

Самарский государственный аэрокосмический университет  
имени академика С.П. Королева

На правах рукописи

АБРАШКИН ВАЛЕРИЙ ЮРЬЕВИЧ

ФОРМИРОВАНИЕ ПОЛЕЙ ТЕМПЕРАТУРЫ ГАЗА НА ВЫХОДЕ  
ИЗ КАМЕР СГОРАНИЯ МАЛОРАЗМЕРНЫХ ГТД

Специальность:  
05.07.05 – Тепловые, электроракетные двигатели и энергоустановки  
летательных аппаратов

Автореферат  
диссертации на соискание ученой степени  
кандидата технических наук

Самара – 2006

Работа выполнена в ГОУ ВПО «Самарский государственный аэрокосмический университет имени академика С.П. Королева» на кафедре теплотехники и тепловых двигателей.

Научный руководитель:  
доктор технических наук, профессор Лукачев С.В.

Официальные оппоненты:

доктор технических наук, профессор В.П. Данильченко  
кандидат технических наук, доцент А.Д. Росляков

Ведущая организация:

ОАО «Самарское конструкторское бюро машиностроения»

Защита диссертации состоится "\_\_\_" \_\_\_\_\_ 2006 г. в \_\_\_\_\_ часов на заседании диссертационного совета Д 212.215.02 при ГОУ ВПО «Самарский государственный аэрокосмический университет имени академика С.П. Королева» по адресу: 443086, Самара, Московское шоссе,34.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке ГОУ ВПО «Самарский государственный аэрокосмический университет имени академика С.П. Королева»

Автореферат разослан "\_\_\_" \_\_\_\_\_ 2006 г.

Ученый секретарь диссертационного совета  
доктор технических наук, профессор

В.Н. Матвеев

## ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ.

Актуальность темы. В процессе проектирования и доводки камер сгорания (КС) ГТД важное значение приобретает вопрос обеспечения заявленного уровня окружающей и радиальной неравномерностей полей температуры газа (ПТГ) при приемлемых значениях по полноте сгорания ( $\eta_r$ ), потерях полного давления ( $\sigma_k$ ), бедному срыву пламени и запуску. Степень совершенства температурного поля является критерием ресурса турбины и двигателя в целом. Кроме того, снижение окружающей неравномерности ( $\theta_\phi^{\max}$ ) позволяет увеличить значение среднemasсовой температуры газа перед турбиной и тем самым, повысить мощность и КПД газотурбинной установки.

Еще более усложняется эта проблема в КС МГТД, которая заключается в том, что не изучено влияние размеров и особенностей организации в них рабочего процесса на поля температур, а применение научно-технического задела по этому вопросу из области полноразмерных КС, как правило, приводит к отрицательному результату.

Поэтому исследование особенностей формирования полей температуры газа на выходе из реальных КС МГТД, а также разработка их математических моделей, представляет значительный научный и практический интерес.

Цель работы. В связи с этим целью исследования является повышение эффективности работы КС и МГТД в целом на основе экспериментальных исследований ПТГ в выходном сечении и выработки рекомендаций по их проектированию и доводке.

### Задачи исследования.

1. Изучить влияние размерности двигателей на характеристики поля температуры газа на выходе из камер сгорания МГТД;
2. Установить влияние конструктивных и режимных параметров КС МГТД на неравномерность выходного поля температуры газа (ПТГ).

3. Разработать модели расчета окружной, радиальной неравномерностей и коэффициента гидравлического сопротивления применительно к КС МГТД;
4. Внедрить в практику проектирования и доводки рекомендации по формированию выходного ПТГ в камерах сгорания МГТД.

Научная новизна.

- выполнен анализ влияния размерности двигателя на выходные характеристики КС, который позволил выявить некоторые особенности, характерные только для КС МГТД;
- установлена взаимосвязь между характером обтекания жаровой трубы и уровнем неравномерности выходного поля температуры газа;
- выполнены исследования по влиянию конструктивных и режимных параметров, величины остаточной закрутки потока воздуха на выходе из спрямляющего аппарата центробежного компрессора, неравномерности распределения топлива по форсункам на характеристики выходного ПТГ КС различных схемных решений;
- разработаны математические модели по оценке уровня окружной, радиальной неравномерности с учетом коэффициента гидравлического сопротивления, предложен алгоритм выбора на стадии проектирования проектных параметров КС МГТД, обеспечивающих получение заявленных выходных характеристик.

Практическая ценность работы. На основе проведенных исследований и полученных математических моделей разработаны рекомендации по обеспечению требуемых характеристик ПТГ на выходе из камер сгорания МГТД.

Практическое использование рекомендаций при доводке камер сгорания двигателей МД-120, МД-45, ВД-100 и проектировании КС изделий 83 и 123 подтвердило их эффективность.

Реализация работы. Результаты работы использованы в:

– МКБ «Гранит» (г. Москва), ОКБ «Гидромеханика» (г. Уфа), «КОМБ» (г. Калуга); «СНТК им. Н.Д. Кузнецова» (г. Самара);

– Самарском государственном аэрокосмическом университете (СГАУ) в учебном процессе на кафедре «Теплотехника и тепловые двигатели».

Апробация работы. Результаты диссертационной работы обсуждались на Всесоюзной научно-технической конференции «Газотурбинные и комбинированные установки» (МВТУ им. Баумана, Москва, 1987, 1991, 1996 г.г.), на научно-технических советах организации МКБ «Гранит» (1988, 1989, 1991 г.г.), на Всесоюзном семинаре «Рабочий процесс в камерах сгорания ВРД» при кафедре 201 МАИ под руководством д.т.н., проф. Г.Н. Абрамовича (Москва, 1990 г.), на международной научно-технической конференции «Проблемы и перспективы развития двигателестроения в Поволжском регионе» (Самара, 1997г.), на IV Всероссийской научно-технической конференции «Процессы горения, теплообмена и экологии тепловых двигателей» (Самара, СГАУ, 1998, 2002 г.г.), на НТС кафедры «Теория двигателей летательных аппаратов» СГАУ (Самара, 2006 г.).

Публикации. По теме диссертации опубликовано 11 печатных работ, получено 2 авторских свидетельства, выпущено 6 научно-технических отчетов.

Структура и объем работы. Диссертация состоит из введения, пяти разделов, заключения и списка литературы. Работа изложена на 152 страницах машинописного текста, содержит 70 рисунков и 8 таблиц. Список использованных источников содержит 150 работ.

## СОДЕРЖАНИЕ ДИССЕРТАЦИИ

Во введении обоснована актуальность работы, сформулирована её цель, дано краткое описание полученных результатов, имеющих научное и прикладное значение.

В первом разделе выполнен анализ современного состояния вопроса и влияния размерности двигателя на характеристики выходного ПГТ, формируется цель и задачи исследования. Проведённые к настоящему времени экспериментальные и теоретические исследования по формированию выходного ПГТ на натуральных полноразмерных КС и их моделях представляют большую научную ценность. Особо следует отметить работы Абрамовича, Иванова, Шандорова, Кефера и Бейнса, Безменова, Онищика, Холдмена, Сринивасана, Поляковой, Рудакова, Лефевра и др. Они позволили:

- выявить основные способы формирования ПГТ на выходе из камер сгорания;
- определить рекомендуемые геометрические соотношения, определяющие качество смешения;
- проанализировать точность и достоверность существующих моделей расчета характеристик выходного поля температуры газа для КС МГТД.

Однако эти исследования не дают ответа на вопрос, почему КС малоразмерных ГТД имеют повышенные, по сравнению с ПКС, значения  $\Theta_{\phi}^{\max}$ . Кроме того, объём выполненных ранее исследований по данному вопросу для реальных КС МГТД настолько ограничен, что не позволяет с необходимой точностью и в короткие сроки выполнять их проектирование и доводку.

Выполненный анализ закономерностей изменения основных конструктивных и режимных параметров ряда современных двигателей позволил выявить некоторые особенности, характерные только для камер сгорания МГТД и объяснить их влияние на характеристики выходного поля температур. Показано, что они определяются размерами, схемными решениями и целевым назначением летательного аппарата.

Особо следует отметить:

- значительная разность давлений в наружном и внутреннем кольцевых каналах ( $\sigma_{кк}^{вн} / \sigma_{кк}^{н} = 2,5 \div 3$ );
- повышенная газодинамическая неравномерность распределения параметров и веществ по сечениям жаровой трубы ( $\bar{t}_\phi \uparrow$ ,  $k_v \uparrow$ ,  $\tau_n \downarrow$ );
- влияние остаточной закрутки потока воздуха  $\varphi_{ост}$  на выходе из компрессора на  $\Theta_\phi^{\max}$ ;
- низкие параметры цикла  $\pi_k$  и  $T_c^*$ ;
- влияние масштабного фактора на структуру течения и характеристики струй вторичного воздуха.

Таким образом, учитывая ограниченность опыта создания малоразмерных ГТД и отсутствие адекватных математических моделей по рассматриваемому вопросу, разработка научно-обоснованного подхода по формированию ПТГ на выходе из КС МГТД имеет, несомненно, актуальное значение. На основе анализа влияния размерности и обзора литературных данных была поставлена цель и сформулированы задачи исследования.

Во втором разделе приводится описание экспериментального стенда для исследования характеристик КС, натуральных моделей исследуемых камер сгорания малоразмерных ГТД, дана оценка точности измерения стендовых параметров.

Экспериментальное исследование характеристик КС проводилось на стенде, который обеспечивал проведение испытаний в широком диапазоне режимных параметров:  $p_k^* = 20 \dots 110 \text{ кПа}$ ,  $T_k^* = 273 \dots 523 \text{ К}$ ,  $G_B = 0,01 \dots 1,2 \text{ кг/с}$ . Стенд оснащён необходимыми системами измерения расходов воздуха, топлива и выходных параметров камер сгорания ( $T_T^*$ ,  $P_T^*$ ,  $\eta_T$ ,  $\alpha_k^{\max}$ ).

Для определения характеристик поля температуры газа изготовлено устройство кругового замера  $T_T^*$  и  $p_T^*$ . С целью снижения трудоёмкости проведения испытаний разработана и внедрена автоматизированная система измерения  $T_T^*$ .

В качестве объектов испытаний использовались модели и натурные КС ряда отечественных малоразмерных ГТД различных конструктивных схем:– прямоточная, кольцевого типа с подачей воздуха в наружный кольцевой канал. (КС двигателя МД-120), которая оснащена необходимыми гребёнками полного и статического давления для замеров распределения воздуха по длине жаровой трубы;

– прямоточная, трубчато-кольцевого типа (КС двигателя МД-45);

– противоточная, кольцевого типа (КС изделия ВД-100). Характерной особенностью указанного изделия являлась тороидальная структура течения в первичной зоне жаровой трубы.

В процессе исследований изменились геометрические параметры фронтального устройства, отверстий в наружной и внутренней обечайках жаровой трубы (КС двиг. МД-120 и МД-45), взаимное расположение отверстий первого ряда и смесителя на наружной обечайке (КС двиг. МД-120), конструкция элементов для установки форсунок и пусковых свечей (КС изд. ВД-100).

Выше описанные объекты испытаний позволили в имеющемся диапазоне схемных решений современных КС МГТД исследовать влияние конструктивных и режимных параметров на выходные характеристики полей температуры газа.

В третьем разделе представлены результаты по исследованию аэродинамической структуры течения и гидравлических потерь в камерах сгорания малоразмерных ГТД, а также влияние их конструктивных и режимных параметров на характеристики выходного поля температуры газа.

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

Так, например, для КС двигателя МД-120 расход воздуха, поступающего в наружный канал, зависит от приведенной скорости потока, в то время как через внутренний смеситель остается практически постоянным. Это объясняется тем, что уве-



личиваются потери полного давления на поворот потока во внутренний канал, которые составляют то 10 до 40% общих потерь  $\sigma_k$ .

На рисунке 1 приведено влияние раскрытия жаровой трубы (в данном случае за

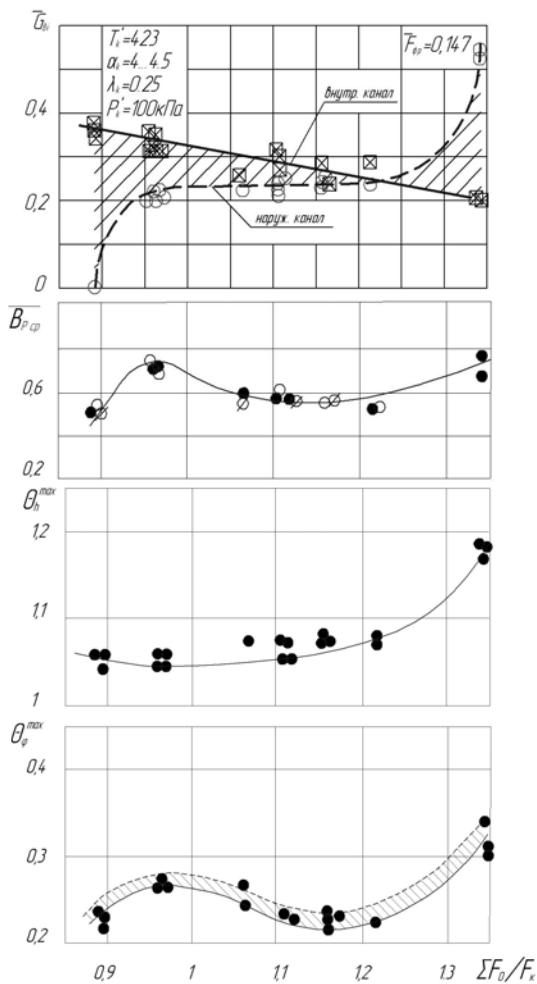


Рисунок 1 - Влияние раскрытия жаровой трубы на характеристики КС двигателя МД-120

счет уменьшения площади  $F_{см}^H$ ) на характеристики КС двигателя МД-120.

При распределении воздуха по смесителям согласно рекомендациям для полно-размерных ГТД ( $\Sigma F_0/F_K = 1,30...1,34$ ) камера сгорания характеризуется высоким уровнем неравномерности выходного поля температур ( $\theta_\phi^{max} \approx 0,35 \div 0,37$ ;  $\theta_h^{max} \approx 1,17$ ), наличием нагара на внутренней стенке жаровой трубы и низким уровнем полноты сгорания  $\eta_c$ .

Как показывают исследования, минимальному уровню окружной и радиальной неравномерности ( $\theta_\phi^{max} \approx 0,22 \div 0,26$ ;  $\theta_h^{max} \approx 1,07...1,04$ ) соответствует область  $\Sigma F_0/F_K = 1,25...1,1$  примерно равных расходов через смесители.

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 ПГТ в окружном направлении.

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

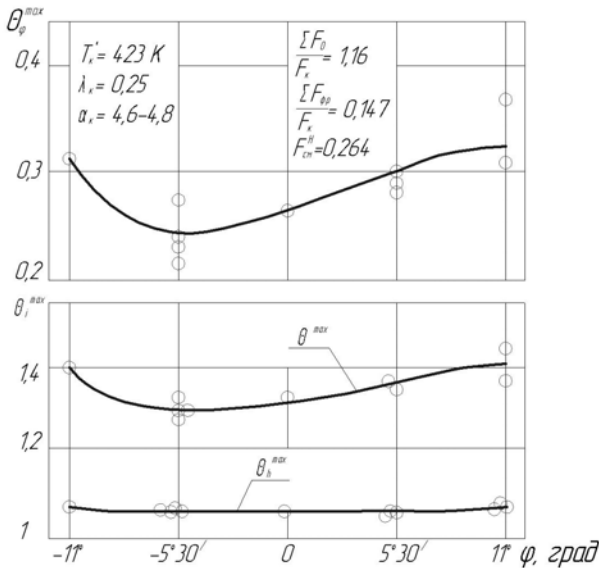


Рисунок 2 - Влияние остаточной закрутки на выходе из компрессора на характеристики выходного поля температуры газа камеры сгорания двигателя МД-120

Минимальное значение  $\Theta_{\varphi}^{max} = 0,22...0,24$  достигается при смещении отверстий смесителя относительно первого ряда на наружной обечайке жаровой трубы на угол  $\varphi = 13...17^\circ$  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 одними и теми же относительными геометрическими параметрами ( $\Sigma F_0/F_{ж}$ ,  $F_{КК}/\Sigma F_0$ ,  $F_{фр}/\Sigma F_0$ ) и степенью подогрева газа. Повышение потерь в жаровой трубе путем уменьшения эффективной площади отверстий является инструментом в руках конструктора для обеспечения требуемых характеристик камеры ( $\Theta_{\varphi}^{max}$ ,  $\Theta_h^{max}$ ,  $\eta_2$ ).

Поэтому еще на стадии эскизного проектирования необходимо иметь интегральные модели, позволяющие с достаточной точностью оценивать потери полного давления ( $\zeta_K$  или  $\sigma_K$ ).

Проведенные исследования показывают, что известные модели, применитель-

но к малоразмерным камерам сгорания рассматриваемых схем дают погрешность в определении коэффициента гидравлических потерь до 150...200.

Поэтому на основе обобщения и анализа имеющихся экспериментальных данных разработана уточненная модель расчета коэффициента гидравлического сопротивления для геометрически подобных камер сгорания малоразмерных ГТД. С

расходом воздуха  $G_B = 0,3...2,5$  кг/с: 
$$\xi_K = \xi_D + K_F \left[ \xi_0 \left( \frac{F_K}{\mu F_0} \right)^2 + \xi_T \right],$$

$$\xi_D = K_1 \cdot K_2 \cdot \left( 1 - \frac{1}{c \cdot \Pi_D} \right)^2, \quad K_F = f(\Sigma F_0 / F_K), \quad \xi_T = K_{\Delta T} \left( \frac{F_K}{F_{Ж}} \right)^2 \cdot \left( \frac{T_{Г}^*}{T_K^*} - 1 \right),$$

$K_{\Delta T} = 26,94 \cdot \exp[-10,12(F_K / F_{Ж})]$ . В работе приведены рекомендуемые значения

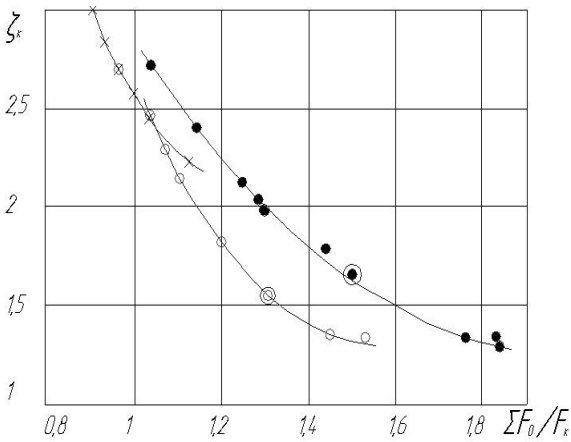


Рисунок 3 - Зависимость  $\xi_K$  от отношения  $\Sigma F_0 / F_K$  для исследуемых вариантов КС МГТД  
 -о- КС двигателя МД-120; -●- КС двигателя МД-45;  
 -х- КС двигателя ВД-100

коэффициентов  $K_1$ ,  $K_2$ ,  $K_F$  для исследуемых схем КС МГТД. Поправочный коэффициент  $K_{\Delta T}$  учитывает форму жаровой трубы и неравномерность полей  $T_{Г}^*$  и  $W_{Г}^*$  в зависимости от отношения  $F_K / F_{Ж}$ . Для КС МГТД  $K_{\Delta T} \approx 8...1$  ( $K_{\Delta T} = 2,2...0,5$ -ПКС). Коэффициент  $K_F$  учитывает схему КС (прямоточная, противоточная или трубчато-кольцевая). На рисунке 3 дано сравнение расчетных и экспериментальных значений  $\xi_K$ . По-

грешность определения гидравлических потерь для геометрически подобных КС не превышает  $\pm 5,5\%$ .

Исследование влияния геометрических параметров КС на выходное поле температур

проводилось в несколько этапов. На первом изучалось влияние площадей фронтального устройства ( $\overline{F}_{\Phi P} = F_{\Phi P} / F_K$ ), первого ряда отверстий  $\overline{F}_{1P}$ , наружного смесителя  $\overline{F}_{CM}^H$ . 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.

Проведенные 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  $\Theta_{\varphi}^{max}$  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 объему жаровой трубы и завершенности процесса горения в первичной зоне.

Одной из причин увеличения уровня неравномерности поля температур на выходе из КС является неодинаковое распределение топлива по форсункам. Подтверждением этого служит зависимость  $\Theta_{\varphi}^{max}$ ,  $\Theta_h^{max}$  от начальной неравномерности распределения топлива, полученная в результате обобщения экспериментальных данных (рисунок 4), где  $K_T = (q_{T \min} + q_{T \max}) / q_{T \text{ ср}}$ . Следует особо отметить, что радиальная эпюра при изменении  $K_T$  в диапазоне от 0,1 до 4 не претерпевает заметных изменений.

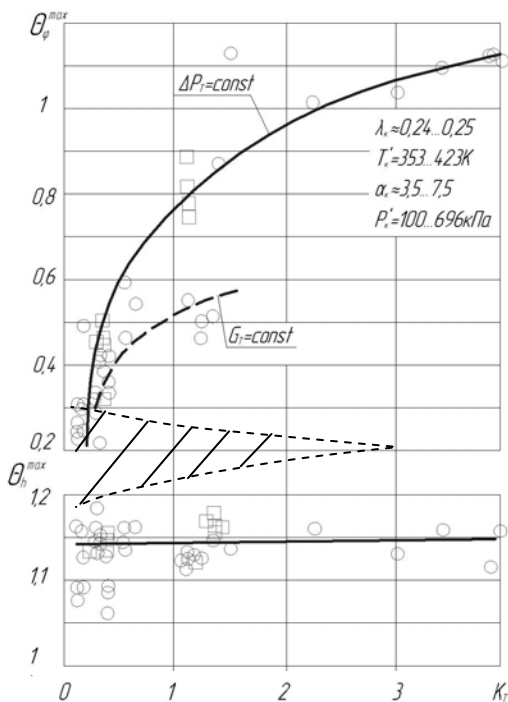


Рисунок 4 - Влияние начальной неравномерности распределения топлива по форсунок на характеристики выходного поля температуры газа камер МГТД

взяться значения  $K_T$  меньше  $0,1 \div 0,2$ . Анализ литературных данных показывает, что на характеристики ПГТ на выходе из КС значительное влияние оказывает глубина проникновения струй вторичного воздуха  $\bar{B}_p$ . При этом для ПКС  $\bar{B}_{p \text{ опт}} \approx 0,5 \dots 0,6$ .

На рисунке 1 показано влияние раскрытия  $\bar{F}_{см}^H$  на глубину проникновения  $\bar{B}_{p \text{ ср}}^H$  и  $\Theta_\phi^{max}$  для КС двигателя МД-120.

При этом оптимальное соотношение  $\Sigma F_0 / F_K \approx 1,1 \dots 1,2$ , а величина  $\bar{B}_{p \text{ ср}} = 0,5 \dots 0,55$ . Следует также отметить, что течение в наружном кольцевом канале менее стабильно, чем во внутреннем, т. к. площадь, которую должен заполнить поток воздуха, гораздо больше  $\left( \bar{F}_{KK}^H / \bar{F}_{KK}^{BH} \approx 3 \dots 5 \right)$ . При увеличении расхода происходит более полное заполнение наружного кольцевого канала и возмущение уменьшается.

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

Отмеченное обстоятельство позволяет более обоснованно подходить к выбору допустимого уровня разброса расходных характеристик топливных форсунок. Не следует, вероятно, доби-

В результате проведенных на первом этапе работ удалось экспериментально установить оптимальную величину и взаимное расположение отверстий для подвода воздуха, поэтому в дальнейших исследованиях использовались доработанные КС.

С целью выяснения влияния изменения проходных сечений фронтного устройства ( $\overline{F}_{\Phi P}$ ), наружного и внутреннего смесителей ( $\overline{F}_{CM}^H$  и  $\overline{F}_{CM}^{BH}$ ) на выходное поле температуры и распределение воздуха по кольцевым каналам на одном из вариантов КС проведен комплекс исследований в широком диапазоне изменения их характерных площадей:

$$F_{\Phi P} / \Sigma F_0 = 0 \dots 0,225; \quad F_{CM}^H / \Sigma F_0 = 0 \dots 0,3; \quad F_{CM}^{BH} / \Sigma F_0 = 0 \dots 0,253.$$

По степени влияния их можно расположить в следующем порядке (см. рисунок 5):

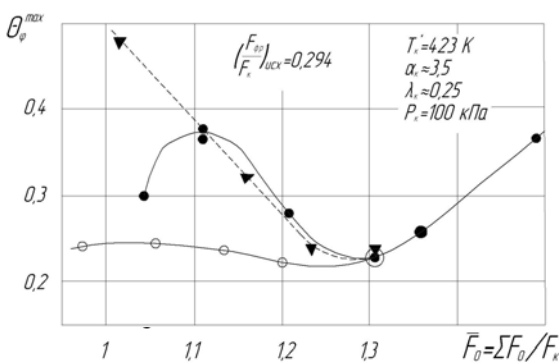


Рисунок 5 - Влияние раскрытия жаровой трубы на  $\theta_{\phi}^{max}$  камеры сгорания двигателя МД-120:

•-  $\overline{F}_{CM}^H = var$ ; ○-  $\overline{F}_{CM}^{BH} = var$ ; ▼-  $\overline{F}_{\Phi P} = var$

фронтное устройство, наружный смеситель, внутренний смеситель. Изменение площади фронтного устройства оказывает наибольшее воздействие на уровень  $\theta_{\phi}^{max}$  и практически не влияет на максимальный уровень радиальной неравномерности.

Это является прямым следствием незавершенности 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.

На рисунке 6 приведены результаты исследований по влиянию степени «раскрытия» жаровой трубы камеры сгорания (трубчато-кольцевого типа) двигателя МД-45.

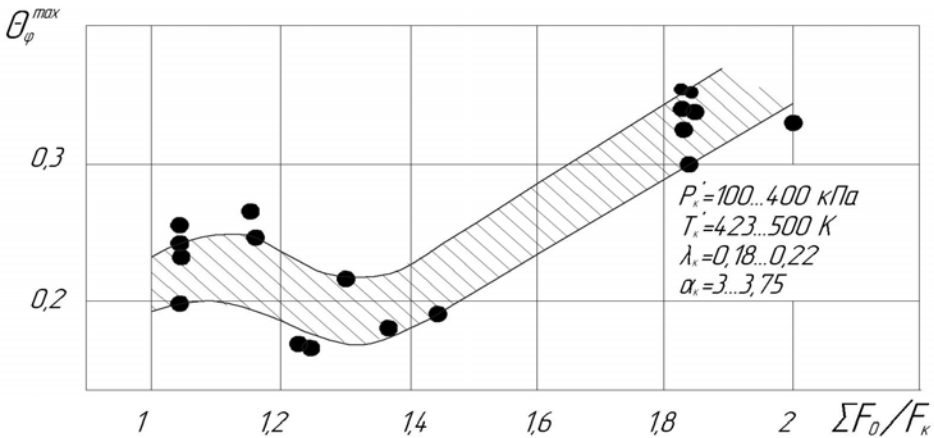


Рисунок 6 - Влияние отношения  $\Sigma F_0 / F_K$  на характеристики выходного поля температур газа КС двигателя МД-45

Видим, что зависимость имеет качественно один и тот же характер протекания, что и для двигателя МД-120 (см. рисунок 5), но отличается градиентом изменения  $\theta_{\varphi}^{max} = f(\overline{F_0})$  и уровнем минимальной неравномерности  $\theta_{\varphi}^{max}$  при одном и том же значении  $\overline{F_0} = 1,25 \dots 1,35$ . При этом  $(\theta_{\varphi}^{max})_{\text{МД-120}} = 0,22 \dots 0,23$ ,  $(\theta_{\varphi}^{max})_{\text{МД-45}} = 0,15 \dots 0,16$ . С физической точки зрения это объясняется тем, что для трубчато-кольцевой КС двигателя МД-45 легче обеспечить пониженную неравномерность сносящего потока из-за более равномерного обтекания головок жаровой трубы.

Так как уровень минимальной окружной неравномерности наблюдается при равенстве расходов воздуха  $G_v^H \text{ см}$  и  $G_v^{6H} \text{ см}$ , 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 путем выбора соответствующего шага между отверстиями первого ряда и смесителя на наружной обечайке ЖТ при неизменной площади отверстий первого ряда.

В этом же разделе рассмотрено влияние режимных параметров  $(T_K^*, P_K^*, \alpha_K, \lambda_K)$  на уровень  $\Theta_\varphi^{max}$  и  $\Theta_h^{max}$ . Показано, что величина  $T_K^*$ ,  $\alpha_K$  и  $\lambda_K$  оказывают значительное влияние на окружающую неравномерность ПТГ КС мало-размерных ГТД.

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

В четвёртом разделе рассмотрены вопросы моделирования окружной и радиальной неравномерностей ПТГ на выходе из камер сгорания малоразмерных ГТД, а также взаимосвязь между ними.

Анализ результатов экспериментальных и теоретических исследований показывает, что физическую модель процесса формирования поля температуры газа  $\Theta_\varphi^{max}$  можно представить в виде:

$$\Theta_\varphi^{max} = f\left(\frac{\Sigma F_o}{F_{ж}}; \frac{\Sigma F_{kk}}{\Sigma F_o}; \alpha_{фр}; \bar{l}_Г; \lambda_k; T_k^*\right) \quad (1)$$

Три первых параметра определяют глубину проникновения струй воздуха в сносящий поток, величина  $\bar{l}_Г$  – длину, на которой происходит перемешивание,  $\lambda_k$  – аэродинамическую структуру течения в кольцевых каналах и жаровой трубе,  $T_k^*$  – качество подготовки топливо-воздушной смеси.

Результаты исследований для КС МГТД рассматриваемых схем целесообразно представить в виде следующих зависимостей (см. рисунки 7 и 8):

$$\Theta_\varphi^{max} = f(F_{kk} / \Sigma F_o), \text{ при } F_o / F_{ж} \approx const \quad (2);$$



$$\Theta_{\varphi}^{\max} = f(\alpha_{\text{фр}}), \text{ при } \bar{l}_r \approx \text{const} \quad (3)$$

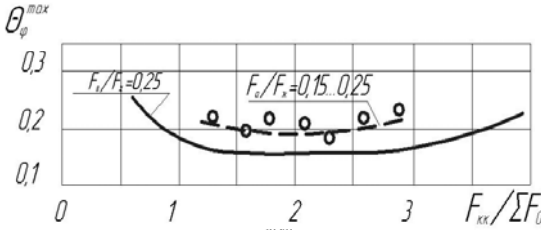


Рисунок 7 - Зависимость  $\Theta_{\varphi}^{\max}$  от "степени раскрытия"

жаровой трубы для камер сгорания различной размерности  
 \_\_\_\_\_, ПКС, - - - - - по данным автора (КС МГТД)

Используя методы регрессионного анализа для величины  $\Theta_{\varphi}^{\max}$  получена следующая зависимость:

$$\Theta_{\varphi}^{\max} = \left\{ \frac{0,0129 \left[ \left( \frac{\Sigma F_0}{F_{\text{жс}}} \right)^{0,25} - 0,18 \right] \cdot \exp \left( 3,02 \sqrt{\frac{F_{\text{КК}}}{\Sigma F_0}} \right) \cdot \exp \left[ -C \left( \frac{1}{\alpha_{\text{фр}}} - \frac{1}{\alpha_0} \right)^2 \right]}{\left( \frac{F_{\text{КК}}}{\Sigma F_0} \right)^2 \left( \bar{l}_r^{0,25} - 0,633 \right)} + \frac{0,21 \exp(-10 \alpha_{\text{фр}})}{\left( 1,2 + 0,9 \bar{l}_r \right)^2} \right\} f(T_k^*, \lambda_k), \quad (4)$$

где  $C = 7,6 \bar{l}_r \cdot \exp(-0,9 \bar{l}_r^2)$ ,  $\alpha_0 = 0,78 + 0,168 \bar{l}_r^{2,18}$ .

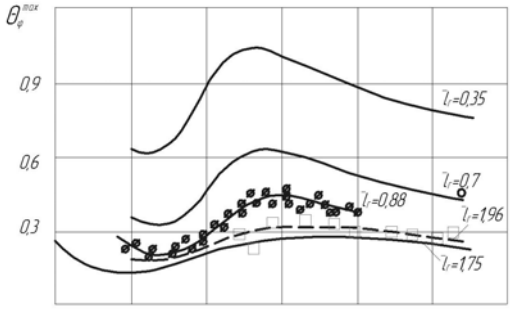


Рисунок 8 - Зависимость  $\Theta_{\varphi}^{\max}$  от  $\alpha_{\text{фр}}$  для камер сгорания различной размерности  
 \_\_\_\_\_, ПКС, - - - - - по данным автора (КС МГТД,  
 $\bar{l}_2 = 0,88; \bar{l}_2 = 1,96$ )

Влияние режимных параметров  $T_k^*$  и  $\lambda_k$  можно представить в виде произведения двух функций  $f(T_k^*, \lambda_k) = f(\bar{T}_k^*) \cdot f(\bar{\lambda}_k)$ , (5) если представить эти зависимости в безразмерном виде:

$$f(\bar{T}_k^*) = \left[ 5(\bar{T}_k^* - 0,826)^2 + 2,037 \right] \exp(-0,7474 \cdot \bar{T}_k^*), \quad (6)$$

$$f(\bar{\lambda}_k) = [ 2,864(\bar{\lambda}_k - 1)^2 + 0,124(\bar{\lambda}_k - 1) + 1,0085 ], \quad (7)$$

где  $\bar{T}_K^* = \frac{T_K^*}{460}$ ;  $\bar{\lambda}_K = \frac{\lambda_K}{\lambda_{Kном}}$ .

Физическая модель уровня радиальной неравномерности имеет следующий вид:

$$\Theta_h^{\max} = K(\Theta_h^{\max})_{u0}, \quad (8)$$

где  $(\Theta_h^{\max})_{u0}$  радиальная неравномерность расчётной эпюры, которая определяется только температурой и количеством воздуха, поступающего через проходные сечение системы охлаждения:  $k = f(F_0/F_{жс}; \alpha_{фр}; \bar{l}_r)$  - поправочный коэффициент, для которого получено следующее математическое выражение:

$$K = \left[ 1 + 0,065 \left( \frac{\Sigma F_0}{F_{жс}} \right)^{0,35} \right] \left[ 0,24 \exp(-2,8 \bar{l}_r) + 0,9 \right] + b \exp \left[ -C \left( \frac{1}{\alpha_{фр}} - \frac{1}{0,66} \right)^2 \right], \quad (9)$$

$$b = f(\bar{l}_r) = 0,21 \sqrt{\bar{l}_r} \cdot \exp(-1,35 \bar{l}_r^2) + 0,02 \quad (10)$$

$$C = f(\bar{l}_r) = 14,5 \sqrt{\bar{l}_r} \cdot \exp(-1,5 \bar{l}_r^2) + 2,5 \quad (11)$$

Математические модели расчёта  $\Theta_\phi^{\max}$  и  $\Theta_h^{\max}$  справедливы для геометрически подобных КС МГТД рассматриваемых схем с расходом воздуха

$G_B = 0,5 \dots 2,5$  кг/с в следующем диапазоне изменения определяющих параметров:

$\alpha_{фр} = 0,3 \dots 1,5$ ;  $F_{kk}/\Sigma F_0 = 1,2 \dots 3$ ;  $\Sigma F_0/F_{жс} = 0,12 \dots 0,35$ ;  $\bar{l}_r = 0,875 \dots 1,96$ ;

$\bar{\lambda}_K = 0,6 \dots 1,4$ ;  $\bar{T}_K^* = 0,63 \dots 1$ ;  $\bar{l}_\phi \leq 1,7$ ;

при соблюдении следующих условий:

- устранены неконтролируемые утечки воздуха через щели для установки форсунок, горелок, свечей зажигания и т.д.;
- КС выполнена в пределах допусков на изготовление изделия;
- время наработки КС  $\tau_{раб} \leq 40$  час;
- коэффициент неравномерности распределения топлива по форсункам  $K_T \leq 0,2$ .

В процессе проектирования и доводки КС значительный интерес представляет взаимосвязь между  $\Theta_\varphi^{\max}$  и  $\Theta_h^{\max}$ , при условии, что изделие доведено по уровню окружной неравномерности. Анализ литературных данных и исследования автора показывают, что величина минимально достижимой максимальной радиальной неравномерности ( $\Theta_h^{\max}$ )<sub>min</sub> зависит от размерности двигателя (см. рисунок 9)

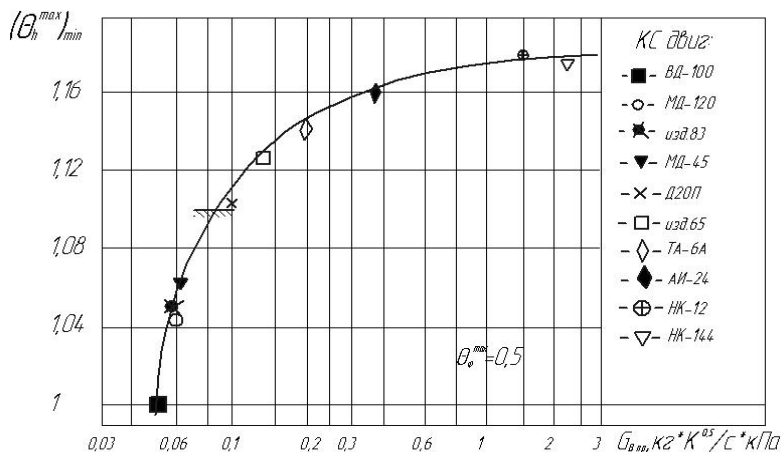


Рисунок 9 - Изменение минимально достижимой величины радиальной неравномерности от  $G_{внр}$

Выражение для определения минимально достижимой радиальной неравномерности можно обобщить следующими зависимостями:

$$\left(\Theta_h^{\max}\right)_{min} = 1 + 2 \left( 3,017 \cdot G_{внр} - 8,628 \cdot G_{внр}^2 - 0,114 \right) \cdot \Theta_\varphi^{\max}, \quad (12)$$

$$\text{при } G_{внр} = \frac{G_B \cdot \sqrt{T_K^*}}{P_K^*} = 0,05 \dots 0,2;$$

$$\left(\Theta_h^{\max}\right)_{min} = 1 + \left( 0,295 \cdot \exp 0,082 \cdot G_{внр} \right) \cdot \Theta_\varphi^{\max}, \quad (13)$$

$$\text{при } G_{внр} = 0,2 \dots 2,6;$$

В пятом разделе изложены рекомендации по обеспечению заявленных характеристик выходного ПТГ при проектировании и доводке КС МГТД, а также их практическое использование.

При проектировании камер сгорания МГТД для обеспечения требуемых характеристик неравномерности выходного поля температуры газа необходимо согласовать процессы, протекающие в первичной зоне и зоне смешения с конструктивными и режимными параметрами:

- исходя из целевого назначения МГТД, выбрать наиболее рациональную схему камеры сгорания;

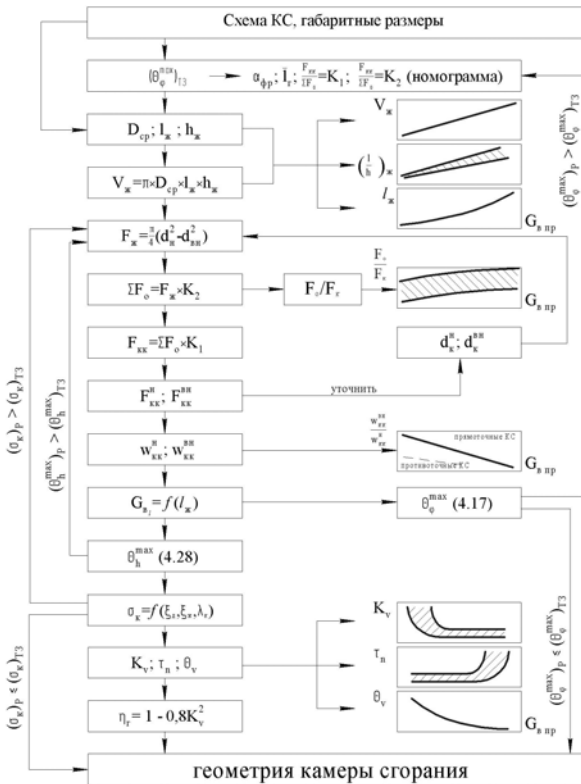


Рисунок 10 - Алгоритм выбора проектных параметров камер сгорания малоразмерных ГТД

- обеспечить минимально возможную неравномерность температурного поля сносящего потока;
- согласовать глубину проникновения струй смешительного воздуха наружной и внутренней обечаек жаровой трубы;
- обеспечить необходимую аэродинамическую структуру течения в кольцевых каналах и жаровой трубе.

Используя полученные модели был разработан алгоритм (см. рисунок 10) выбора проектных параметров КС малоразмерных ГТД, обеспечивающих заявленные характеристики изделия по температурному полю ( $\Theta_{\phi}^{\max}$  и  $\Theta_h^{\max}$ ),

потерям полного давления ( $\sigma_K$ ) и коэффициенту полноты сгорания ( $\eta_f$ ).

Далее он был успешно реализован при доводке и создании КС следующих двигателей: МД-120, МД-45, ВД-100 и изделий 83 и 123. На основании проведённых иссле-

дований можно предложить следующие проверенные на практике и защищённые авторскими свидетельствами рекомендации по формированию полей температуры газа в КС МГТД ( $G_{B\text{ ПР}} = 0,05...0,1$ ).

С целью получения минимальных значений окружной неравномерности  $\Theta_{\varphi}^{\max}$  температурного поля необходимо:

- учитывать величину остаточной закрутки потока  $\varphi_{ост}$  путём смещения отверстий наружного смесителя и первого ряда отверстий на угол  $\varphi_{смещ.от} \approx \varphi_{ост}$  относительно штатного "коридорного" расположения; (а. с. №296080)
- выравнивание расходов воздуха через внутренний и наружный смеситель путём выбора соответствующего шага между отверстиями первого ряда и смесителя на наружной обечайке жаровой трубы (а.с. №293564).

Ядро радиальной эпюры формировать путём изменения площади отверстий наружного смесителя, а на периферии - за счёт подачи системы пристенных струй. Также предложены рекомендуемые диапазоны конструктивных и режимных параметров для КС МГТД различных конструктивных схем ( $G_{B\text{ ПР}} = 0,05...0,1$ )

## ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ И ВЫВОДЫ

Проведённые исследования позволили разработать и обосновать комплекс мероприятий по формированию полей температуры газа применительно к задачам проектирования и доводки камер сгорания малоразмерных ГТД.

При этом были получены следующие основные научные результаты:

1. Выполнен анализ влияния размерности двигателя на параметры камер сгорания, результатом обобщения которого явилось установление особенностей, характерных только для малоразмерных ГТД

2. Установлено влияние входных параметров МГТД, конструктивных особенностей КС и режимных параметров на неравномерность выходного поля температур;

3. Разработаны математические модели, методика и алгоритм расчёта, позволяющие научно обоснованно прогнозировать выходные характеристики КС МГТД, для обеспечения требуемых параметров;

4. Разработана математическая модель для определения уровня минимально достижимой радиальной неравномерности. Показано, что она зависит от размерности, двигателя;

5. На основании выполненных обобщений результатов исследований КС МГТД разработаны и внедрены мероприятия по обеспечению заявленных характеристик при проектировании и доводке КС двигателей МД-120, МД-45, ВД-100, изд.83 и вновь разрабатываемом СНТК им. Н.Д. Кузнецова двигателя НК-123-ВР;

6. Экспериментальное оборудование и результаты испытаний КС МГТД внедрены в учебный процесс в виде лабораторной работы "Характеристики КС по полю температуры газа в выходном сечении".

## Основное содержание диссертации опубликовано в следующих работах:

1. Экспериментальное определение времени пребывания газа в зоне рециркуляции вихревых стабилизаторов пламени /Абрашкин В.Ю., Мещеряков В.П., Розно В.Г., Цыганов А.М. - В сб. Горение в потоке: Казань, 1982 - с. 31-35.
2. Исследование модификации фронтного устройства на базе смесительных элементов вихревого типа / Абрашкин В.Ю., Цыганов А.М. — В сб.: Тезисы докладов Всесоюз. межвузовской конф. «Газотурбинные и комбинированные установки». М., 1983. - с. 143-144.
3. Влияние геометрии элементов диффузора двухъярусной камеры сгорания на структуру течения и потери энергии в нем. / Абрашкин В.Ю., Матвеев С.Г. - В сб.: Механика жидкости и газа. Тр. 4 научн. техн. конф. мол. учен, и спец. Куйбышев, авиац. ин-та. — Куйбышев, 1986. - с. 65-75 (Деп. в ВИНТИ 2.07.86, №4820 - В 80 Деп.)
4. Влияние конструктивных и режимных параметров на формирование поля температур камер сгорания малоразмерных ГТУ. / Абрашкин В.Ю., Булычев Н.Я., Шамбан М.А., Файнгелерин Э.Т. - В сб.: Тезисы докладов и сообщений Всесоюз. научн. конф. «Газотурбинные и комбинированные установки», М., 1987. - с. 148, ДСП.
5. А.с. 293564 СССР. Спецтема. / Абрашкин В.Ю., Ковылов Ю.Л., Ланский А.М., Шамбан М.А. и др. (СССР). Заявл. 21.06.1988; Опубл. 3.05.1989.
6. А.с. 296080 СССР. Спецтема. / Абрашкин В.Ю., Ланский А.М., Шамбан М.А. (СССР). Заявл. 24.08.1988; Опубл. 1.06.1989.
7. О формировании полей температуры газа на выходе из прямоточных камер сгорания малоразмерных ГТУ. / Абрашкин В.Ю., Ланский А.М., Христюк О.В., Шамбан М.А., Файнгелерин Э.Т. -Газотурбинные и комбинированные установки. Тез. доклад, на Всесоюз. научной конф. М.: МГТУ, 1991 - с.138.
8. Влияние размерности ГТД на выходные характеристики КС. / Абрашкин В.Ю., Ковылов Ю.Л. - В сб.: Тезисы докладов X Всероссийской межвуз. научн.-технич.



конф. «Газотурбинные и комбинированные установки и двигатели», М.: МГТУ, 1996. - с. 132.

9. Проект камеры сгорания малоразмерного ГТД с расходом рабочего тела 0,3 кг/с. / Ланский А.М., Абрашкин В.Ю., Семенов А.В., Фетисов В.И., Цыганов А.М., Шамбан М.А. - В сб.: «Проблемы и перспективы развития двигателестроения в Поволжском регионе»: Доклады на междунар. научн.-технич. конф. Самара: СГАУ, 1997.-с. 191-197.

10. Рабочий процесс камер сгорания малоразмерных ГТД, проблемы и некоторые пути повышения его эффективности. /Лукачев В.П., Ланский А.М., Абрашкин В.Ю., Диденко А.А., Зубков П.Г., Ковылов Ю.Л., Матвеев С.Г., Цыганов А.М. Шамбан М.А., Яковлев В.А. // Вест. СГАУ. Сер.: Процессы горения, теплообмена и экология тепловых двигателей. Вып. 1; Самар. гос. аэрокосм. ун-т, Самара, 1998. - с.11-39.

11. Способ определения и оценки неравномерности поля температур газа на выходе из камеры сгорания ГТД. / Ковылов Ю.Л., Пашков Д.Е., Диденко А.А., Абрашкин В.Ю. // Вест. СГАУ. Сер.: Процессы горения, теплообмена и экология тепловых двигателей. Вып. 1; Самар. гос. аэрокосм. ун-т, Самара, 1998. - с. 202-211.

12. Влияние остаточной закрутки потока на характеристики выходного поля температур в камерах сгорания малоразмерных ГТД. /Абрашкин В.Ю., Ланский А.М. - В сб.: Тезисы докладов IV Всесоюзной научно-техн. конф. «Процессы горения, теплообмена и экология тепловых двигателей», Самара: СГАУ, 2004. - с. 143-144.

13. Исследование полей температуры газа на выходе из камер сгорания малоразмерных ГТД. / Абрашкин В.Ю. - В сб.: Тезисы докладов IV Всероссийской научно-техн. конф. «Процессы горения, теплообмена и экология тепловых двигателей», Самара: СГАУ, 2004.-с. 142-143.