

## ОСОБЕННОСТИ ФОРМИРОВАНИЯ ПОЛЕЙ ТЕМПЕРАТУРЫ ГАЗА НА ВЫХОДЕ ИЗ КАМЕР СГОРАНИЯ МАЛОРАЗМЕРНЫХ ГАЗОТУРБИННЫХ ДВИГАТЕЛЕЙ

© 2010 А. М. Ланский, С. В. Лукачѐв, С. Г. Матвеев

Самарский государственный аэрокосмический университет имени академика С. П. Королѐва (национальный исследовательский университет)

Рассматриваются результаты исследований аэродинамической структуры течения и гидравлических потерь в камерах сгорания малоразмерных газотурбинных двигателей (ГТД). Представлено влияние конструктивных и режимных параметров на характеристики выходного поля температуры газа (ПТГ).

*Камера сгорания, поле температур, остаточная закрутка, гидравлическое сопротивление, начальная неравномерность, раскрытие жаровой трубы.*

Если в большинстве существующих полноразмерных камер сгорания (КС) обтекание жаровой трубы, как правило, «симметричное», то в КС малоразмерных ГТД (МГТД) – более сложное, что приводит к дополнительным потерям полного давления во внутреннем кольцевом канале и, следовательно, к разнице статических давлений на обечайках жаровой трубы [1, 2].

Так, например, для КС двигателя МД-120 расход воздуха, поступающего в наружный канал, зависит от приведѐнной скорости потока, в то время как через внутренний смеситель остается практически постоянным. Это объясняется тем, что увеличиваются потери полного давления на поворот потока во внутренний канал.

На рис. 1 приведено влияние раскрытия жаровой трубы (в данном случае за счёт уменьшения площади  $F_{CM}^H$ ) на характеристики КС двигателя МД-120. При распределении воздуха по смесителям согласно рекомендациям для проектирования полноразмерных КС  $\Sigma F_0/F_K = 1,30 \dots 1,34$ , для малоразмерных камер сгорания возникает высокий уровень неравномерности выходного поля температур газа ( $\Theta_\phi^{max} \approx 0,35 \div 0,37$ ;  $\Theta_h^{max} \approx 1,17$ ), нагар на стенке жаровой трубы.

Как показывают исследования, минимальная окружная и радиальная неравномерности соответствуют примерно равным расходам воздуха через наружный и внутренний смесители.

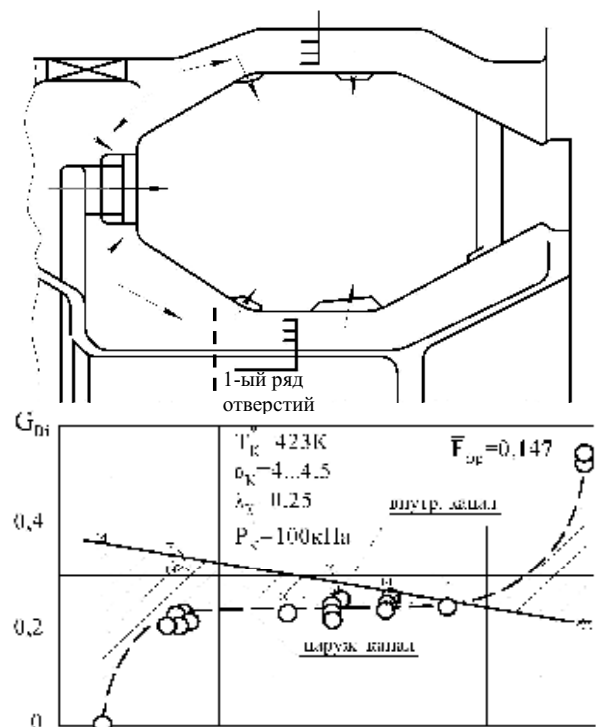


Рис. 1. Схема камеры сгорания малоразмерного ГТД и влияние раскрытия жаровой трубы на расходные характеристики

$G_{B\Sigma}$  – суммарный расход воздуха,  $\sigma$  – коэффициент потерь полного давления,  $\bar{G}_B$  – относительный расход воздуха,  $\bar{G}_B^{ПЗ}$ ,  $\bar{G}_B^{ФР}$ ,  $\bar{G}_B^{1Р}$  – относительный расход воздуха в первичную зону, фронтное устройство и первый ряд отверстий,  $T_K^*$  – температура воздуха на входе в КС,  $\alpha_K$  – коэффициент избытка воздуха,  $P_K^*$  – давление воздуха в КС,  $\lambda_K$  – приведѐнная скорость на входе в КС,  $\bar{F}_0 = \Sigma F_0 / F_K$  – отношение суммы площадей отверстий в жаровой трубе к площади на входе в КС (раскрытие жаровой трубы).

Так как наружная обечайка жаровой трубы камер сгорания малоразмерных ГТД «работает» под избыточным перепадом давления, то можно предположить, что любые неравномерности потока на выходе из диффузора прежде всего оказывают влияние именно на характеристики ПТГ в окружном направлении.

В качестве примера приведено влияние остаточной закрутки потока  $\varphi_{ост}$  на уровень  $\Theta_{\phi}^{max}$  для камеры сгорания двигателя МД-120 (рис. 2).

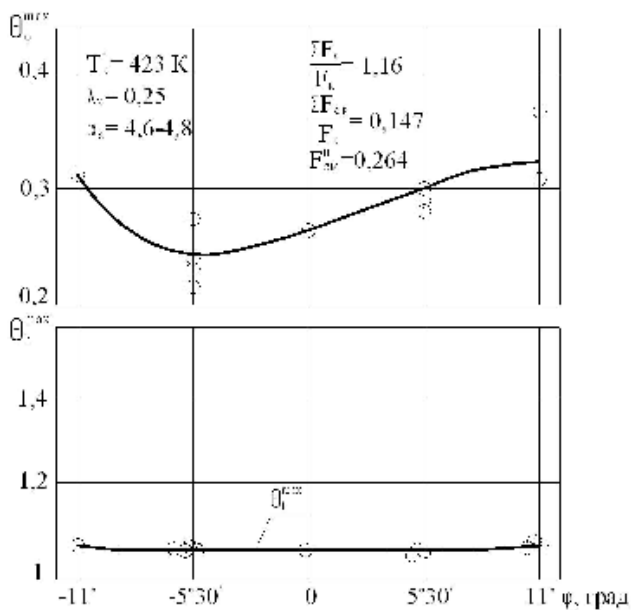


Рис. 2. Влияние остаточной закрутки на выходе из компрессора на характеристики выходного поля температуры газа камеры сгорания двигателя МД-120  
 - O - результаты эксперимента

Минимальное значение  $\Theta_{\phi}^{max} \approx 0,22 \dots 0,24$  достигается при смещении отверстий смесителя относительно первого ряда на наружной обечайке жаровой трубы на угол  $\varphi \approx 17^\circ (11^\circ + 5^\circ 30')$  от исходной компоновки, что примерно равно  $\varphi_{ост} = 17^\circ$ . В такой конструкции реализуется «шахматное» расположение струй первого ряда и наружного смесителя, которое способствует более интенсивному перемешиванию и выравниванию характеристик поля температуры газа в окружном направлении.

Известно, что при заданной длине жаровой трубы неравномерность поля температуры газа на выходе из камеры сгорания и гидравлические потери в ней определяются следующими относительными геометрическими параметрами:  $\Sigma F_{\phi}/F_{ж}$ ,

$F_{KK}/\Sigma F_{\phi}$ ,  $\Sigma F_{\phi}$ ,  $F_{\phi P}/\Sigma F_{\phi}$  и степенью подогрева газа. Повышение потерь в жаровой трубе путём уменьшения эффективной площади отверстий является инструментом конструктора для обеспечения требуемых характеристик камеры ( $\Theta_{\phi}^{max}$ ,  $\Theta_h^{max}$ ,  $\eta_T$ ). Поэтому ещё на стадии эскизного проектирования необходимо иметь интегральные модели, позволяющие с достаточной точностью оценивать потери полного давления ( $\zeta_K$  или  $\sigma_K$ ).

Проведённые исследования показывают, что известные модели применительно к малоразмерным камерам сгорания рассматриваемых схем дают погрешность в определении коэффициента гидравлических потерь до 150...200%.

Поэтому на основе анализа и обобщения имеющихся экспериментальных данных разработана уточнённая модель расчёта коэффициента гидравлического сопротивления для геометрически подобных камер сгорания МГТД (для  $G_B = 0,3 \dots 2,5$  кг/с):

$$\zeta_K = \zeta_D + K_F \left[ \zeta_0 \left( \frac{F_K}{\mu F_0} \right)^2 + \zeta_T \right],$$

$$\zeta_D = K_1 \times K_2 \times \left( 1 - \frac{1}{c \times \Pi_D} \right)^2, \quad K_F = f(\Sigma F_{\phi}/F_K),$$

$$\zeta_T = k_{AT} \left( \frac{F_K}{F_{ж}} \right)^2 \left( \frac{T_{Г}^*}{T_K^*} - 1 \right),$$

$$K_{AT} = 26,94 \times \exp[-10,12(F_K/F_{ж})].$$

В работе [3] приведены рекомендуемые значения коэффициентов  $K_1$ ,  $K_2$ ,  $K_F$  для исследуемых схем КС МГТД. Поправочный коэффициент  $K_{AT}$  учитывает форму жаровой трубы и неравномерность полей  $T_{Гi}^*$  и  $W_{Гi}^*$  в зависимости от отношения  $F_K/F_{ж}$ . Для КС МГТД  $K_{AT} \approx 1 \dots 8$  ( $K_{AT} = 0,5 \dots 2,5$  – ПКС). Коэффициент  $K_F$  учитывает схему КС (прямоточная, противоточная или трубчатокольцевая). На рис. 3 дано сравнение расчётных и экспериментальных значений  $\zeta_K$ . Погрешность определения гидравлических потерь для геометрически подобных КС не превышает  $\pm 5,5\%$ .

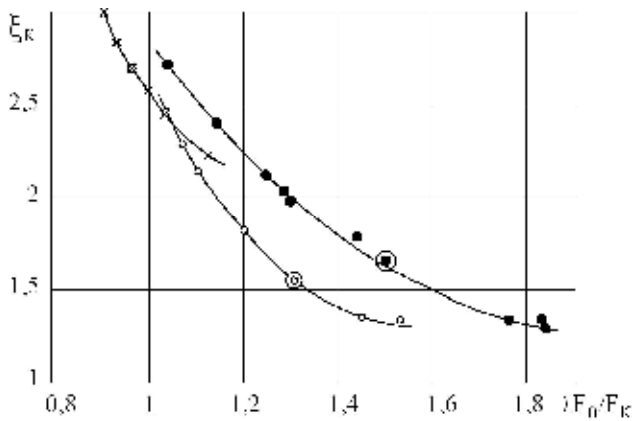


Рис. 3. Зависимость  $\xi_K$  от отношения  $\Sigma F_\phi / F_K$  для исследуемых вариантов КС МГТД  
 -о- КС двигателя МД-120; -●- КС двигателя МД-45;  
 -х- КС двигателя ВД-100

Исследование влияния геометрических параметров КС на выходное поле температур проводилось в несколько этапов. На первом этапе изучалось влияние площадей фронтального устройства ( $\bar{F}_{\phi P} = F_{\phi P} / F_K$ ), первого ряда отверстий  $\bar{F}_{1P}$ , наружного смесителя  $\bar{F}_{CM}^H$ . После выбора оптимальных вариантов исследовалось влияние размерности и конструкции фронтального устройства, раскрытия внутренней обечайки, неравномерности распределения топлива по форсункам и условий течения в каналах на поля температур.

Для исключения индивидуальных различий жаровых труб испытания проводились на нескольких вариантах исследуемых камер сгорания с многократным дублированием измерений после переборки.

Проведённые исследования показали, что изменение аэродинамической структуры течения и состава топливно-воздушной смеси в первичной зоне оказывает весьма существенное влияние на неравномерность температурного поля камеры. Благодаря этому появляется реальная возможность воздействия на  $\theta_\phi^{max}$  и  $\theta_h^{max}$  с помощью режима работы первичной зоны, что можно использовать при доводке и совершенствовании существующих и создании новых камер сгорания.

Формирование равномерного сносящего потока зависит от организации рабочего процесса в зоне горения, т.е. от

шага между форсунками, равномерности распределения топлива и воздуха по объёму жаровой трубы и завершённости процесса горения в первичной зоне.

Одной из причин увеличения уровня неравномерности поля температур на выходе из КС является неравномерное распределение топлива по форсункам. Подтверждением этого служит зависимость  $\theta_\phi^{max}$ ,  $\theta_h^{max}$  от начальной неравномерности распределения топлива, полученная в результате обобщения экспериментальных данных (рис. 4), где  $K_T = (G_{Tmax} - G_{Tmin}) / G_{TCP}$ . Следует особо отметить, что радиальная эпюра при изменении  $K_T$  в диапазоне от 0,1 до 4 не претерпевает заметных изменений.

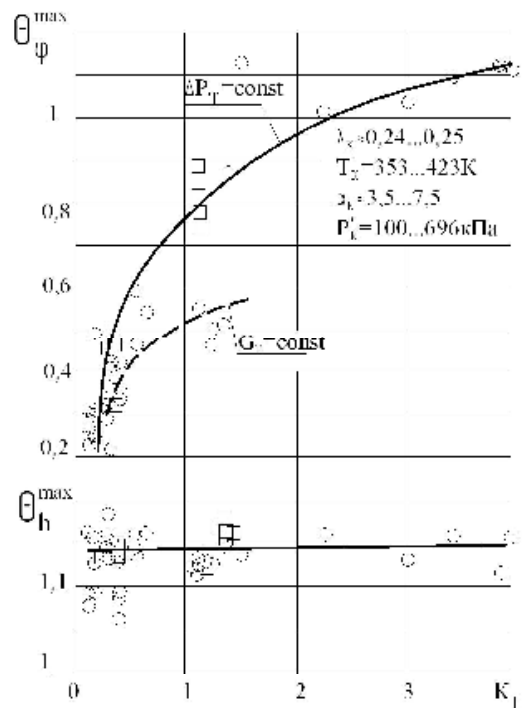


Рис. 4. Влияние начальной неравномерности распределения топлива по форсункам на характеристики выходного поля температуры газа камер МГТД  
 -О- по данным авторов; -□- по данным предприятия

Особый интерес для формирования окружной неравномерности КС МГТД представляет область, в которой при небольшом изменении  $K_T \approx 0,2...0,32$  уровень  $\theta_\phi^{max}$  изменяется примерно в 2,5 раза ( $\theta_\phi^{max} \approx 0,2...0,5$ ), что, по-видимому, объясняется незавершёностью процесса в зоне горения и догоранием несгоревшей топливно-воздушной смеси (ТВС) на струях смесителя.

Отмеченное обстоятельство позволяет более обоснованно подходить к выбору

допустимого уровня разброса расходных характеристик топливных форсунок. Не следует, вероятно, добиваться значения  $K_T$  меньше  $0,1 \div 0,2$ . Анализ литературных данных показывает, что на характеристики поля температуры газа на выходе из КС значительное влияние оказывает глубина проникновения струй вторичного воздуха  $\bar{B}_p$ , при этом для полноразмерных камер сгорания (ПКС)  $\bar{B}_{\text{опт}} \approx 0,5 \dots 0,6$ .

С целью выяснения влияния изменения проходных сечений фронтального устройства ( $\bar{F}_{\text{фр}}$ ) наружного и внутреннего смесителей ( $\bar{F}_{\text{см}}^H$  и  $\bar{F}_{\text{см}}^{BH}$ ) на выходное поле температуры и распределение воздуха по кольцевым каналам проведён комплекс исследований в широком диапазоне изменения их характерных площадей:

$$\bar{F}_{\text{фр}} / \Sigma F_0 = 0 \dots 0,225;$$

$$\bar{F}_{\text{см}}^H / \Sigma F_0 = 0 \dots 0,3;$$

$$\bar{F}_{\text{см}}^{BH} / \Sigma F_0 = 0 \dots 0,253.$$

По степени влияния их можно расположить в следующем порядке (рис. 5): фронтальное устройство, наружный смеситель, внутренний смеситель. Изменение площади фронтального устройства оказывает наибольшее воздействие на уровень  $\Theta_\phi^{max}$  и практически не влияет на максимальный уровень радиальной неравномерности.

Это является прямым следствием незавершённости процесса горения в первичной зоне, в результате чего на струях вторичного воздуха происходит догорание топливо-воздушной смеси, т.е. смеситель формирует выходное ПТГ дожиганием ТВС, не сгоревшей в первичной зоне.

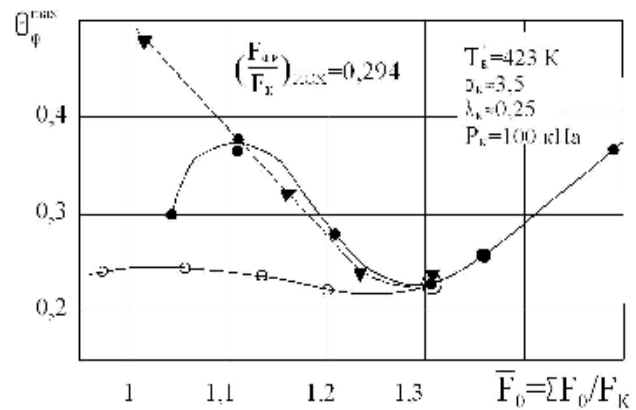


Рис.5. Влияние раскрытия жаровой трубы на  $\Theta_\phi^{max}$  камеры сгорания двигателя МД-120:

-●-  $\bar{F}_{\text{см}}^H = \text{var}$ ; -○-  $\bar{F}_{\text{см}}^{BH} = \text{var}$ ; -▼-  $\bar{F}_{\text{фр}} = \text{var}$

Так как уровень минимальной окружной неравномерности наблюдается при равенстве расходов воздуха  $G_{\text{БСМ}}^H$  и  $G_{\text{БСМ}}^{BH}$ , то одним из направлений обеспечения равномерного поля температур в КС МГТД прямоточной схемы является поиск способов выравнивания расходов через смесители. Как показывают исследования, этого можно достичь выравниванием профиля скорости на входе в наружный смеситель путём выбора соответствующего шага между отверстиями первого ряда и смесителя на наружной обечайке жаровой трубы (ЖТ) при неизменной площади отверстий первого ряда.

Таким образом, результаты экспериментальных исследований по влиянию конструктивных и режимных параметров на характеристики выходного поля температур позволили более обоснованно выбрать математические модели для расчёта  $\Theta_\phi^{max}$  и  $\Theta_h^{max}$  и установить взаимосвязь между этими величинами.

### Библиографический список

1. Лукачѐв, В. П. Рабочий процесс камер сгорания малоразмерных ГТД, проблемы и некоторые пути повышения его эффективности [Текст] / В. П. Лукачѐв, А. М. Ланский, В. Ю. Абрашкин [и др.] // Вест. СГАУ. Сер. Процессы горения, теплообмена и экология тепловых двигателей. – Самара, 1998. – Вып. 1. – С. 11-39.
2. Абрашкин, В. Ю. Влияние остаточной закрутки потока на характеристики выходного поля температур в камерах сгорания малоразмерных ГТД [Текст] / В. Ю. Абрашкин, А. М. Ланский // Тезисы докладов IV Всесоюзной научно-техн. конф. «Процессы горения, теплообмена и экология тепловых двигателей» / СГАУ. – Самара, 2004. – С. 143-144.
3. Абрашкин, В. Ю. Формирование полей температуры газа на выходе из камер сгорания малоразмерных ГТД [Текст]: дисс....канд. техн. наук / Абрашкин В. Ю. – Самара, 2006. – 152 с.

### References

1. Lukatchev, V. P. Operation of small-sized gas-turbine engine combustion chambers, problems and some ways of increasing its efficiency / V. P. Lukatchev, A. M. Lanskiy, V. Yu. Abrashkin et al. // Vestnik of SSAU. Ser. Combustion and heat exchange processes, ecology of heat engines. – Samara, 1998. – No.1. – PP. 11-39.
2. Abrashkin, V. Yu. The influence of residual flow spin on the characteristics of the outlet temperature field in combustion chambers of small-sized gas turbine engine / V. Yu. Abrashkin, A. M. Lanskiy // Theses of papers presented at the IVth All-Union scientific and engineering conference «Processes of combustion and heat exchange, ecology of heat engines» / SSAU. – Samara, 2004. – PP. 143-144.
3. Abrashkin, V. Yu. Gas temperature field formation at the exit of small-sized gas turbine engine combustion chambers: thesis of the candidate of technical science / V. Yu. Abrashkin. – Samara, 2006. – 152 p.

### PECULIARITIES OF GAS TEMPERATURE FIELD FORMATION AT THE EXIT OF SMALL-SIZED GAS TURBINE ENGINE COMBUSTION CHAMBERS

© 2010 A. M. Lanskiy, S. V. Lukatchev, S. G. Matveyev

Samara State Aerospace University named after academician S. P. Korolyov  
(National Research University)

The paper presents the results of investigation of the aerodynamic flow structure and hydraulic losses in combustion chambers of small-sized gas turbine engines. The influence of design parameters and operating conditions on the exhaust gas temperature field is shown.

*Combustion chamber, temperature field, residual flow spin, hydraulic resistance, initial non-uniformity, combustion liner exposing.*

### Информация об авторах

**Ланский Анатолий Михайлович**, кандидат технических наук, доцент кафедры «Теплотехника и тепловые двигатели», Самарский государственный аэрокосмический университет имени академика С. П. Королёва (национальный исследовательский университет), заведующий лабораторией АСУ-ВУЗ СГАУ, [amlansky@ssau.ru](mailto:amlansky@ssau.ru). Область научных интересов: физика и моделирование рабочих процессов в камерах сгорания газотурбинных двигателей.

**Лукачѐв Сергей Викторович**, доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой «Теплотехника и тепловые двигатели», Самарский государственный аэрокосмический университет имени академика С. П. Королѐва (национальный исследовательский университет), [lukachev@ssau.ru](mailto:lukachev@ssau.ru). Область научных интересов: физика и моделирование процессов горения в камерах сгорания газотурбинных двигателей.

**Матвеев Сергей Геннадьевич**, кандидат технических наук, доцент кафедры «Теплотехника и тепловые двигатели», Самарский государственный аэрокосмический университет имени академика С. П. Королѐва (национальный исследовательский университет), начальник планово-финансового управления СГАУ, [pfu@ssau.ru](mailto:pfu@ssau.ru). Область научных интересов: физика и моделирование процессов горения в камерах сгорания газотурбинных двигателей.

**Lanskiy Anatoly Mikhailovitch**, candidate of technical science, associate professor of the department “Heat engineering and heat engines”, Samara State Aerospace University named after academician S. P. Korolyov (National Research University), head of the laboratory Automatic Control Systems SSAU, [amlansky@ssau.ru](mailto:amlansky@ssau.ru). Area of research: physics and modelling of operating processes in combustion chambers of gas turbine engines.

**Lukatchev Sergey Victorovitch**, doctor of technical science, professor, head of the department “Heat engineering and heat engines”, Samara State Aerospace University named after academician S. P. Korolyov (National Research University), [lukachev@ssau.ru](mailto:lukachev@ssau.ru). Area of research: physics and modelling of operating processes in combustion chambers of gas turbine engines.

**Matveyev Sergey Gennadyevitch**, candidate of technical science, associate professor of the department “Heat engineering and heat engines”, Samara State Aerospace University named after academician S. P. Korolyov (National Research University), head of the financial department of SSAU, [pfu@ssau.ru](mailto:pfu@ssau.ru). Area of research: physics and modelling of operating processes in combustion chambers of gas turbine engines.