

## ВЛИЯНИЕ ДИАМЕТРА ТОПЛИВНЫХ ФОРСУНОК НА РАДИАЛЬНУЮ НЕРАВНОМЕРНОСТЬ ТЕМПЕРАТУРНОГО ПОЛЯ ГАЗА НА ВЫХОДЕ ИЗ КАМЕРЫ СГОРАНИЯ ГТД

А. А. КНЯЗЕВ<sup>1</sup>, А. А. ВАСИЛЬЕВ<sup>2</sup>, А. С. ГИШВАРОВ<sup>3</sup>

ArtKn1994@yandex.ru<sup>1</sup>

ФГБОУ ВО «Уфимский государственный авиационный технический университет» (УГАТУ)

**Аннотация.** При доводке и серийном производстве камер сгорания ГТД важным является вопрос обеспечения заявленного уровня неравномерности температурного поля газа (ТПГ) на выходе из камеры сгорания (КС) и на входе в турбину. В данной статье приведено исследование влияния диаметров отверстий форсунок в жаровой трубе КС на неравномерность ТПГ на выходе из КС. По результатам моделирования горения в КС с применением ПК ANSYS CFX были выбраны оптимальные значения параметров настройки ПК, при которой погрешность моделирования не превышала 4 %. Полученные по результатам исследования регрессионные уравнения связи диаметров форсунок с неравномерностью ТПГ позволяют определять значения диаметров, при которых радиальное ТПГ соответствует требованиям ТУ.

**Ключевые слова:** камера сгорания; температурное поле газа; диаметр топливных форсунок; регрессионные уравнения.

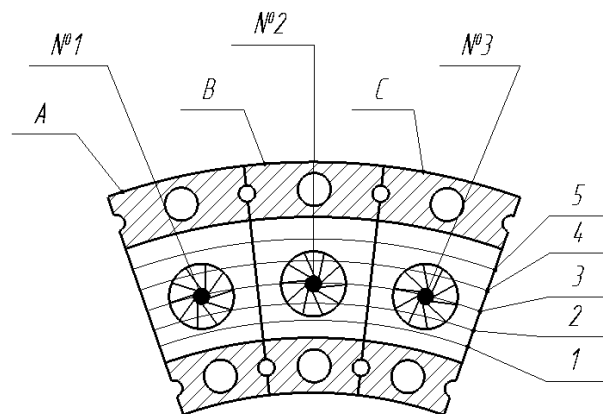
При доводке и серийном производстве камер сгорания ГТД важным является вопрос обеспечения заявленного уровня неравномерности температурного поля газа (ТПГ) на выходе из камеры сгорания (КС).

На неравномерность температурного поля газа, оцениваемой параметром  $\theta$ , влияют конструктивные параметры элементов КС и режимы работы ГТД. Например, известно, что увеличение степени раскрытия фронтального устройства  $\varepsilon$ , длины камеры  $l$ , перепада давления на стенках жаровой трубы  $\Delta P$ , а также закрутки потока  $\varphi$  приводят к уменьшению неравномерности ТПГ:

$$\theta = f(\varepsilon, l, \Delta P, \varphi). \quad (1)$$

В данной статье приведено исследование влияния диаметра отверстий форсунок: №1( $D_{1\phi}$ ), №2( $D_{2\phi}$ ), №3( $D_{3\phi}$ ) в жаровой трубе КС на неравномерность ТПГ на выходе из КС (рис. 1):

$$\theta = f(D_{1\phi}, D_{2\phi}, D_{3\phi}). \quad (2)$$



**Рис. 1.** Сектор камеры сгорания, включающий 3 секции: 1, 2, 3, 4, 5 – расчетные пояса; A, B, C – исследуемые области; №1, №2, №3 – номера и расположение форсунок

В камере сгорания ТРДД АЛ-31СТ расположены 28 топливных форсунок, диффузор и жаровая труба. Схема сектора, включающего три секции КС, приведена на рис. 2.

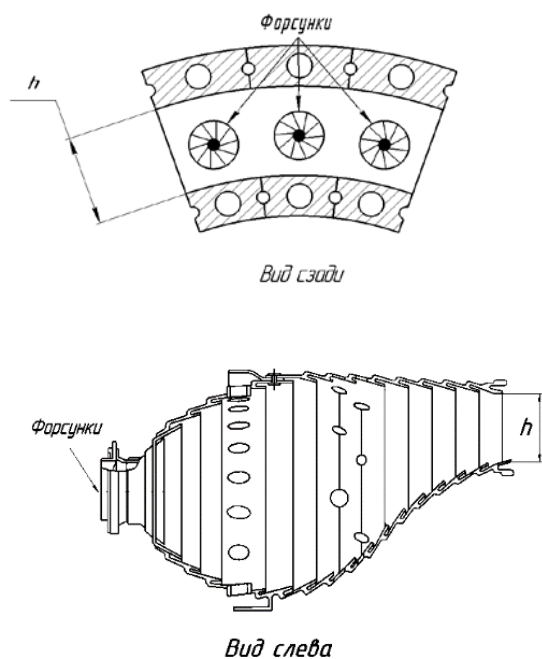


Рис. 2. Схема сектора кольцевой камеры сгорания двигателя АЛ-31СТ

Моделирование ТПГ в КС проводилось с применением программного комплекса NX 9.0, а газодинамические расчеты выполнялись с применением ПК ANSYS CFX.

После проведения расчетов и сравнения их с экспериментальными данными испытаний КС были выбраны оптимальные значения параметров настройки ПО ANSYS CFX, при которой погрешность моделирования не превышала 4 % [1]. Эпюра радиальной неравномерности ТПГ  $\theta_{рад j}^M$  по высоте канала на выходе из КС приведена на рис. 3.

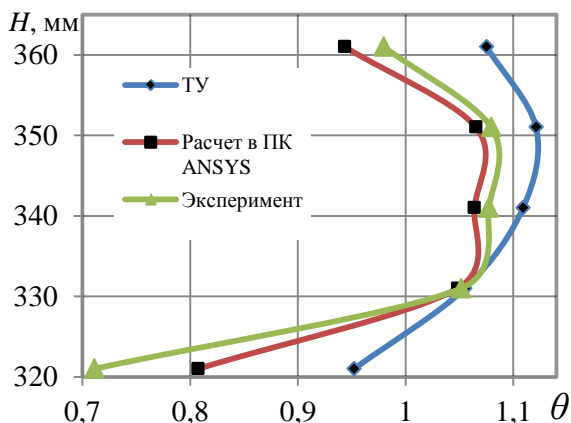


Рис. 3. Эпюра радиальной неравномерности ТПГ

Примечание: 1-й пояс H=320 мм, 2-ой пояс H=330 мм, 3-й пояс H=340 мм, 4-й пояс H=350 мм, 5-й пояс H=350 мм

По результатам моделирования ТПГ для 5-ти поясов (рис. 3) были определены значения констант регрессионных уравнений, описывающих связь неравномерности температурного поля газа с диаметрами форсунок ( $D_{1 ф.}, D_{2 ф.}, D_{3 ф.}$ ):

$$\theta_{рад. j}^{рег} = b_0 + b_1 \cdot D_{1 ф.} + b_2 \cdot D_{2 ф.} + b_3 \cdot D_{3 ф.} + b_{12} \cdot D_{1 ф.} \cdot D_{2 ф.} + b_{13} \cdot D_{1 ф.} \cdot D_{3 ф.} + b_{23} \cdot D_{2 ф.} \cdot D_{3 ф.} + b_{123} \cdot D_{1 ф.} \cdot D_{2 ф.} \cdot D_{3 ф.}; j = \overline{1,5}$$

Полный факторный эксперимент по моделированию ТПГ проводился для форсунки № 2, являющейся центральной по отношению к двум крайним форсункам №1 и №3 (рис. 1).

Коэффициенты уравнений регрессии (3) проверялись на значимость по t – критерию Стьюдента, а сами уравнения регрессии проверялись на адекватность по критерию Фишера [2].

Кодированные значения факторов в ПФЭ варьировались на 2-х уровнях: нижнем «-1» и верхнем «+1» (табл. 2), что соответствовало значениям диаметров форсунок:  $D_{ф min.} = 2,8$  мм;  $D_{ф max.} = 3,2$  мм. (табл. 1) Исходное значение диаметра форсунки по ТУ ( $D_{ф иск.}$ ) равно 3 мм.

Таблица 1

Значения диаметров форсунок в эксперименте

№ опыта	$D_{1 ф.}$ , мм	$D_{2 ф.}$ , мм	$D_{3 ф.}$ , мм
1	3,2	2,8	3,2
2	3,2	3,2	3,2
3	2,8	3,2	3,2
4	2,8	2,8	3,2
5	3,2	2,8	2,8
6	3,2	3,2	2,8
7	2,8	3,2	2,8
8	2,8	2,8	2,8

В качестве примера в табл. 2 приведена матрица и результаты машинного эксперимента для 1-го пояса ТПГ.

Матрица и результаты эксперимента для 1-го пояса форсунки

№ п/п	X <sub>1</sub>	X <sub>2</sub>	X <sub>3</sub>	X <sub>1</sub> ·X <sub>2</sub>	X <sub>1</sub> ·X <sub>3</sub>	X <sub>2</sub> ·X <sub>3</sub>	X <sub>1</sub> ·X <sub>2</sub> ·X <sub>3</sub>	θ <sub>рад j</sub> <sup>рег</sup>	θ <sub>рад j</sub> <sup>М</sup>	δ <sub>рад j</sub> <sup>рег</sup> , %
1	1	-1	1	-1	1	-1	-1	0,97	0,960	1,216
2	1	1	1	1	1	1	1	1,00	0,984	2,371
3	-1	1	1	-1	-1	1	-1	0,98	0,976	0,844
4	-1	-1	1	1	-1	-1	-1	0,97	0,975	0,465
5	1	-1	-1	-1	-1	1	1	0,95	0,970	1,441
6	1	1	-1	1	-1	-1	-1	0,99	0,999	0,664
7	-1	1	-1	-1	1	-1	1	0,98	0,984	0,110
8	-1	-1	-1	1	1	1	-1	0,96	0,963	0,567

Примечание: x<sub>i</sub> – кодированные значения диаметров D<sub>1φ</sub>, D<sub>2φ</sub> и D<sub>3φ</sub>

Погрешность регрессионных моделей для каждого опыта определялась по формуле:

$$\delta_{\text{рад } j}^{\text{рег}} = \frac{|\theta_{\text{рад } j}^{\text{рег}} - \theta_{\text{рад } j}^{\text{М}}|}{\theta_{\text{рад } j}^{\text{М}}} \cdot 100 \%, \quad j = \overline{1,8}, \quad (4)$$

где θ<sub>рад j</sub><sup>М</sup> – радиальная неравномерность по экспериментальным данным испытаний КС; θ<sub>рад j</sub><sup>рег</sup> – радиальная неравномерность, оцененная по регрессионной модели.

Общая погрешность по всем опытам:

$$\delta_{\text{рад ср.}} = \frac{\sum_{j=1}^n \delta_{\text{рад } j}^{\text{рег.}}}{n}, \quad \% \quad (5)$$

где n – количество экспериментов (n=8).

Погрешность оценки ТПГ для первого пояса:

$$\delta_{\text{рад } 1}^{\text{рег}} = 0,96 \%. \quad (6)$$

Таблица 3

Результаты регрессионной модели для 1-го пояса

Переменные	Коэф.	t-статистика	P-значение
Y(X <sub>0</sub> )	0,9791	190,9	0,003
X <sub>1</sub>	0,0026	0,519	0,694
X <sub>2</sub>	0,0125	2,443	0,247
X <sub>3</sub>	0,0042	0,827	0,559
X <sub>12</sub>	0,0054	1,066	0,479
X <sub>13</sub>	0,0034	0,665	0,626
X <sub>23</sub>	-0,00017	0,033	0,978

Табличное значение t-критерия Стьюдента t<sub>табл</sub> = 2,37 для уравнения значимости a=0,05 и количества независимых параметров m=7. Расчетное значение t = 2,44. Поскольку t > t<sub>табл</sub>, переменная X<sub>2</sub> является значимой.

После исключения из уравнения регрессии незначимых факторов вновь проводился эксперимент (табл. 4).

Таблица 4

Матрица результатов 8-ми опытов 1-го пояса ТПГ

№ п/п	X <sub>2</sub>	θ <sub>рад j</sub> <sup>М</sup>	θ <sub>рад j</sub> <sup>рег</sup>	δ <sub>рад j</sub> <sup>рег</sup> , %
1	-1	0,960	0,967	0,729
2	1	0,984	0,986	0,178
3	1	0,976	0,986	0,999
4	-1	0,975	0,967	0,820
5	-1	0,970	0,967	0,309
6	1	0,999	0,986	1,326
7	1	0,984	0,986	0,178
8	-1	0,963	0,967	0,415

Погрешность регрессионной модели:

$$\delta_{\text{рад } 1}^{\text{рег}} = 0,62 \%. \quad (7)$$

Уравнение регрессии для 1-го пояса

$$\theta_{\text{рад. } j}^{\text{рег}} = 0,976 + 0,0093 \cdot X_2. \quad (8)$$

Для данного уравнения табличное значение t-критерия Стьюдента t<sub>табл</sub> = 3,19 при уровне значимости a=0,05 и количестве независимых параметров m=1.

Погрешность оценки ТПГ для 1-го пояса:

$$\delta_{\text{рад } 1}^{\text{рег}} = 0,62 \%. \quad (9)$$

Таблица 5

**Результаты определения регрессионной модели в первом поясе**

Параметр	Коэф.	Стандартная ошибка	t-статистика	P-значение
$Y(X_0)$	0,8357	0,044	18,915	1,41
$D_{2 \text{ ф.}}$	0,0468	0,014	3,189	0,019

Табличное значение  $t$ -критерия Стьюдента  $t_{\text{табл}} = 3,19$  для  $\alpha = 0,05$  и  $m = 1$ .

После перехода от кодированных значений аргумента  $X_2$  к натуральному значению, уравнение, описывающее радиальную неравномерность ТПГ, приняло вид (табл. 5):

$$\theta_{\text{рад } 1}^{\text{рег}} = 0,836 + 0,0468 \cdot D_{2 \text{ ф.}} \quad (10)$$

Для 2-го пояса ТПГ было получено уравнение регрессии:

$$\theta_{\text{рад } 2}^{\text{рег}} = 1,329 - 0,205 \cdot D_{\text{ф.}1} - 0,178 \cdot D_{\text{ф.}2} + 0,065 \cdot D_{\text{ф.}3} + 0,078 \cdot D_{\text{ф.}1} \cdot D_{\text{ф.}2}. \quad (11)$$

(погрешность оценки равна  $\delta_{\text{рад } 2}^{\text{рег}} = 0,11 \%$ ).

Для 3-го пояса ТПГ было получено уравнение регрессии:

$$\theta_{\text{рад } 3}^{\text{рег}} = 0,563 + 0,121 \cdot D_{\text{ф.}2} + 0,047 \cdot D_{\text{ф.}3}. \quad (12)$$

(погрешность оценки равна  $\delta_{\text{рад } 3}^{\text{рег}} = 0,57 \%$ ).

Для 4-го пояса ТПГ было получено уравнение регрессии:

$$\theta_{\text{рад } 4}^{\text{рег}} = 0,817 + 0,076 \cdot D_{\text{ф.}2}. \quad (13)$$

(погрешность оценки равна  $\delta_{\text{рад } 4}^{\text{рег}} = 1,32 \%$ ).

Для 5-го пояса ТПГ было получено уравнение регрессии:

$$\theta_{\text{рад } 5}^{\text{рег}} = 0,65 + 0,006 \cdot (D_{\text{ф.}2} \cdot D_{\text{ф.}3}). \quad (14)$$

(погрешность оценки равна  $\delta_{\text{рад } 5}^{\text{рег}} = 0,48 \%$ ).

### ЗАКЛЮЧЕНИЕ

1. Применение ПО *ANSYS CFX* позволяет моделировать радиальную неравномерность ТПГ с погрешностью 4 %.

2. Наличие системы регрессионных уравнений вида (10-14) позволяет определять значения диаметров форсунок, при которых ТПГ соответствует требованиям ТУ.

### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Князев А. А. Моделирование горения в камере сгорания ГТД. Мавлютовские чтения: Всероссийская молодежная конференция УГАТУ – Уфа, 2018. – С. 65. [ A. A. Knyazev Simulation of combustion in the combustion chamber of GTE ]

2. Гишваров А. С., Агеев Г. К. Исследование авиационных силовых установок с применением планирования эксперимента: учеб. пособие. – Уфа: УГАТУ 2009. - 215 с. [ A. S. Gishvarov study of an aeronautical power plants with application of experiment planning ]

### ОБ АВТОРАХ

**КНЯЗЕВ Артур Анатольевич**, аспирант каф. АД.

**ВАСИЛЬЕВ Антон Александрович**, магистрант каф. АД.

**ГИШВАРОВ Анас Саидович**, д-р техн. наук, профессор зав. каф. АД.

### METADATA

**Title:** Influence of geometry of fuel injectors on the temperature field of gas at the exit of the combustion chamber of GTE

**Authors:** A. A. Knyazev<sup>1</sup>, A. A. Vasiliev<sup>2</sup>, A. S. Gishvarov<sup>3</sup>

**Affiliation:**

Ufa State Aviation Technical University (UGATU), Russia.

**Email:** <sup>1</sup> ArtKn1994@yandex.ru

**Language:** Russian.

**Source:** Molodezhnyj Vestnik UGATU (scientific journal of Ufa State Aviation Technical University), no. 2 (21), pp. 60-63, 2019. ISSN 2225-9309 (Print).

**Abstract:** When using GTE combustion chambers and their mass production, it is necessary to ensure the required level of irregularity of temperature polar gas (TPG) when operating in a combustion chamber (CC) and at the turbine inlet. This article presents a study - the position of the presence of the nozzle holes in the fried pipe. Simulation of combustion and gas flow was performed using ANSYS CFX. As a result, the modeling error did not exceed 4%. The results obtained in the form of regression equations connect the geometry of the injector with an uneven value.

**Key words:** combustion chamber, gas temperature fields, fuel injector geometry, regression equations

**About authors:**

**KNYAZEV, Artur Anatolyevich**, PhD Stud., Dept. of Aircraft Engines.

**VASILIEV, Anton Aleksandrovich**, master of the Dept. of Aircraft. Research in the field of resource and reliability of aircraft engines

**GISHVAROV, Anas Saidovich**, Doctor of technical Sciences, Associate Professor in the Department of Aircraft Engines., Ufa state aviation technical University