

ВЛИЯНИЕ ФОРМЫ ГОРЕЛОЧНОГО УСТРОЙСТВА НА НЕРАВНОМЕРНОСТЬ ТЕМПЕРАТУРНОГО ПОЛЯ КАМЕРЫ СГОРАНИЯ ПРИ РАЗЛИЧНЫХ РЕЖИМАХ РАБОТЫ ГТД

© 2016

А. Н. Маркушин главный конструктор, Казанское моторостроительное производственное объединение, AMarkushin@kmpo.ru

А. В. Бакланов ведущий инженер-конструктор отдела главного конструктора, Казанское моторостроительное производственное объединение, andreybaklanov@bk.ru

В статье описывается метод определения неравномерности температурного поля в условиях двигателя путём препарирования соплового аппарата. Представлены результаты температурной неравномерности для камеры сгорания с диффузорным насадком и конфузным насадком в горелочном устройстве. Дано описание конструкции камеры сгорания и горелочных устройств. Построены графики, характеризующие изменение окружной и радиальной неравномерности температурного поля в зависимости от режима работы газотурбинного двигателя (ГТД). Произведена оценка полученной неравномерности температурного поля при помощи параметров: максимальная неравномерность, максимальная радиальная неравномерность и максимальная окружная неравномерность температурного поля. Приведён сравнительный анализ полученных испытаний для двух камер сгорания с различным исполнением горелочного устройства. Сделаны выводы о влиянии горелочного устройства на неравномерность температурного поля.

Камера сгорания; эксперимент; исследование; температура; горелка; сопловой аппарат.

Цитирование: Маркушин А.Н., Бакланов А.В. Влияние формы горелочного устройства на неравномерность температурного поля камеры сгорания при различных режимах работы ГТД // Вестник Самарского университета. Аэрокосмическая техника, технологии и машиностроение. 2016. Т. 15, № 3. С. 90-98. DOI: 10.18287/2541-7533-2016-15-3-90-98

Известно, что лопатки рабочего колеса турбины во время работы ГТД подвергаются воздействию высокой температуры газа. При этом оптимально сформированная температурная эпюра на выходе из камеры сгорания, учитывающая возникающие напряжения на рабочих лопатках, играет важную роль в обеспечении надёжности ГТД.

В данной работе в качестве объекта исследования выбран авиапроизводный ГТД НК-16СТ (рис. 1), предназначенный для привода нагнетателя газоперекачивающего агрегата.



Рис. 1. Газотурбинный двигатель НК-16СТ

Необходимо отметить, что любое серьёзное изменение конструкции камеры сгорания так или иначе влияет на изменение неравномерности температурного поля на выходе из жаровой трубы. Поэтому внедрение мероприятий по установке конструкции нового горелочного устройства должно сопровождаться исследованиями по определению неравномерности температурного поля.

Для определения влияния формы насадка горелочного устройства (рис. 2) на неравномерность температуры на стенде ОАО «КМПО» было проведено измерение поля температур за камерой сгорания для различных режимов работы ГТД. В составе двигателя была установлена серийная камера сгорания, имеющая диффузорный насадок горелки, а после испытаний – камера сгорания с конфузурным насадком в горелке [1].

В данной работе определение неравномерности температурного поля производилось непосредственно в двигателе, путём препарирования соплового аппарата (рис. 3). Для измерения температуры на лопатках препарированного соплового аппарата установлено 158 хромель-алюмелевых термопар, образующих пять контрольных поясов. Измерение температур производилось в диапазоне $0...1100^{\circ}\text{C}$ с погрешностью $\pm 1\%$ при доверительной вероятности $P = 0,95$. В результате эксперимента было получено поле окружной неравномерности температурного поля на режимах работы ГТД НК-16СТ от 8 до 20 МВт.

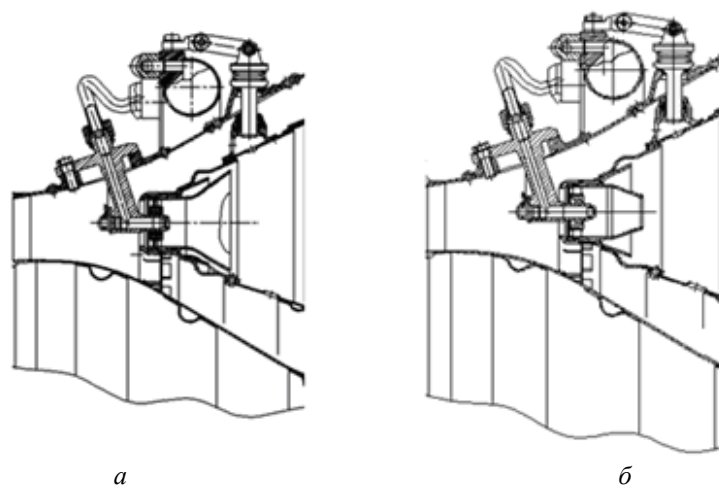


Рис. 2. Горелочное устройство серийной (а), модернизированной (б) камер сгорания

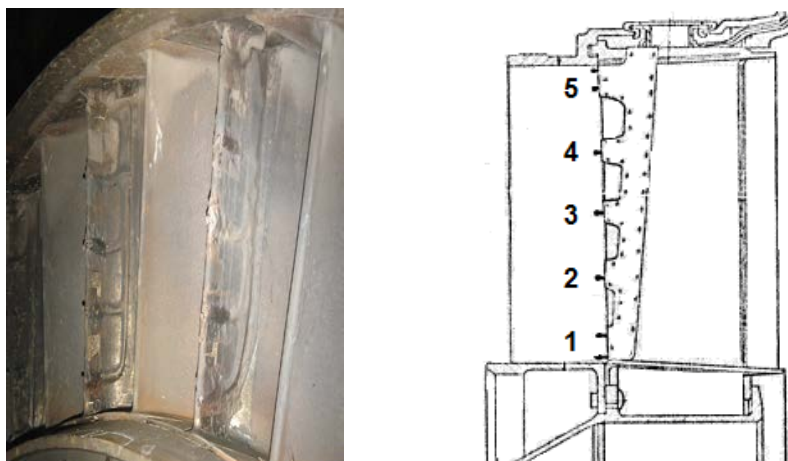


Рис. 3. Препарированный сопловой аппарат

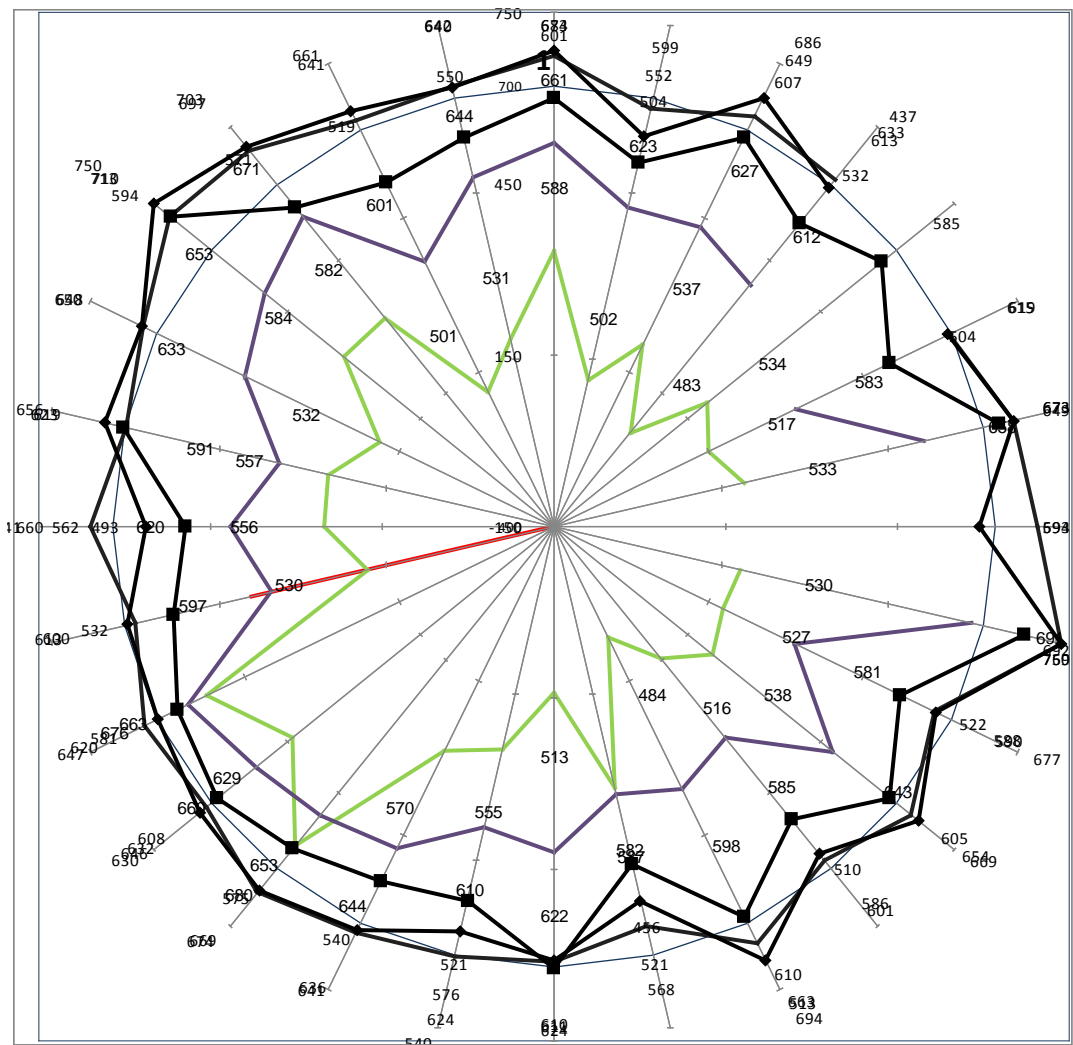


Рис. 4. Окружное поле температур

По результатам обработки экспериментальных данных формируется окружное поле абсолютных значений измеренной температуры t_{4i} по всем пяти поясам (рис. 4).

В процессе обработки параметров температурного поля на первом этапе определяется максимальная $t_{4\max i}$, °С и минимальная $t_{4\min i}$, °С температуры для каждого из пяти поясов, на которых размещены термопары. На следующем этапе рассчитывается средняя температура продуктов сгорания $t_{4срi}$, °С для каждого измеряемого пояса и средняя температура $t_{4ср}$, °С для всего выходного сечения камеры сгорания по формулам:

$$t_{4срi} = \sum_{i=1}^{i=158} t_{4i} / 158, \quad (1)$$

$$t_{4ср} = \sum_{i=1}^{i=5} t_{4срi} / 5. \quad (2)$$

Параллельно с этим определяются максимальное $\Delta t_{4\max i} = t_{4\max i} - t_{4срi}$, (°С) и минимальное $\Delta t_{4\min i} = t_{4\min i} - t_{4срi}$ (°С) отклонения температуры в каждом поясе измерения от

средней температуры в этом поясе $t_{4cp.i}$, °С. Далее значения средней температуры в поясах измерения $t_{4cp.i}$, °С и значение средней температуры t_{4cp} , °С для всего выходного сечения камеры пересчитываются в значения, соответствующие температурной шкале Кельвина (К) по формулам:

$$T_{4cp.i} = t_{4cp.i} + 273,15, \quad (3)$$

$$T_{4cp} = t_{4cp} + 273,15. \quad (4)$$

Полученные значения средней температуры $T_{4cp.i}$, К для каждого пояса и средней температуры T_{4cp} , К для всего выходного сечения камеры используются при расчёте относительной температуры продуктов сгорания $\bar{T}_{4cp.i}$ в соответствующем поясе по формуле:

$$\bar{T}_{4cp.i} = \frac{T_{4cp.i}}{T_{4cp}}. \quad (5)$$

На заключительном этапе расчёта параметров температурного поля на выходе камеры в каждом поясе измерения определяются средний относительный подогрев продуктов сгорания $\theta_{cp.i}$, максимальный относительный подогрев $\theta_{max.i}$ и неравномерность температурного поля $\Delta\theta$.

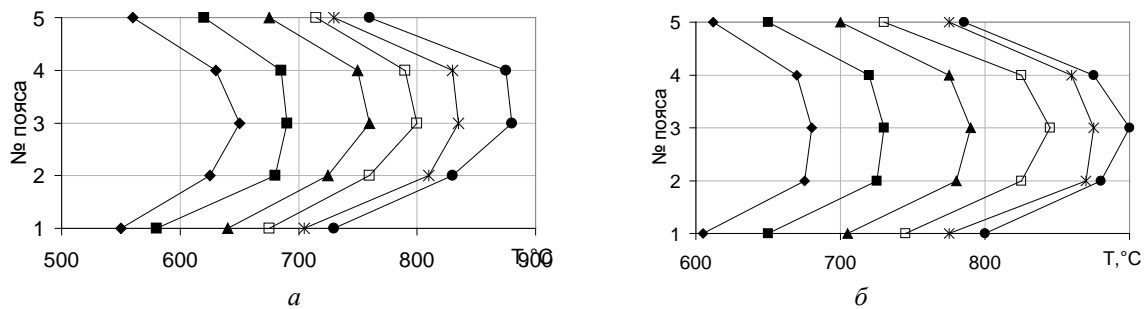


Рис. 5. Радиальная эпюра в абсолютных значениях:
а – диффузорный насадок; б – конфузорный насадок.
Режим: ♦ – 0,5N; ■ – 0,65N; ▲ – 0,8N; □ – N; * – 1,1N; ● – 1,2N

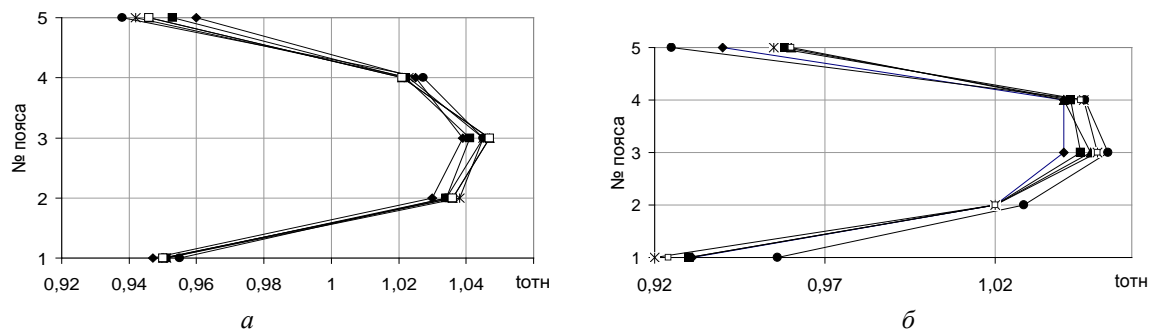


Рис. 6. Радиальная эпюра в относительных значениях:
а – диффузорный насадок; б – конфузорный насадок.
Режим: ♦ – 0,5N; ■ – 0,65N; ▲ – 0,8N; □ – N; * – 1,1N; ● – 1,2N

На рис. 5, 6 показаны радиальные эпюры распределения температур для двух типов камер сгорания на различных режимах работы двигателя. С увеличением режима наблюдается рост температуры и подобие кривых на выходе из камеры. В камере сгорания с конфузурной горелкой наблюдается более высокая температура в 3-м поясе.

Это позволяет считать, что конфузурная форма горелочного устройства формирует в жаровой трубе более горячее ядро потока, что сказывается на радиальной эпюре и неравномерности температур в целом. Эпюры в относительных значениях для каждого режима практически совпадают.

В камере сгорания с конфузурной горелкой также наблюдается более выраженное максимальное и минимальное отклонения температуры по сравнению с серийной камерой (рис. 7).

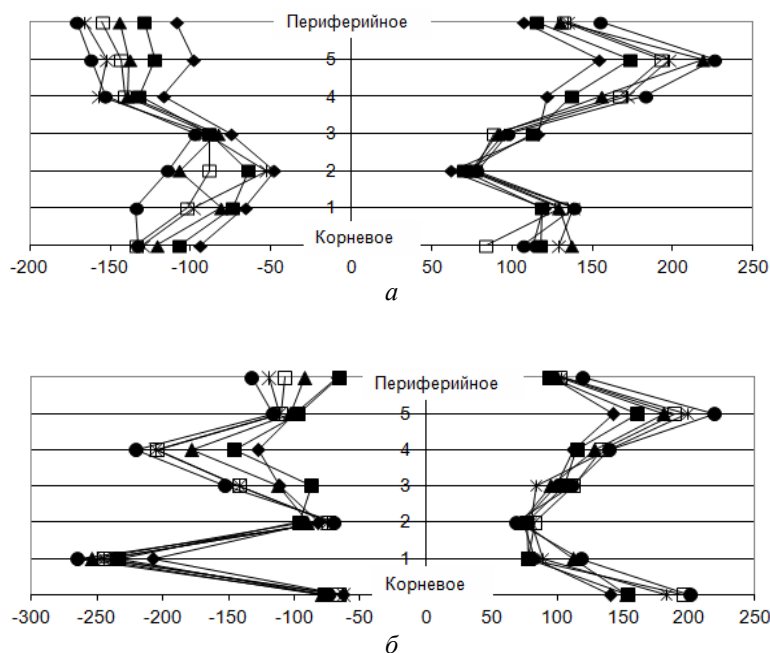


Рис. 7. Максимальное и минимальное отклонения температуры в каждом поясе от средней температуры в этом поясе: а – диффузорный насадок; б – конфузурный насадок. Режим: ♦ – 0,5N; ■ – 0,65N; ▲ – 0,8N; □ – N; * – 1,1N; ● – 1,2N

По-видимому, это связано с интенсификацией турбулентного потока за счёт увеличения скорости на выходе из конфузурной горелки, что приводит к увеличению отклонения температур от среднего значения. При этом с увеличением режима работы двигателя наблюдается рост данных отклонений.

Согласно работе [2] основными параметрами, характеризующими неравномерность температурного поля, являются:

максимальная неравномерность поля

$$\Theta_{\max} = \frac{T_{\max}^* - T_K^*}{T_{\Gamma}^* - T_K^*}, \quad (6)$$

где \bar{T}_r^* – среднеарифметическая температура по всему полю; T_{\max}^* – максимальная температура в поле T_r^* ; T_K^* – температура на входе в камеру сгорания;
 максимальная радиальная неравномерность поля

$$\Theta_{h\max} = \frac{T_{j\max}^* - T_K^*}{\bar{T}_r^* - T_K^*}, \quad (7)$$

где $T_{j\max}^*$ – максимальная из средних температур в радиальной эпюре поля T_r^* ;
 максимальная окружная неравномерность поля

$$\Theta_{u\max} = \frac{T_{\max}^* - \bar{T}_j^*}{\bar{T}_r^* - T_K^*}, \quad (8)$$

где \bar{T}_j^* – средняя температура по поясу, где находится T_{\max}^* .

Поэтому данные параметры вполне приемлемы в качестве оценочных для обработки полученных в составе двигателя температурных полей.

В результате проведённых экспериментов, как показано выше, получены поля неравномерности температуры на выходе из камеры на различных режимах работы ГТД НК-16СТ. Данные по температурным полям для каждого режима работы ГТД были обработаны в соответствии с представленными выше зависимостями. Предложено несколько способов представления зависимостей, характеризующих неравномерность температурного поля за камерой сгорания. Для построения характеристик, привязанных к конкретному двигателю, можно отразить влияние любого режимного параметра двигателя на поле температур. Например, построить зависимость Θ_{\max} от N_e (рис. 8).

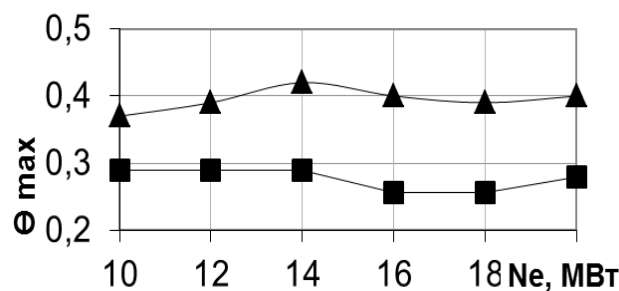


Рис. 8. Зависимость максимальной неравномерности поля от мощности установки с камерой сгорания, имеющей: ■ – диффузорный насадок; ▲ – конфузорный насадок

Если необходимо построить обобщённую интегральную зависимость без привязки к конкретному двигателю, можно использовать следующие ниже параметры [3].

Параметр объёмной теплонапряжённости, который характеризует эффективность использования объёма жаровой трубы:

$$Q_v = \frac{G_r H_u \eta_r}{V_{ж} P_K^*}, \quad (9)$$

где G_T – расход топлива; H_u – теплотворная способность; η_T – полнота сгорания; $V_{ж}$ – объём жаровой трубы; P_K^* – давление воздуха перед камерой сгорания.

Тогда зависимость $\Theta_{u \max}$ от Q_v примет вид (рис. 9). Откуда видно, что с увеличением объёмной теплонапряжённости параметр максимальной окружной неравномерности остаётся постоянным, и для камеры с конфузورной горелкой он на 10% выше, чем для серийной камеры.

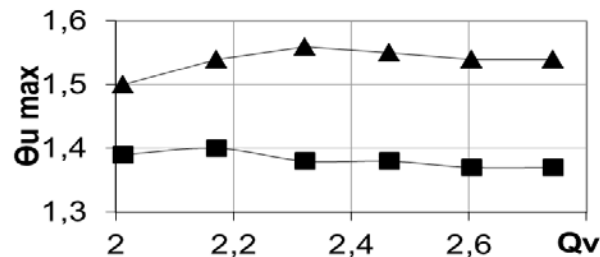


Рис. 9. Зависимость максимальной окружной неравномерности поля от объёмной теплонапряжённости камеры сгорания, имеющей:
 ■ – диффузорный насадок; ▲ – конфузорный насадок

Параметр форсирования, интерпретируемый как отношение времени химической реакции ко времени пребывания смеси в жаровой трубе:

$$k_v = \frac{G_K}{\bar{P}_K^{*1,25} T_K^* V_{ж}}, \quad (10)$$

где G_K – расход воздуха через жаровую трубу.

Тогда зависимость $\Theta_{h \max}$ от k_v примет вид (рис. 10). Видно, что с увеличением объёмного параметра форсирования максимальная радиальная неравномерность возрастает – для камеры с конфузорной горелкой она на 6% выше, чем для серийной камеры.

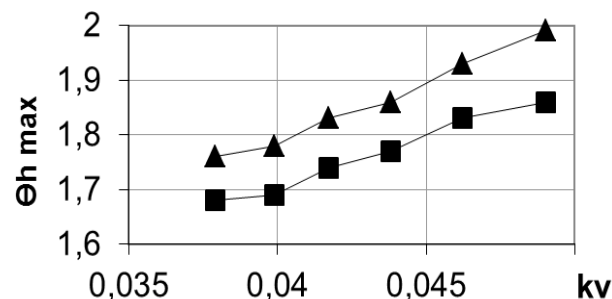


Рис. 10. Зависимость максимальной радиальной неравномерности поля от параметра форсирования камеры сгорания, имеющей:
 ■ – диффузорный насадок; ▲ – конфузорный насадок

Разработанный и внедрённый способ определения неравномерности температурного поля на выходе из камеры сгорания в составе двигателя позволил установить следующее.

1. На выходе из камеры сгорания с конфузторным насадком наблюдается более высокая окружная и радиальная неравномерности температурного поля на всех режимах работы ГТД по сравнению с серийным вариантом.

2. С увеличением режима работы двигателя, а также параметра форсирования, максимальная радиальная неравномерность температурного поля возрастает.

3. Максимальная окружная неравномерность поля с увеличением режима работы ГТУ и объёмной теплонапряжённости практически не меняется.

Библиографический список

1. Маркушин А.Н., Бакланов А.В., Цыганов Н.Е. Влияние конструкции горелочного устройства на характеристики камеры сгорания ГТД, работающей на газообразном топливе // Вестник Самарского государственного аэрокосмического университета им. академика С.П. Королёва (национального исследовательского университета). 2011. № 3(27), часть 1. С. 35-38.

2. Ковылов Ю.Л., Пашков Д.Е., Диденко А.А., Абрашкин В.Ю. Способ осреднения и оценки неравномерности поля температур газа на выходе из камеры сгорания ГТД // Сб. статей «Процессы горения, теплообмена и экология тепловых двигателей». Самара: Самарский государственный аэрокосмический университет, 1998. С. 202-211.

3. Ковылов Ю.Л., Лукачев С.В., Цыганов А.М. Элементы методологии проектирования и теории камеры сгорания ГТД, ГТУ // Сб. статей «Процессы горения, теплообмена и экология тепловых двигателей». Самара: Самарский государственный аэрокосмический университет, 1998. С. 165-189.

INFLUENCE OF THE BURNER FORM ON THE COMBUSTION CHAMBER OUTLET TEMPERATURE FIELD RIPPLE FOR DIFFERENT MODES OF OPERATION OF GAS TURBINE ENGINES

© 2016

A. N. Markushin Chief Designer of the Joint-Stock Company «Kazan Motor Production Association», Kazan, Russian Federation, AMarkushin@kmpo.ru

A. V. Baklanov leading design engineer of the Chief Designer Department, Joint-Stock Company «Kazan Motor Production Association», Kazan, Russian Federation, andreybaklanov@bk.ru

This article describes a method of identifying combustion chamber temperature field ripple by the preparation of the set of nozzles in the engine. It shows combustion chamber temperature field ripple with a divergent nozzle and a convergent one used in the burner. The design of the combustion chamber and that of the burners are described. Diagrams are plotted that show variation in circular and radial temperature field ripple depending on the engine behavior. The combustor exit temperature field non-uniformity is assessed using such parameters as the overall temperature distribution factor, the radial temperature distribution factor and the circumferential temperature distribution factor. Comparative analysis of the results of testing two combustion chambers with different modifications of burners is carried out. Conclusions about the effect of the burner design on the temperature field ripple are made.

Combustion chamber; experiment; research; temperature; burner; nozzle.

Citation: Markushin A.N., Baklanov A.V. Influence of the burner form on the combustion chamber outlet temperature field ripple for different modes of operation of gas turbine engines. *Vestnik of Samara University. Aerospace and Mechanical Engineering*. 2016. V. 15, no. 3. P. 90-98. DOI: 10.18287/2541-7533-2016-15-3-90-98

References

1. Markushin A.N., Baklanov A.V., Tsyganov N.E. The influence of burner design on the characteristics of the combustion chamber with gaseous fuels. *Vestnik of the Samara State Aerospace University*. 2011. No. 3(27), part 1. P. 35-38. (In Russ)
2. Kovylov Yu.L., Pashkov D.E., Didenko A.A., Abrashkin V.Yu. Method of averaging and assessment of the gas temperature field ripple at the output of a gas turbine engine combustion chamber. *Sb. statey «Protsessy goreninya, teploobmena i ekologiya teplovykh dvigateley»*. Samara: Samara State Aerospace University Publ., 1998. P. 202-211. (In Russ.)
3. Kovylov Yu.L., Lukachev S.V., Tsyganov A.M. Elements of the methodology of theory and design of gas turbine engine combustion chamber. *Sb. statey «Protsessy goreninya, teploobmena i ekologiya teplovykh dvigateley»*. Samara: Samara State Aerospace University Publ., 1998. P. 165-189. (In Russ.)