № 1. С. 78-86.
7. Костерин В.А. и др. Стабилизация пламени в потоке системами струй // Труды КАИ «Авиационные двигатели». Вып. 167. Казань: КАИ, 1974. С. 113-118.
8. Дорошенко В.Е. О процессе горения в камере газотурбинного двигателя // Третье всесоюзное совещание по теории горения. Т. 2. М.: АН СССР, 1960. С. 262-269.
9. Damkohler G. NASA technical memorandum. 1947.
10. Щелкин К.И., Трошин Я.К. Газодинамика горения. М.: Изд-во АН СССР, 1963. 254 с.
11. Ильяшенко С.М., Талантов А.В. Теория и расчёт прямоточных камер сгорания. М.: Машиностроение, 1964. 306 с.
12. Зельдович Я.Б. К теории теплонапряжённости протекания изотермической реакции в струе. I // Журнал технической физики. 1941. Т. 11, № 6. С. 493-500.

13. Metghalchi M., Keck J.C. Burning velocities of mixtures of air with methanol, isoootane, and indolent at high pressure and temperature // *Combustion and Flame*. 1982. V. 48. P. 191-210. DOI: 10.1016/0010-2180(82)90127-4

14. Лукачѐв С.В., Матвеев С.Г., Зубрилин И.А., Сигидаев А.В. Определение зависимости скорости распространения ламинарного пламени от давления и начальной температуры при горении метана // *Вестник Самарского университета. Аэрокосмическая техника, технологии и машиностроение*. 2016. Т. 15, № 4. С. 224-234. DOI: 10.18287/2541-7533-2016-15-4-224-234

15. Konnov A.A. The temperature and pressure dependences of the laminar burning velocity: experiments and modelling // *Proceedings of the European Combustion Meeting (March 30-April 2, 2015, Budapest, Hungary)*.

16. Смородин Ф.К., Лукьянов В.И., Смородин И.Ф. Диагностика процесса взаимодействия газовой струи с обрабатываемой поверхностью оптическим корреляционным методом // *Известия высших учебных заведений. Авиационная техника*. 2003. № 1. С. 44-46.

17. Мингазов Б.Г., Александров Ю.Б., Костерин А.В., Токмовцев Ю.В. Процессы горения и автоматизированное проектирование камер сгорания ГТД и ГТУ: учеб. пособие. Казань: Изд-во КНИТУ-КАИ, 2015. 159 с.

18. Канило П.М., Подгорный А.Н., Христин В.А. Энергетические и экологические характеристики ГТД при использовании углеводородных топлив и водорода. Киев: Наукова думка, 1987. 222 с.

## DETERMINATION OF COMPLETENESS OF COMBUSTION, TEMPERATURE AND EMISSION CHARACTERISTICS IN A SWIRL FLOW BASED ON THE THEORY OF TURBULENT COMBUSTION

© 2024

**Yu. B. Aleksandrov** Candidate of Science (Chemistry), Associate Professor of the Department of Jet Engines and Power Plants;  
Kazan National Research Technical University  
named after A.N. Tupolev, Kazan, Russian Federation;  
[alexwischen@rambler.ru](mailto:alexwischen@rambler.ru)

**B. G. Mingazov** Doctor of Science (Engineering), Professor, Department of Jet Engines and Power Plants;  
Kazan National Research Technical University  
named after A.N. Tupolev, Kazan, Russian Federation;  
[bgmingazov@kai.ru](mailto:bgmingazov@kai.ru)

A study of combustion characteristics in a swirling jet was carried out from the perspective of the theory of turbulent combustion. Particular attention is paid to the reverse-flow area formed from the vane swirler. Based on the known composition of the mixture, the parameters of the speed of propagation of the flame front, completeness of combustion, temperature and emission of nitrogen oxides are successively determined. The created analytical technique was tested in the combustion range of inhomogeneous and homogeneous mixtures. Calculations showed the dependence of emission on the mixing parameters.

*Swirling jet; mixing ratio; normal and turbulent combustion rates; combustion completeness and temperature*

---

*Citation:* Aleksandrov Yu.B., Mingazov B.G. Determination of completeness of combustion, temperature and emission characteristics in a swirl flow based on the theory of turbulent combustion. *Vestnik of Samara University. Aerospace and Mechanical Engineering*. 2024. V. 23, no. 1. P. 123-136. DOI: 10.18287/2541-7533-2024-23-1-123-136

## References

1. Gupta A.K. Modulated swirl combustor. *2nd European Symposium on Combustion (September, 1-5, 1975, Orleans, France)*.
2. Mingazov B.G. *Kamery sgoraniya gazoturbinnyykh dvigateley: konstruktziya, modelirovanie protsessov i raschet: ucheb. posobie* [Combustion chambers of gas turbine engines. Design, simulation and calculation: Tutorial]. Kazan: Kazan National Research Technical University Publ., 2006. 220 p.
3. Lefebvre A.H. Gas turbine combustion. Hemisphere Pub. Corp., 1983. 531 p.
4. *Osnovy prakticheskoy teorii goreniya: ucheb. posobie / pod red. V.V. Pomerantseva* [Fundamentals of the practical theory of combustion]. Leningrad: Energoatomizdat. Leningradskoe Otdelenie Publ., 1986. 312 p.
5. Sulaiman A.I., Mingazov B.G., Aleksandrov Y.B., Nguyen T.D. Investigation of the flow mixing behind the flame tube head of a combustion chamber in a gas turbine engine. *Russian Aeronautics*. 2019. V. 62, Iss. 2. P. 281-286. DOI: 10.3103/S1068799819030267
6. Hacker D.S. A simplified mixing length model of flame stability in swirling combustion. *AIAA Journal*. 1974. V. 12, Iss. 1. P. 65-71. DOI: 10.2514/3.49154
7. Kosterin V.A. et al. Stabilizatsiya plameni v potoke sistemami struy. *Trudy KAI «Aviatsionnye Dvigateli»*. Iss. 167. Kazan: KAI Publ., 1974. P. 113-118. (In Russ.)
8. Doroshenko V.E. O protsesse goreniya v kamere gazoturbinnogo dvigatelya. *Tret'e Vsesoyuznoe Soveshchanie po Teorii Goreniya*. V. 2. Moscow: AN SSSR Publ., 1960. P. 262-269. (In Russ.)
9. Damkohler G. NASA technical memorandum. 1947.
10. Shchelkin K.I., Troshin Ya.K. *Gazodinamika goreniya* [Combustion gas dynamics]. Moscow: AN SSSR Publ., 1963. 254 p.
11. Il'yashenko S.M., Talantov A.V. *Teoriya i raschet pryamotoknykh kamer sgoraniya: ucheb. posobie* [Theory and calculation of direct-flow combustion chambers]. Moscow: Mashinostroenie Publ., 1964. 306 p.
12. Zeldovich Ya.B. Theory of heat density of an isothermal reaction in a jet. I. *Zhurnal Tekhnicheskoy Fiziki*. 941. V. 11, no. 6. P. 493-500. (In Russ.)
13. Metghalchi M., Keck J.C. Burning velocities of mixtures of air with methanol, isoctane, and indolent at high pressure and temperature. *Combustion and Flame*. 1982. V. 48. P. 191-210. DOI: 10.1016/0010-2180(82)90127-4
14. Lukachev S.V., Matveev S.G., Zubrilin I.A., Sigidaev A.V. Dependence of methane laminar flame propagation speed on the pressure and initial temperature. *Vestnik of Samara University. Aerospace and Mechanical Engineering*. 2016. V. 15, no. 4. P. 224-234. (In Russ.). DOI: 10.18287/2541-7533-2016-15-4-224-234
15. Konnov A.A. The temperature and pressure dependences of the laminar burning velocity: experiments and modelling. *Proceedings of the European Combustion Meeting (March 30-April 2, 2015, Budapest, Hungary)*.
16. Smorodin F.K., Lyk'yanov V.I., Smorodin I.F. Diagnostics of interaction between a gas jet and a machined surface using the optical correlation technique. *Izvestiya Vysshikh Uchebnykh Zavedenij. Aviatsionnaya Tekhnika*. 2003. No. 1. P. 44-46. (In Russ.)
17. Mingazov B.G., Aleksandrov Yu.B., Kosterin A.V., Tokmovtsev Yu.V. *Protsessy goreniya i avtomatizirovannoe proektirovanie kamer sgoraniya GTD i GTU: ucheb. posobie* [Combustion processes and computer-aided design of combustion chambers for gas turbine engines and gas turbines: textbook]. Kazan: KNRTU-KAI Publ., 2015. 159 p.
18. Kanilo P.M., Podgornyy A.N., Khristich V.A. *Energeticheskie i ekologicheskie kharakteristiki GTD pri ispol'zovanii uglevodorodnykh topliv i vodoroda* [Energy and environmental characteristics of gas turbine engines using hydrocarbon fuels and hydrogen]. Kiev: Naukova Dumka Publ., 1987. 222 p.