

## ИССЛЕДОВАНИЕ РАБОЧЕГО ПРОЦЕССА КАМЕР СГОРАНИЯ В СОСТАВЕ ГТД

© 2016

**А. Н. Маркушин** главный конструктор, Казанское моторостроительное производственное объединение, [AMarkushin@kmpo.ru](mailto:AMarkushin@kmpo.ru)

**А. В. Бакланов** ведущий инженер-конструктор отдела главного конструктора, Казанское моторостроительное производственное объединение, [andreybaklanov@bk.ru](mailto:andreybaklanov@bk.ru)

В статье описываются методы исследования процессов в камере сгорания, проводимые в составе полноразмерного двигателя. Данные исследования направлены на выявление изменений в работе камеры сгорания с изменением режима работы газотурбинного двигателя (ГТД). Они позволяют определить проблемные места в конструкции и проанализировать возможность их устранения. К тому же проводимые исследования ценны тем, что получены в натуральных условиях. Также в статье представлена принципиальная схема стенда, на котором были проведены испытания двигателя. Приводятся измеряемые параметры и способы проведения измерений в камере сгорания. Сделаны выводы, что реализация комплекса представленных в статье мероприятий позволяет исследовать внутрикамерные процессы с целью доводки камеры сгорания или апробации мероприятий по обеспечению надёжности её конструкции.

*Стенды; камера сгорания; токсичность; эксперимент; исследование; экология.*

---

*Цитирование:* Маркушин А.Н., Бакланов А.В. Исследование рабочего процесса камер сгорания в составе ГТД // Вестник Самарского университета. Аэрокосмическая техника, технологии и машиностроение. 2016. Т. 15, № 3. С. 81-89. DOI: 10.18287/2541-7533-2016-15-3-81-89

Создание стендовой базы, которая позволила бы исследовать процессы, происходящие в камере сгорания, в условиях, близких к работе ГТД, весьма сложная и дорогостоящая задача. Поэтому на ОАО «КМПО» применяется технологический двигатель, который позволяет провести ряд исследований с камерой сгорания, конструкция которой дорабатывается или изменяется для проверки мероприятий по обеспечению надёжности или улучшению экологических характеристик двигателя.

Для примера в статье рассматривается исследование опытной камеры сгорания, отличающейся от серийной камеры геометрией горелочного устройства.

Исследование рабочих процессов камеры сгорания в составе ГТД включает в себя:

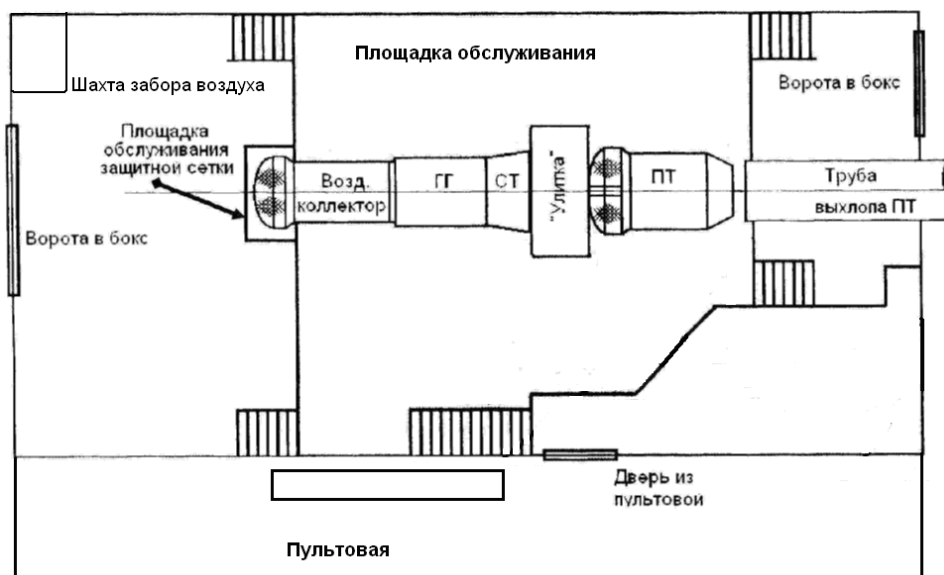
1. Отработку запуска двигателя.
2. Отработку программы регулирования расхода газа по топливным контурам на режиме прогрева и на номинальном режиме работы двигателя с целью минимизации выбросов токсичных веществ (если камера имеет несколько контуров подачи топлива).
3. Определение выбросов вредных загрязняющих веществ на режимах от прогрева до максимального.
4. Измерение пульсаций давления за компрессором и в камере сгорания при работе двигателя на режимах от прогрева до максимального.
5. Термометрирование стенок жаровой трубы.
6. Препарирование соплового аппарата с целью определения неравномерности температурного поля на выходе из камеры сгорания.
7. Тензометрирование отдельных элементов камеры сгорания [1].

Стенд, на который установлен технологический двигатель, состоит из воздушного коллектора, вход в который предохраняет защитная сетка с целью предотвращения по-

падения посторонних предметов в тракт двигателя, и улитки – выходного устройства, предназначенного для транспортировки отработавших газов в шахту выхлопа.

В качестве загрузочного устройства свободной турбины применяется воздушный компрессор (пневмотормоз) ПТ-82У-16. Он соединён с трубой выхлопа, через которую осуществляется выброс воздуха в атмосферу (рис. 1).

Стенд оборудован необходимыми измерительными приборами, оснащён масляной системой, необходимой для смазки опор и работы агрегатов; газовой системой для обеспечения запуска и подачи топливного газа к элементам топливопитания. Контроль и управление процессом испытания проводится с пульта управления, обеспечивающего вывод всех измеряемых параметров на мониторы [1].



а



б

Рис.1. Стенд испытаний ГТД: а – схема; б – внешний вид

Для определения уровня выбросов токсичных веществ используется два способа. Первый: измерение выбросов непосредственно в шахте выхлопа. Второй: отбор проб из тракта ГТД. Для этого за свободной турбиной устанавливается газоотборный зонд, от которого по шлангу GECI с электроподогревом продукты сгорания транспортируются при помощи побудителя расхода АБП-01 к термоэлектрическому холодильнику ТХМ-40, а затем к газоанализатору «Testo 350» («Тестотерм», Германия). Данный газоанализатор предназначен для решения измерительных задач в системах, работающих на различных видах газового, дизельного и твёрдого топлива. Измерительная система состоит из газоанализатора для измерения характеристик дымовых газов и управляющего модуля, который также может служить в качестве самостоятельного портативного инструмента для измерения дополнительных параметров окружающей среды. Газоанализатор позволяет определять концентрации  $\text{CO}$ ,  $\text{NO}$ ,  $\text{NO}_2$ ,  $\text{CH}$ ,  $\text{O}_2$  (рис. 2).

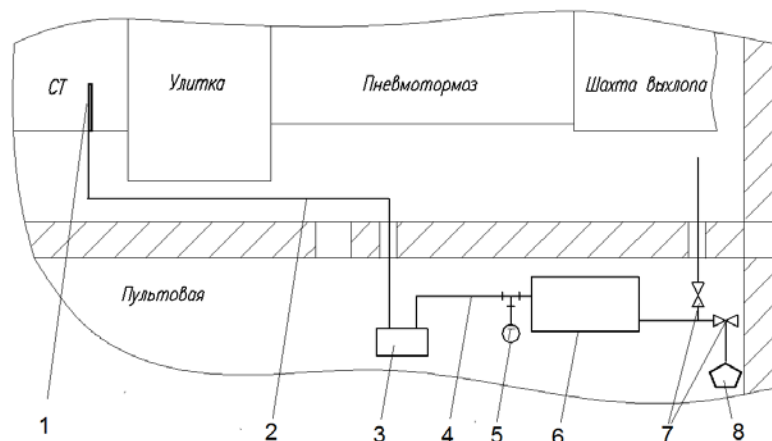


Рис. 2. Система отбора проб продуктов сгорания:

- 1 – газоотборный зонд; 2 – шланг GECI с электроподогревом; 3 – побудитель расхода АБП-01;  
4 – труба; 5 – термометр ТГП-100-М1; 6 – термоэлектрический холодильник ТХМ-40;  
7 – кран; 8 – газоанализатор Testo 350

На рис. 3 показано изменение приведённой концентрации оксидов азота и оксидов углерода в зависимости от температуры на выходе из свободной турбины и мощности ГТД. Они измерены при помощи двух представленных выше способов. Из рис. 3 следует, что приведённая концентрация оксидов азота, отбираемая в шахте, выше, чем получаемая непосредственно из тракта двигателя, при этом противоположная картина наблюдается с концентрацией выбросов окиси углерода.

Отработка запуска ГТД заключается в нахождении оптимального расхода топлива, при котором двигатель имеет гарантированный запуск с низким уровнем пульсаций давления в камере и высокой полнотой сгорания топлива.

Также с целью обеспечения устойчивого горения на режимах работы двигателя от малого газа до максимального определяется уровень пульсаций давления в камере сгорания.

Измерение характеристик пульсаций газа в камере сгорания производится через канал подачи топливного газа к одному из воспламенителей камеры.

В место стыка трубопровода подачи топливного газа и топливного штуцера воспламенителя устанавливается тройник и дополнительный волновод (трубопровод  $du = 6$  мм) для подключения к магистрали отбора Р\*2 кс зонда измерения пульсаций Р\*2 кс.

Графики измерения пульсаций давления в камере сгорания при работе двигателя НК-16СТ на максимальном режиме показаны на рис. 4.

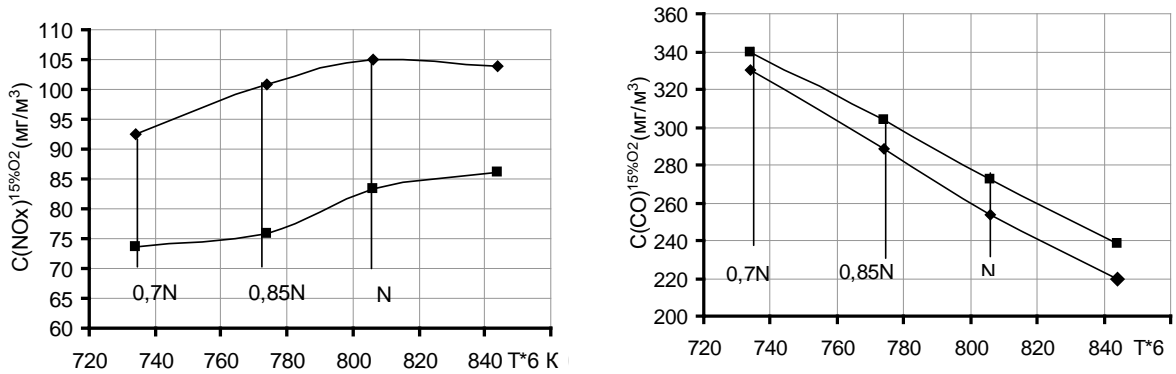


Рис. 3. Приведённая концентрация выбросов CO и NO<sub>x</sub> в зависимости от температуры за свободной турбиной и мощности ГТД НК-16СТ. Отбор проб: ◆ – в шахте; ■ – за турбиной

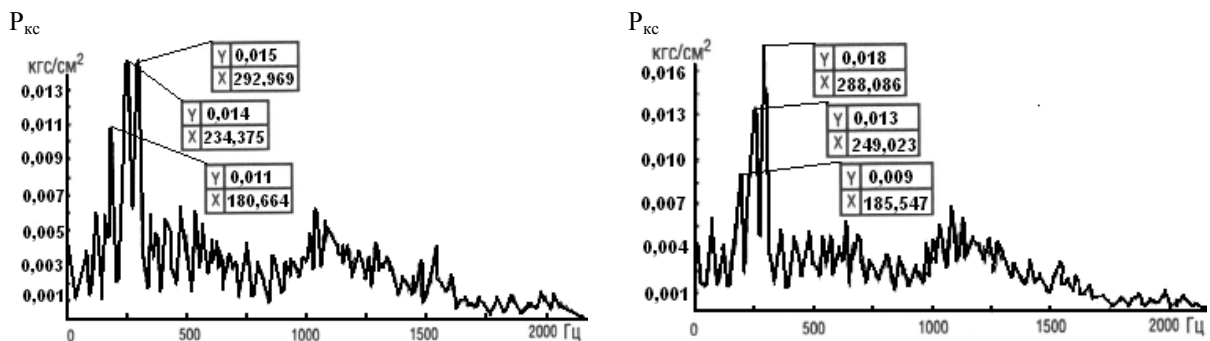


Рис. 4. Графики замера пульсаций давления в камере сгорания двигателя

По результатам измерения отмечается, что абсолютный уровень пульсаций давления при работе двигателя на максимальном режиме не превышает 0,15% от уровня давления за компрессором, на остальных режимах находится в пределах 0,7%. Полученные уровни пульсаций давления существенно ниже 1% от среднего давления в сечении, принятого за критерий допуска [2].



Рис. 5. Внешний вид ИВК MIC-300M

Для оценки вибросостояния элементов конструкции камеры сгорания в качестве цифровой системы регистрации вибраций, определения источника повышенной вибрации используется цифровой регистратор-анализатор динамических процессов MIC-3M, выпускаемый НПП «Мера». Он предназначен для измерения и анализа сигналов датчиков вибрации, устанавливаемых на элементы камеры сгорания, а также для измерения других аналоговых сигналов в полосе частот до 28000 Гц с амплитудой до 8,5 В (рис. 5).

Для определения неравномерности температурного поля камеры сгорания в составе двигателя производится препарирование соплового аппарата турбины (рис. 6).

Для измерения температуры на лопатках препарированного соплового аппарата установлено 158 хромель-алюмелевых термопар, образующих пять контрольных поясов. Измерение температур производится в диапазоне  $0 \dots 1100^\circ\text{C}$  с погрешностью  $\pm 1\%$  при доверительной вероятности  $P = 0,95$  [3].

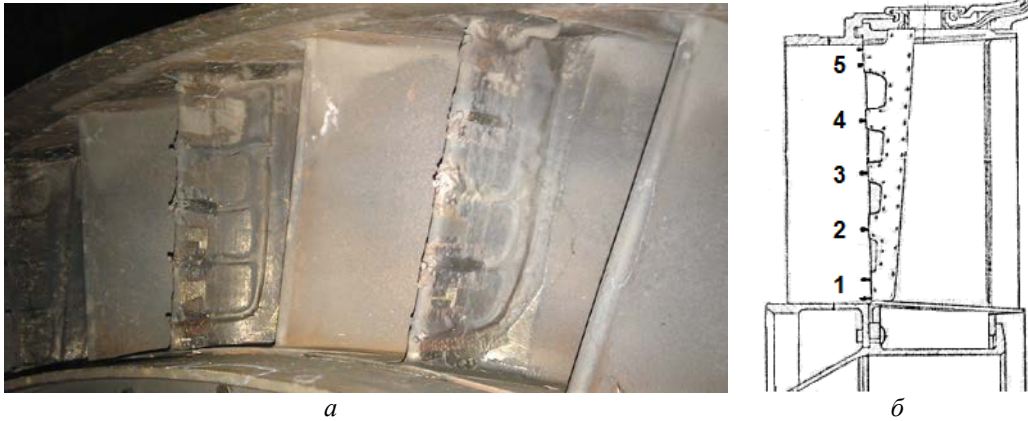


Рис. 6. Препарированный сопловой аппарат ГТД НК-16СТ (а); схема расположения термопар (б)

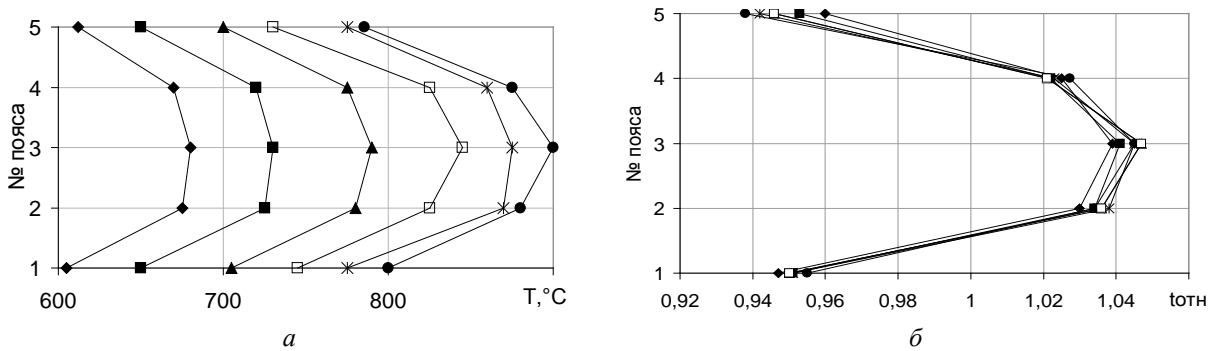


Рис. 7. Радиальная эпюра: а – в абсолютных значениях; б – в относительных значениях.  
Режимы:  $\blacklozenge$  – 0,5N;  $\blacksquare$  – 0,65N;  $\blacktriangle$  – 0,8N;  $\square$  – N; \* – 1,1N;  $\bullet$  – 1,2N

В процессе работы двигателя измерения температуры производятся на интересующих режимах работы ГТД НК-16СТ от 8 до 20МВт. Затем данные обрабатываются и формируются окружная и радиальная неравномерности температурного поля.

На рис. 7 представлены радиальные эпюры в абсолютных и относительных значениях, откуда видно, что с увеличением режима наблюдается рост температуры, а также подобие кривых на выходе из камеры. Эпюры в относительных значениях для каждого режима практически совпадают.

Для определения температурного состояния стенок жаровой трубы производится их препарирование с установкой хромель-алюмелевых термопар, состоящих из хромелевых и алюмелевых термопроводников, обмотанных кремнеземной нитью. Спаи термопары крепятся к деталям жаровой трубы контактной сваркой, термопроводники – скобками из фольги.

Проложенные по жаровой трубе термопары собираются в жгут и выводятся из наружного корпуса камеры сгорания через смотровой лючок. Далее термопары подводятся к жгуту препарирования, который соединён с регистрирующей аппаратурой МИС-3М, оснащённой специальным термомодулем. По результатам испытания выявляются места повышенной температуры, которые не должны быть выше максимально допустимой  $1000^\circ\text{C}$  для сплава ЭП-648.

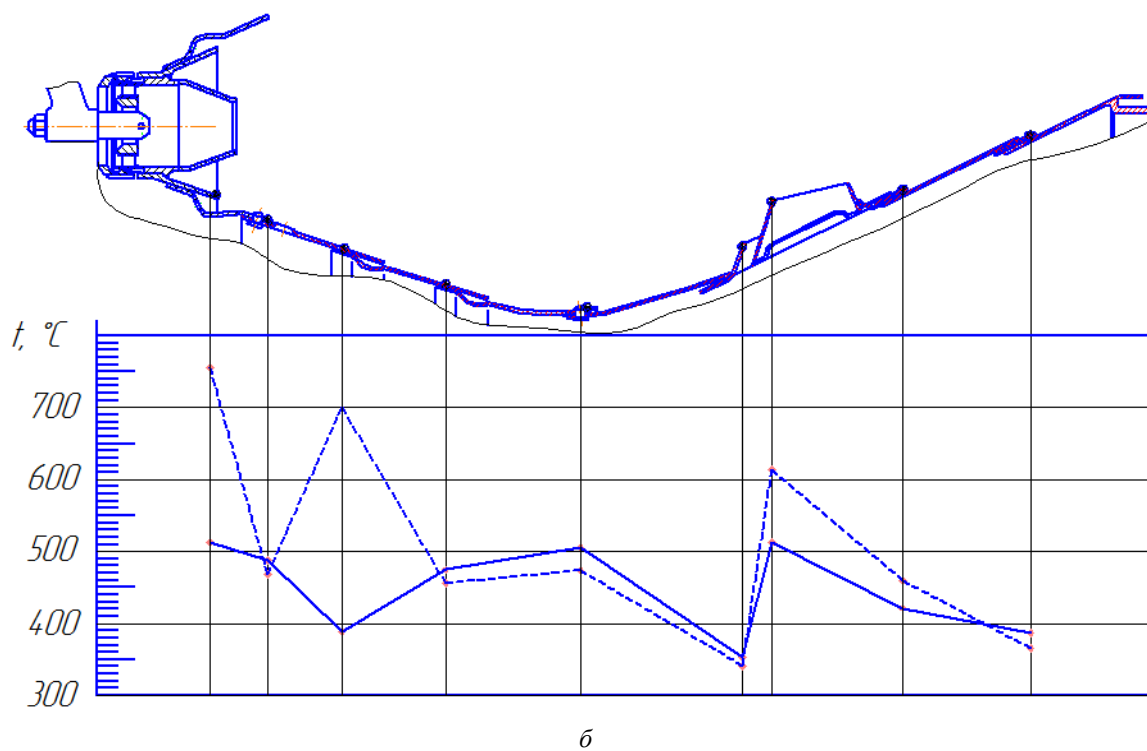
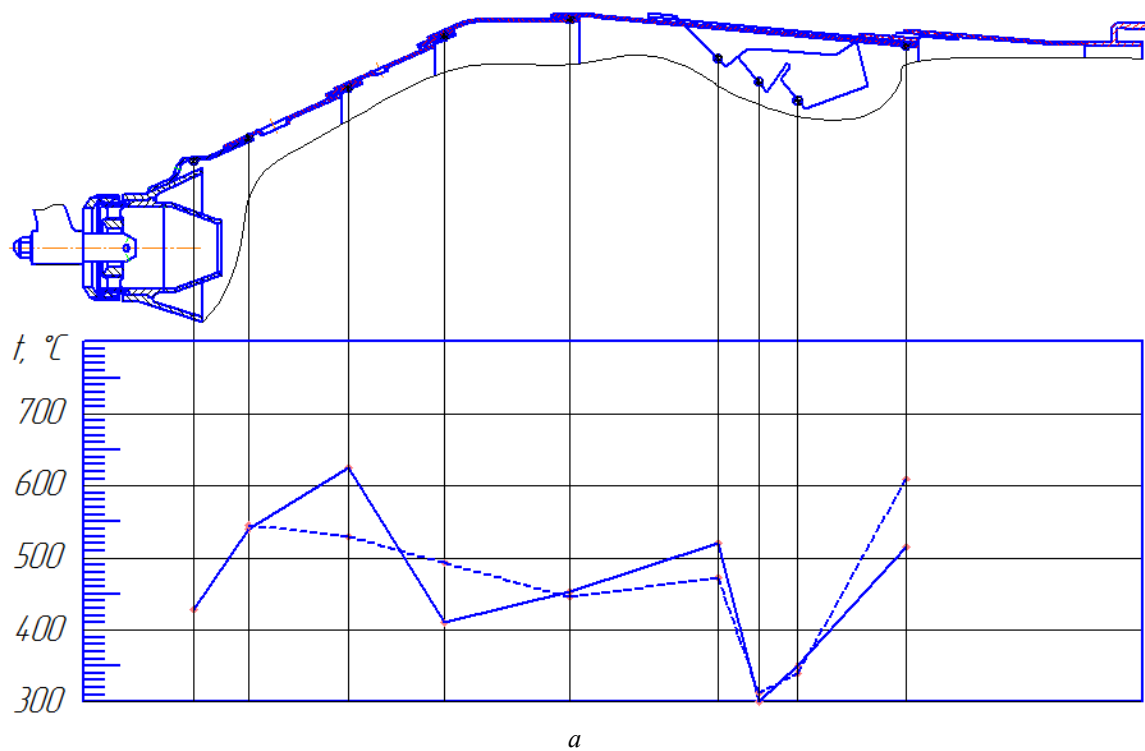


Рис. 8. Температура стенки по длине жаровой трубы: а – наружный кожух; б – внутренний кожух  
Режимы: — 0,8N; - - - N

На рис. 8 показано распределение температуры для наружной и внутренней стенок жаровой трубы на двух режимах работы двигателя. Из рисунка видно, что с увеличением режима работы двигателя температура стенок в зоне горения увеличивается, но не достигает критического значения. Откуда следует, что постройка нового горелочного устройства не привела к возникновению высокотемпературных зон возле стенок. В результате не требуется менять систему охлаждения жаровой трубы.

Для определения параметров на входе в камеру сгорания при различных режимах работы ГТД используется комбинированная пневмотермогребёнка. Фото гребёнки представлено на рис. 9, а, а схема её установки – на рис. 9, б.

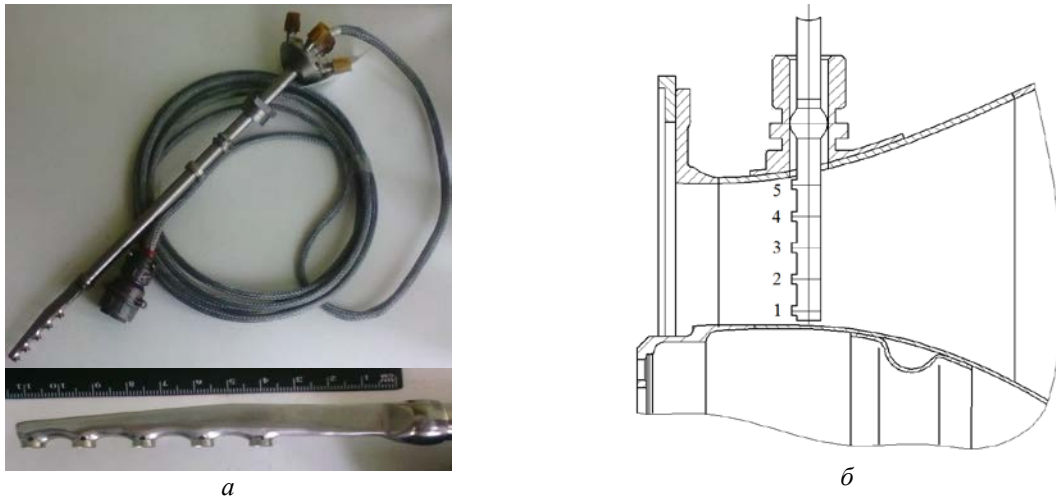


Рис. 9. Пневмотермогребёнка: а – внешний вид; б – схема установки

Гребёнка монтируется при помощи штуцера в диффузоре камеры сгорания, практически на входе в камеру, таким образом, чтобы приёмники давления были равномерно распределены по высоте канала. Для определения статического давления на корпусе камеры сгорания устанавливается штуцер. При помощи гребенки оцениваются такие параметры на входе в камеру как: расход воздуха  $G_{2ВД}$ , приведённая скорость  $\lambda_{вх.КС}$ , а также определяются распределения скоростей и давлений по высоте канала.

На рис. 10 показано распределение давления и скорости потока на входе в камеру сгорания.

Из рисунка видно, что максимальное значение давления и скорости наблюдается в ядре потока на выходе из компрессора.

Из всего вышесказанного можно сделать вывод о том, что, реализуя комплекс представленных мероприятий, можно исследовать внутрикамерные процессы с целью доводки камеры сгорания или решения вопросов по обеспечению надёжности её конструкции.

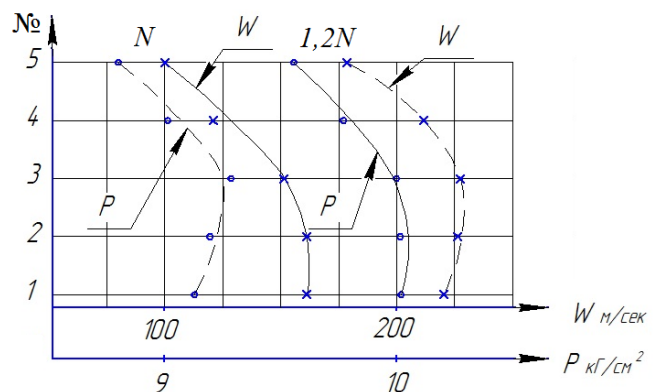


Рис. 10. Распределение давления и скорости по высоте диффузора камеры: \* – давление; • – скорость

### Библиографический список

1. Маркушин А.Н., Бакланов А.В. Испытательные стенды для исследования процессов и доводки низкоэмиссионных камер сгорания ГТД // Вестник Самарского государственного аэрокосмического университета им. академика С.П. Королёва (национального исследовательского университета). 2013. № 3 (41), ч. 1. С 131-138.

2. Маркушин А.Н., Меркушин В.К., Бакланов А.В. Разработка и исследование малотоксичной камеры сгорания стационарного ГТД // Вестник Самарского государственного аэрокосмического университета им. академика С.П. Королёва (национального исследовательского университета). 2011. № 5(29). С. 155-161.

3. Маркушин А.Н., Бакланов А.В. Определение неравномерности температурного поля в натуральных условиях на выходе из камеры сгорания ГТД // Сборник докладов научно-технической конференции «Климовские чтения-2014. Перспективные направления развития авиадвигателестроения». Санкт-Петербург: Скифия-принт, 2014. Т. 1. С. 142-149.

### INVESTIGATION OF THE GAS TURBINE ENGINE COMBUSTION CHAMBER WORKFLOW

© 2016

**A. N. Markushin** Chief Designer of the Joint-Stock Company «Kazan Motor Production Association», Kazan, Russian Federation, [AMarkushin@kmpo.ru](mailto: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](mailto:andreybaklanov@bk.ru)

The article describes methods of investigation of the processes inside the combustion chamber of the gas turbine engine. The investigation is aimed at revealing changes in the combustion chamber workflow depending on the changes in the operating conditions of the gas turbine engine. Such investigations allow us to find design flaws and analyze possibilities of removing them. The main advantage of these investigations is that all experiments have been conducted in full scale. The article also presents a principal scheme of the test facility on which an engine was tested. The parameters being measured and methods of conducting measurements in the combustion chamber are presented. The conclusion is made that the implementation of measures described in the article makes it possible to analyze the intrachamber processes with the aim of developing it or testing various methods of providing its durability.

*Test stands; combustion; toxicity; experiment; research; ecology.*

---

*Citation:* Markushin A.N., Baklanov A.V. Investigations of the gas turbine combustion chamber workflow. *Vestnik of Samara University. Aerospace and Mechanical Engineering*. 2016. V. 15, no. 3. P. 81-89. DOI: 10.18287/2541-7533-2016-15-3-81-89

### References

1. Markushin A.N., Baklanov A.V. Test benches for researching the processes and operational development of low emission gas turbine engine combustion chambers. *Vestnik of the Samara State Aerospace University*. 2013. No. 3(41), part 1. P. 131-138. (In Russ.)

2. Markushin A.N., Merkushev V.K., Baklanov A.V. Development and research of a low-toxic combustion chamber of a stationary GTE. *Vestnik of the Samara State Aerospace University*. 2011. No. 5(29). P. 155-161. (In Russ.)



3. Markushin A.N., Baklanov A.V. Opredelenie neravnomernosti temperaturnogo polya v naturnykh usloviyakh na vykhode iz kamery sgoraniya GTD. *Sbornik докладов научно-технической конференции «Klimovskie chteniya-2014. Perspektivnye napravleniya razvitiya aviadvigatelestroeniya»*. V. 1. Saint-Petersburg: Skifiya-print Publ., 2014. P. 142-149. (In Russ.)