

DOI: 10.15593/2224-9982/2020.60.09

УДК 629.7.036.3: 621.43.056

А.И. Сулаиман, Б.Г. Мингазов, Ю.Б. Александров, Т.Д. Нгуен

Казанский национальный исследовательский технический университет
им. А.Н. Туполева – КАИ, Казань, Россия

ВЛИЯНИЕ РЕЖИМНЫХ И КОНСТРУКТИВНЫХ ПАРАМЕТРОВ НА НЕРАВНОМЕРНОСТЬ ТЕМПЕРАТУРНОГО ПОЛЯ НА ВЫХОДЕ ИЗ КАМЕРЫ СГОРАНИЯ ГАЗОТУРБИННОГО ДВИГАТЕЛЯ

Обеспечение приемлемой неравномерности температурных полей на выходе из камеры сгорания является очень важным требованием, определяющим надежность и долговечность работы турбины. Формирование неравномерности определяется характером взаимодействия струй вторичного воздуха с газовым потоком в жаровой трубе и зависит от многих факторов, как от конструктивных, так и от режимных параметров. Предлагается оценивать неравномерность полей температур на выходе из камеры сгорания с помощью коэффициента смешения, определяющего качество смешения струй вторичного воздуха с газовым потоком в смесителе.

На основании уравнения турбулентной диффузии при истечении кольцевой струи в ограниченное пространство в работе получена аналитическая зависимость, позволяющая рассчитывать процесс смешения в камере сгорания. Установлена связь процесса смешения с формированием температурных полей. На основании этого получены зависимости для расчета неравномерности полей температур. Показано достаточно удовлетворительное их соответствие с экспериментальными данными. Найденные зависимости позволяют проводить анализ влияния различных параметров на неравномерность температурных полей и ускорить доводку камеры сгорания по этому параметру. Показана возможность предсказания влияния различных параметров на неравномерность полей температур. Подтверждено наличие оптимального значения степени раскрытия смесителя, при котором достигается минимальное значение неравномерности температурного поля на выходе из камеры сгорания. Следовательно, найденные в работе аналитические зависимости позволяют оптимизировать конструкцию смесителя в камере сгорания и распределение вторичного воздуха в ней с целью уменьшения неравномерности температурных полей на выходе из камеры сгорания.

Ключевые слова: камера сгорания, смешение струй с потоком, коэффициент смешения, неравномерность температурного поля.

A.I. Sulaiman, B.G. Mingazov, Yu.B. Aleksandrov, T.D. Nguyen

Kazan National Research Technical University named after A.N. Tupolev - KAI,
Kazan, Russian Federation

THE INFLUENCE OF OPERATIONAL AND STRUCTURAL PARAMETERS ON THE UNEVENNESS OF THE TEMPERATURE FIELD AT THE OUTLET OF THE GAS TURBINE COMBUSTION CHAMBER

Ensuring acceptable temperature field non-uniformity at the outlet of the combustion chamber is a very important requirement that determines the reliability and durability of the turbine. The formation of non-uniformity is determined by the nature of the interaction of the secondary air jets with the gas flow in the flame tube and depends on many factors, both structural and operational parameters. In this paper, we propose to evaluate the non-uniformity of the temperature fields at the outlet of the combustion chamber using a mixing coefficient that determines the quality of mixing jets of secondary air with a gas stream in the mixer.

Based on the equation of turbulent diffusion during the flow of an annular jet into a limited space, an analytical dependence is obtained in the work that allows one to calculate the mixing process in the combustion chamber. The connection of the mixing process with the formation of temperature fields is established. Based on this, dependences are obtained for calculating the non-uniformity of temperature fields. Their satisfactory agreement with experimental data was shown. The found dependences allow one to analyze the influence of various parameters on the non-uniformity of temperature fields and accelerate the refinement of the combustion chamber by this parameter. The possibility of predicting the effect of various parameters on the unevenness of temperature fields is shown. The presence of the optimal value of the degree of opening of the mixer is confirmed, at which the minimum value of the unevenness of the temperature field at the outlet of the combustion chamber is achieved. Therefore, the analytical relationships found in the work allow optimizing the design of the mixer in the combustion chamber and the distribution of secondary air in it in order to reduce the unevenness of the temperature fields at the outlet of the combustion chamber.

Keywords: combustion chamber, mixing of jets with a stream, mixing coefficient, temperature field non-uniformity.

Одним из важнейших параметров в камерах сгорания (КС) является неравномерность температурных полей на выходе. Поле температур газа в выходном сечении КС имеет большое значение для надежности ГТД в целом, так как влияет на долговечность турбин [1–6].

В настоящее время считается, что удовлетворительное поле температуры можно получить при правильном выборе глубины проникновения и числа струй, которые образуют локальные зоны перемешивания в смесителе. При этом определение числа и размеров отверстий возможно лишь экспериментально. Исходя из этого доводка температурных полей является наиболее трудоемкой и требует больших затрат. Создание даже приближенных зависимостей является полезным с точки зрения определения влияния конструктивных и режимных параметров [1, 7].

Если рассматривать элементарный объем газа по мере его движения по длине жаровой трубы, то можно отметить следующие этапы перемешивания:

- формирование температурного поля в первичной зоне, зависящего во многом от характеристик распыливания и распределения топлива, испарения капель;
- взаимодействие с охлаждающим воздухом и поперечными струями;
- течение в зоне смешения в условиях переменных размеров и формы канала.

Исходя из указанных условий можно представить следующий механизм формирования полей температур:

- за формирование полей температуры в первичной зоне ответственным является процесс смешения закрученного потока с вторичным воздухом;

- дальнейшее изменение полей температуры определяется взаимодействием поперечных струй с потоком и изменением профиля температур в смесителе.

Действительно, во многих работах [6–10] установлено, что механизмы переноса тепла и примесей в струе одинаковы. В результате этого профили избыточной концентрации примесей в струе должны быть подобны профилям избыточной температуры:

$$\frac{\Delta T}{\Delta T_{\max}} \sim \frac{\Delta C}{\Delta C_{\max}}.$$

Отсюда следует, что при прогнозировании закономерностей формирования температурных полей можно использовать зависимости, полученные для описания процессов смешения. Необходимо отметить, что идея использования закономерностей смешения для прогнозирования была выдвинута также и в работе Лефевра [7], где представлены графики влияния относительной длины поперечной струи и ее угла ввода на температурную неравномерность. Из сказанного следует, что с помощью параметра, характеризующего смешение вторичного воздуха с газовым потоком, можно прогнозировать и уровень неравномерности температурных полей. В связи с этим была предпринята попытка установления связи параметров смешения, рассмотренных в работе [1], с температурной неравномерностью на выходе из камеры сгорания. В качестве параметра, характеризующего смешение, приведен коэффициент смешения m , соответствующий смешению вторичного воздуха с газоздушным потоком камеры сгорания. С целью получения аналитических зависимостей были рассмотрены два типа смешения: это смешение за счет турбулентного массообмена, соответствующее смешению охлаждающего пристеночного воздуха с газовым потоком, и смешение воздуха, поступающего из основных отверстий зоны горения и смешения. Исходя из этого были представлены картины взаимодействия указанных типов смешения и получены аналитические зависимости для расчета m , с помощью которого можно прогнозировать также неравномерность температурных полей.

$$G_{ti} = G_{ti-1} + \Delta G_{b,ti} + \Delta G_{b,ci},$$

где G_{ti-1} – газ, поступивший из предыдущей зоны; $\Delta G_{b,ti}$ – воздух, поступивший в зону горения в результате турбулентного смешения; $\Delta G_{b,ci}$ – воздух, поступивший в зону горения в результате струйного смешения; m_{ti} – коэффициент турбулентного смешения, характеризующий смешение вторичного воздуха с газовым потоком в результате турбулентного массообмена, $m_{ti} = \frac{\Delta G_{b,ti}}{G_{ti-1}}$; m_{ci} – коэффициент струйного смешения, характеризующий смешение

ние вторичного воздуха в результате проникновения струй в сносящий поток, $m_{ci} = \frac{G_{b.ci}}{G_{r_{i-1}}}$.

Уравнение баланса расхода газа запишется в следующем виде:

$$G_{ri} = G_{r_{i-1}}(1 + m_{ri} + m_{ci}).$$

Если принять, что начало расчетного сечения $i = 0$ соответствует расположению фронтального устройства, то $G_{r_{i-1}} = G_{фр}$, а последнее расчетное сечение – выходу из КС, тогда можно записать

$$\frac{G_i}{G_\Sigma} = \bar{F}_{фр} + \left(m_n + \sum_{i=1}^k m_{ci} \right),$$

где G_Σ – суммарный расход воздуха через жаровую трубу; $F_{фр}$ – раскрытие фронтального устройства; m_{ri}, m_{ci} – коэффициенты смешения; k – количество рядов основных отверстий. Предполагая, что при достаточной длине смесителя происходит полное смешение газового потока с вторичным воздухом, т.е. $\theta = 1$, а в реальных случаях при ограниченной длине смесителя общая неравномерность смешения определяется газовым потоком, не успевшим перемешаться с вторичным воздухом за время пребывания в КС, можно записать

$$\theta = 1 - \frac{G_i}{G_\Sigma} = 1 - \bar{F}_{фр} + \left(m_n + \sum_{i=1}^k m_{ci} \right).$$

С другой стороны, известно, что профили избыточной концентрации примесей подобны профилям избыточной температуры, следовательно, уровень несмешенности потока будет определять неравномерность полей температуры. При подводе тепла в поток, т.е. при горении смеси в потоке, возникает тепловое сопротивление, которое позволяет учитывать влияние на смешение подогрева потока, которое, согласно работам [1, 7], можно учитывать с помощью параметра $K_n = \left(\frac{T_r}{T_0} - 1 \right)^{0,5}$. Тогда получим

$$\begin{aligned} \theta_r &= \theta \left(\frac{T_r}{T_0} - 1 \right)^{0,5} = \\ &= \left(1 - \bar{F}_{фр} + m_n + \sum_{i=1}^k m_{ci} \right) \left(\frac{T_r}{T_0} - 1 \right)^{0,5}. \end{aligned}$$

Данное соотношение позволяет определить степень несмешения струй с газовым потоком и, соответственно, оценить неравномерность температурных полей на выходе из камеры сгорания. Если в данное уравнение подставить значения m_{ri}, m_{ci} , приведенные в работе [1], окончательно можно получить

$$\begin{aligned} \theta_r &= \left(1 - \bar{F}_{фр} + A_n \frac{T_3 W_0 F_i e^k}{T_0 W_3 F_m K} + \right. \\ &\left. + \sum_{i=1}^n A_c \frac{n_{oi} h_{oi} \left(d_{oi} + \frac{\text{tg}\psi}{2} h_{oi} \right) \cos\varphi}{F_{mi}} \right) \left(\frac{T_r}{T_0} - 1 \right)^{0,5}, \end{aligned}$$

где A_n, A_c – постоянные коэффициенты для данного типа КС (определяется из экспериментальных данных камер сгорания данного типа), $A_n = 0,9, A_c = 4,3; h_{oi}$ – глубина проникновения струи в поток (определяется по формулам, приведенным в работе [7]); F_m – миделева площадь жаровой трубы в i -м сечении; d_{oi}, n_{oi} – диаметр и количество отверстий в i -м ряду; F_{mi} – площадь жаровой трубы в миделевом сечении; ψ – угол расширения круглой струи, $10^\circ - 12^\circ$; φ – угол закрутки набегающего потока; n – количество рядов отверстий.

Коэффициент K для случая смешения в ЖТ определяется по формуле

$$K = \frac{R_{зав}^2}{A \left[(1 + \beta^2 \text{tg}^2\varphi)^{0,5} R_{тр} X \right]},$$

где A – коэффициент пропорциональности, $A = 0,7; \beta$ – коэффициент, учитывающий особенности конструкции завихрителя; φ – угол установки лопаток завихрителя; $R_{тр}$ – радиус ЖТ; $R_{зав}$ – наружный радиус завихрителя; φ – угол установки лопаток завихрителя.

При $r = 0$ и $x = l_k$ с помощью данного выражения можно оценить максимальную окружную неравномерность температурных полей по оси горелок.

Из анализа данной зависимости следует, что неравномерность температурных полей сложным образом зависит от многих режимных и конструктивных параметров. Например,

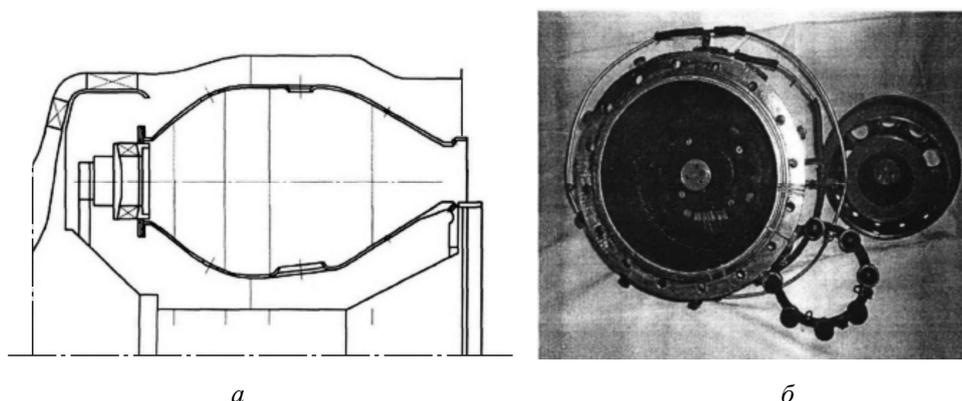


Рис. 1. Схема (а) и общий вид (б) камеры сгорания МД-120 прямоточного-кольцевого типа [11]

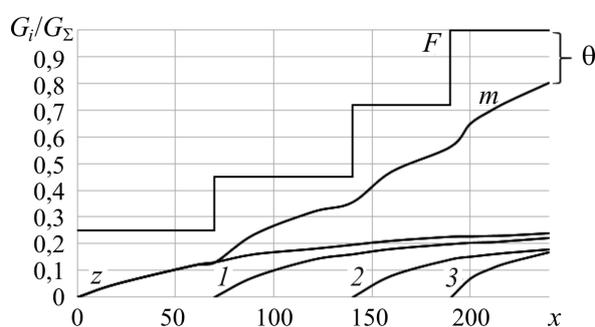


Рис. 2. Динамика изменения коэффициента смешения по длине камеры сгорания при $\alpha_{\Sigma} = 2$: n – полнота сгорания; F – относительный расход вторичного воздуха, рассчитанный по площадям; m – суммарное количество смешанного с потоком воздуха; θ – неравномерность температурного поля на выходе из КС; z – смешение в результате турбулентной диффузии; 1 – смешение в результате проникновения первого ряда струй; 2 – смешение в результате проникновения второго ряда струй; 3 – смешение в результате проникновения третьего ряда струй

увеличение степени раскрытия фронтального устройства, длины камеры, перепада на стенках жаровой трубы, т.е. скорости втекания струй, а также увеличение крутки потока приводит к уменьшению неравномерности θ_T . С другой стороны, повышение степени подогрева, т.е. температуры в зоне горения, способствует росту θ_T . Для подтверждения вышесказанного было проведено сопоставление приведенных аналитических зависимостей с экспериментальными данными работы [11], где объектом исследования была малоразмерная прямоточная кольцевая камера сгорания МД-120 (рис. 1).

Расчеты, проведенные с использованием рассмотренной модели смешения, позволили получить динамику процесса смешения по длине камеры сгорания. В качестве примера на рис. 2 приведены расчетные кривые θ , полученные с помощью специальной компьютерной программы [12].

Из представленных графиков видно, что коэффициент смешения m по длине камеры сгорания возрастает и на выходе образуется определенная величина m , которая характеризует степень смешения струй с потоком. Исходя из вышесказанного в дальнейшем расчетные значения коэффициента смешения позволяют найти и зависимости для θ .

В работах [10] и [11] исследовалось влияние коэффициента избытка на неравномерность температурного поля на выходе из КС. Результаты показаны на рис. 3.

Один из параметров, который влияет на качество смешения и, следовательно, на неравномерность температурного поля, – это коэффициент избытка воздуха, поэтому был проведен расчет влияния α_{Σ} на неравномерность температурного поля на выходе из КС (см. рис. 3, б).

На рис. 3, а представлены экспериментальные кривые зависимости θ от коэффициента избытка воздуха $\alpha_{фр}$. Как видно из графиков, наибольшая неравномерность достигается при $\alpha_{фр} = 0,9$, т.е. при максимальных температурах газового потока. На рис. 3, б представленные расчеты соответствуют эксперименту.

На рис. 3, б представлены расчетные кривые зависимости θ от коэффициента избытка воздуха $\alpha_{\text{фр}}$. Как видно из графиков, наибольшая неравномерность достигается при $\alpha_{\text{фр}} = 0,9 \div 1,0$, т.е. при максимальных температурах газового потока. Подтверждением этому являются экспериментальные данные, полученные в работе [11]. Как видно, кривые качественно согласуются друг с другом. Некоторые количественные различия объясняются рядом допущений, принятых в расчетах.

Другой важной зависимостью является определение оптимального значения соотношения F_0/F_k , при котором наблюдается минимальное значение неравномерности температурного поля (рис. 4). Подобные результаты были получены другими авторами [7, 10, 11, 13–17].

На графике (см. рис. 4) приведены результаты изменения неравномерности температурного поля в зависимости от раскрытия внутреннего смесителя. Можно отметить, что минимальная неравномерность наблюдается при

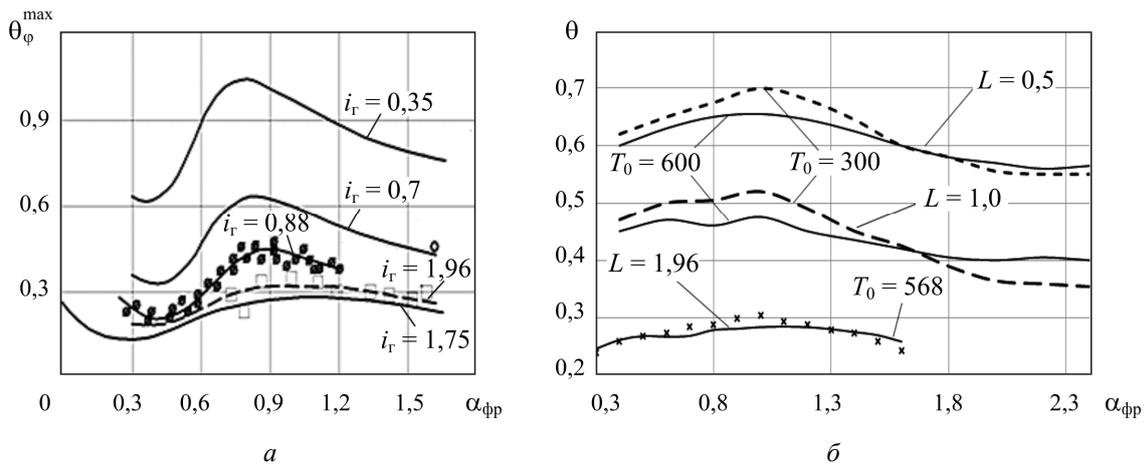


Рис. 3. Изменение экспериментальной и расчетной неравномерностей температурного поля в зависимости от коэффициента избытка воздуха $\alpha_{\text{фр}}$ при разных значениях длины смесителя камер сгорания различной конструкции: а – данные работы [11]; б – изменение расчетной и экспериментальной неравномерностей температурного поля на выходе из КС от $\alpha_{\text{фр}}$, $L = 1,96$:
 — расчетные данные ($T_k = 568 \text{ К}$, $P = 676 \text{ кПа}$, $G_b = 2,13 \text{ кг/с}$);
 × экспериментальные данные работы [11] ($T_k = 568 \text{ К}$, $P = 676 \text{ кПа}$, $G_b = 2,13 \text{ кг/с}$);
 $L = 0,5$ и $L = 1,0$ – данные работы [10]

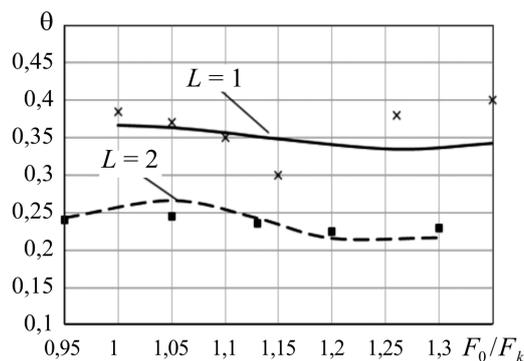


Рис. 4. Влияние раскрытия смесителя на неравномерность температурного поля на выходе из КС двигателя МД-120 (а): $L = 2$ – влияние раскрытия первичной зоны на неравномерность температурного поля на выходе из КС; --- расчетные данные ($T_k = 423 \text{ К}$, $P = 100 \text{ кПа}$, $G_b = 2,13 \text{ кг/с}$, $\alpha_\Sigma = 4,1$); ■ экспериментальные данные работы [11] ($T_k = 423 \text{ К}$, $P = 100 \text{ кПа}$, $G_b = 2,13 \text{ кг/с}$, $\alpha_\Sigma = 4,1$);
 $L = 1$ – влияние раскрытия зоны смешения на неравномерности температурного поля на выходе из КС; — расчетные данные ($T_k = 423 \text{ К}$, $P = 100 \text{ кПа}$, $G_b = 2,13 \text{ кг/с}$, $\alpha_\Sigma = 3,5$);
 × экспериментальные данные работы [11] ($T_k = 423 \text{ К}$, $P = 100 \text{ кПа}$, $G_b = 2,13 \text{ кг/с}$, $\alpha_\Sigma = 3,5$)

значениях соотношения $F_0/F_k = 1,2 \div 1,22$. Из графика видно, что результаты расчета и экспериментальных данных хорошо согласуются.

Можно отметить, что существуют оптимальные значения F_0/F_k , при которых получается минимальное значение неравномерности температурного поля.

Еще можно отметить, что с увеличением длины смесителя неравномерность темпера-

турного поля на выходе из камеры сгорания падает, доказательство этому результаты графиков (см. рис. 3, 4).

Таким образом, в работе найдены аналитические зависимости, позволяющие оптимизировать конструкцию смесителя в КС и распределение вторичного воздуха в ней с целью уменьшения неравномерности температурных полей на выходе из камеры сгорания.

Библиографический список

1. Мингазов Б.Г. Камеры сгорания газотурбинных двигателей. – Казань: Изд-во Казан. гос. техн. ун-та, 2006. – 220 с.
2. Процессы горения и автоматизированное проектирование камер сгорания ГТД и ГТУ / Б.Г. Мингазов, Ю.Б. Александров, А.В. Костерин, Ю.В. Токмовцев. – Казань: Изд-во Казан. гос. техн. ун-та, 2015. – 160 с.
3. Численная доводка полей температур газов на выходе из камеры сгорания газотурбинной установки / А.М. Сипатов, К.А. Шипов, А.Д. Нугуманов, Т.В. Абрамуж // Вестник Пермского национального исследовательского политехнического университета. Аэрокосмическая техника. – 2016. – № 46. – С. 40–55.
4. Гребенюк Г.П., Кузнецов С.Ю., Харитонов В.Ф. Исследование температурного поля на выходе камеры сгорания с поворотом потока в газосборнике // Вестник Самар. гос. аэрокосм. ун-та. – 2006. – № 1. – С. 48–53.
5. Нгуен Т.Д., Александров Ю.Б., Сулайман А.И. Анализ радиального поля неравномерности температуры на выходе из камеры сгорания перспективного авиационного двигателя // Процессы горения, теплообмена и экологии тепловых двигателей: XI Всерос. науч.-техн. конф. с междунар. участием, г. Самара, сентябрь 2019. – Самара, 2019. – С. 31–34.
6. Рудаченко А.В., Чухарева Н.В. Газотурбинные установки для транспорта природного газа: учеб. пособие. – 2-е изд., перераб. – Томск: Изд-во Том. политехн. ун-та, 2010. – 217 с.
7. Лефевр А.Х. Процессы в камерах сгорания ГТД: пер. с англ. – М.: Мир, 1986. – 566 с.
8. Гупта А., Лилли Д., Сайред Н. Закрученные потоки. пер. с англ. – М.: Мир, 1987. – 588 с.
9. Теория камеры сгорания / А.В. Григорьев, В.А. Митрофанов, О.А. Рудаков, Н.Д. Саливон; под ред. О.А. Рудакова. – СПб.: Наука, 2010. – 228 с.
10. Вафин И.И. Исследование процессов смешения и неравномерности температурного поля на выходе из камеры сгорания ГТД. – Казань, 2018. – 108 с.
11. Ланский А.М. Методы и средства повышения эффективности рабочего процесса камер сгорания малоразмерных ГТД. – Самара, 2014. – 283 с.
12. Программа одно- и двухмерного расчета и оптимизации камер сгорания газотурбинных двигателей (Combustion chamber 1D-2D): св-во о гос. регистрации программы для ЭВМ № 2016611770 / Александров Ю.Б., Мингазов Б.Г., Токмовцев Ю.В. – № 2015662645, поступл. 22.12.2015, рег. 10.02.2016.
13. Абрашкин В.Ю. Формирование полей температуры газа на выходе из камер сгорания малоразмерных ГТД: дис. ... канд. техн. наук. – Самара, 2006. – 152 с.
14. Расчет характеристик струйных течений газовых сред в камерах сгорания ГТД: электрон. учеб. пособие / С.Г. Матвеев, М.Ю. Орлов, В.Ю. Абрашкин, М.Ю. Анисимов, Н.С. Макаров, С.С. Матвеев. – Самара, 2011. – 108 с.
15. Спиридонов Ю.А., Галицкий Ю.Я. К расчету характеристик смешения при поперечной подаче струй // Процессы горения в потоке: межвуз. сб. – Казань, 1984. – С. 62–67.
16. Александров Ю.Б., Вафин И.И., Мингазов Б.Г. Исследование формирования температурных полей в камере сгорания газотурбинных двигателей // Инженерный журнал: наука и инновации. – 2018. – № 1 (73). – С. 9.
17. Абрашкин В.Ю. Исследование полей температур газа на выходе из камеры сгорания малоразмерных ГТД // Известия Самар. науч. центра РАН. – 2006. – Т. 8, № 4. – С. 136–141.

References

1. Mingazov B.G. Kamery sgoraniya gazoturbinnnykh dvigateley [Combustion chambers of gas turbine engines]. Kazan: KNITU-KAI Press, 2006, 220 p.
2. Mingazov B.G., Aleksandrov Yu.B., Kosterin A.V., Tokmoltsev Yu.V., Protsessy goreniya i Avtomatizirovannoye proyektirovaniye kamer sgoraniya GTD i GTU [Combustion processes and automated design of combustion chambers GTE and GTU teaching guide]. Kazan: KNITU-KAI Press, 2015. 160 p.
3. Sipatov A. M, Shipov K. A, Nugumanov A. D, Abramuzh T.V. Chislennaya dovodka poley temperatur gazov na vykhode iz kamery sgoraniya gazoturbinnoy ustanovki [Numerical refinement of gas temperature fields at the outlet of the combustion chamber of a gas turbine plant]. PNRPU Aerospace Engineering Bulletin, 2016, no. 46, pp. 40–55.
4. Grebenyuk G. P, Kuznetsov S. Yu, Kharitonov V.F. Issledovaniye temperaturnogo polya na vykhode kamery sgoraniya s povorotom potoka v gazosbornike [Study of the temperature field at the outlet of the combustion chamber with flow rotation in the gas collector]. Vestnik of Samara University. Aerospace and Mechanical Engineering, 2006, no. 1, pp. 48-53.
5. Nguyen T.D., Aleksandrov Yu.B., Sulaiman A.I. Analiz radialnogo polya neravnomernosti temperatury na vykhode iz kamery sgoraniya perspektivnogo aviatsionnogo dvigatelya [Analysis of the radial field of temperature unevenness at the exit from the combustion chamber of a promising aircraft engine]. “Protsessy goreniya, teploobmena i ekologii teplovykh dvigateley”, XI All-Russian scientific and technical conference with international participation September, Samara, 2019, pp. 31-34.
6. Rudachenko A.V. Gazoturbinnnyye ustanovki dlya transporta prirodnogo gaza: uchebnoye posobiye vtoroye izdaniye pererabotannoye: uchebnoye posobiye [Gas-turbine units for the transport of natural gas: a training manual; second edition; revised: a training manual]. Tomsk: Publishing house of Tomsk Polytechnic University, 2010, 217 p.
7. Lefevr A.Kh. Protsessy v kamerakh sgoraniya GTD [Processes in the combustion chambers of a gas turbine engine]: [trs. from English.]. Moscow: Mir, 1986, 566 p.
8. Gupta A., Lilli D., Sayred N. Zakruchennyye potoki [Swirling flow]: [trs. from English]. Moscow: Mir, 1987, 588 p.
9. Grigoryev A.V., Mitrofanov V.A., Rudakov O.A., Salivon N.D. Teoriya kamery sgoraniya [Theory of the combustion chamber]. St. Petersburg: Nauka, 2010, 228 p.
10. Vafin I.I. Issledovaniye protsessov smesheniya i neravnomernosti temperaturnogo polya na vykhode iz kamery sgoraniya GTD [Investigation of mixing processes and temperature field non-uniformity at the exit of the gas turbine combustion chamber]. Kazan, 2018, 108 p.
11. Lanskiy A.M. Metody i sredstva povysheniya effektivnosti rabocheho protsessa kamer sgoraniya malorazmernnykh GTD [Methods and means of increasing the efficiency of the working process of combustion chambers of small-sized gas turbine engines]. Samara, 2014, 283 p.
12. Aleksandrov Yu.B., Mingazov B.G., Tokmoltsev Yu.V. Svidetelstvo o gosudarstvennoy registratsii programmy dlya EVM № 2016611770 Programma odno- i dvukh- mernogo rascheta i optimizatsii kamer sgoraniya gazoturbinnnykh dvigateley [Certificate on state registration of a computer program No. 201611770 A program for one- and two-dimensional calculation and optimization of combustion chambers of gas turbine engines (Combustion chamber 1D-2D)], application No. 2015662645, received. 12/22/2015, register. 02/10/2016., Moscow.
13. Abrashkin V. Yu. Formirovaniye poley temperatury gaza na vykhode iz kamer sgoraniya malorazmernnykh GTD [Formation of gas temperature fields at the exit from the combustion chambers of small-sized gas turbine engines]. Bulletin of the Samara Scientific Center of the Russian Academy of Sciences, Samara, 2006, no. 4, 152 p.
14. S.G. Matveyev, M.Yu. Orlov, V.Yu. Abrashkin, M.Yu. Anisimov, N.S. Makarov, S.S. Matveyev. Raschet kharakteristik struynykh techeniy gazovykh sred v kamerakh sgoraniya GTD. Elektronnoye uchebnoye posobiye [Calculation of stream flows characteristics of gaseous atmosphere in combustion chambers of gas turbine engines. Electronic study guide]. Samara, 2011, 108 p.
15. Spiridonov Yu. A, Galitskiy Yu. Ya. K raschetu kharakteristik smesheniya pri poperechnoy podache struy. Protsessy goreniya v potoke, mezhvuzovskiy sbornik [To the calculation of mixing characteristics in the transverse flow of jets]. Combustion processes in a stream, interuniversity collection, Kazan, 1984, pp. 62-67.
16. Aleksandrov Yu.B, Vafin I.I, Mingazov B.G. Issledovaniye formirovaniye temperaturnykh poley v kamere sgoraniya gazoturbinnnykh dvigateley [Study the formation of temperature fields in the combustion chamber of gas turbine engines]. Engineering Journal: Science and Innovation, no. 1 (73), 2018, 9 p.

17. Abrashkin V. Yu. Issledovaniye poley temperatur gaza na vykhode iz kamery sgoraniya malorazmernykh GTD [Investigation of gas temperature fields at the exit from the combustion chamber of small-sized gas turbine engines]. Proceedings of the Samara Scientific Center of the Russian Academy of Sciences, 2006, vol. 8, no. 4, pp. 136-141.

Об авторах

Сулайман Али Исса (Казань, Россия) – аспирант кафедры «Реактивные двигатели и энергетические установки», КНИТУ – КАИ им. А.Н. Туполева (420111, г. Казань, ул. Карла Маркса, д. 10; e-mail: Armin.wrya@mail.ru).

Мингазов Биал Галавдинович (Казань, Россия) – доктор технических наук, профессор кафедры «Реактивные двигатели и энергетические установки», КНИТУ – КАИ им. А.Н. Туполева (420111, г. Казань, ул. Карла Маркса, д. 10; e-mail: BGMingazov@kai.ru).

Александров Юрий Борисович (Казань, Россия) – кандидат химических наук, доцент кафедры «Реактивные двигатели и энергетические установки», КНИТУ – КАИ им. А.Н. Туполева (420111, г. Казань, ул. Карла Маркса, д. 10; e-mail: Alexwischen@rambler.ru).

Нгуен Тхэ Дат (Казань, Россия) – аспирант кафедры «Реактивные двигатели и энергетические установки», КНИТУ – КАИ им. А.Н. Туполева (420111, г. Казань, ул. Карла Маркса, д. 10; e-mail: nguyenthedat1609@gmail.com).

About the authors

Ali I. Sulaiman (Kazan, Russian Federation) – PhD Student of Jet Engines and Power Plants Department, Kazan National Research Technical University named after A.N. Tupolev-KAI (10, Karl Marx st., Kazan, 420111, Russian Federation; e-mail: Armin.wrya@mail.ru).

Bilal G. Mingazov (Kazan, Russian Federation) – Professor, Doctor of Technical Sciences of Jet Engines and Power Plants Department, Kazan National Research Technical University named after A.N. Tupolev-KAI (10, Karl Marx st., Kazan, 420111, Russian Federation; e-mail: BGMingazov@kai.ru).

Yury B. Aleksandrov (Kazan, Russian Federation) – CSc in Chemistry Sciences, Associate Professor of Jet Engines and Power Plants Department, Kazan National Research Technical University named after A.N. Tupolev-KAI (10, Karl Marx st., Kazan, 420111, Russian Federation; e-mail: Alexwischen@rambler.ru).

The D. Nguyen (Kazan, Russian Federation) – PhD Student of Jet Engines and Power Plants Department, Kazan National Research Technical University named after A.N. Tupolev-KAI (10, Karl Marx st., Kazan, 420111, Russian Federation; e-mail: nguyenthedat1609@gmail.com).

Получено 05.02.2020