

УДК 621.452.3

## СОВРЕМЕННОЕ СОСТОЯНИЕ ПРОБЛЕМЫ И ПУТИ УЛУЧШЕНИЯ ХАРАКТЕРИСТИК РАБОЧЕГО ПРОЦЕССА КАМЕР СГОРАНИЯ МАЛОРАЗМЕРНЫХ ГАЗОТУРБИННЫХ ДВИГАТЕЛЕЙ

А.М. ЛАНСКИЙ, С.В. ЛУКАЧЕВ, С.Г. МАТВЕЕВ

Рассмотрено состояние исследований в области организации рабочего процесса в камерах сгорания малоразмерных газотурбинных двигателей (ГТД). Намечены пути улучшения характеристик камер сгорания.

**Ключевые слова:** малоразмерные ГТД, камеры сгорания, диффузоры, вынужденное воспламенение, гидравлическое сопротивление, стабилизация пламени, выгорание топлива, поля температуры газа, запуск камер сгорания.

Развитие авиационных ГТД идет по пути улучшения их термодинамических параметров, схемно-конструктивного совершенствования с целью повышения показателей эффективности использования авиационной силовой установки (СУ) на борту летательного аппарата (ЛА).

Расширение диапазона применения ГТД как по высоте и скорости полета, так и по условиям эксплуатации (климатическим условиям, наличию пыли, снега, биочастиц, порывам ветра, турбулентности атмосферы и др.) определяет необходимость сложнейшего комплекса доводочных работ. Хотя подобные проблемы свойственны в той или иной мере авиационным двигателям всех типов, особую остроту, повышенную неопределенность и сложность они приобретают для малоразмерных ГТД (МГТД). Малоразмерность, особо тяжелые условия эксплуатации, характер взаимодействия с ЛА и др. являются существенными факторами, которые необходимо учитывать на протяжении всего жизненного цикла двигателя.

Успешное решение вышеобозначенных проблем в значительной мере зависит от степени совершенства рабочего процесса и конструкции камеры сгорания. Этот узел обеспечивает устойчивое горение в широком диапазоне режимных параметров при высокой полноте сгорания топлива, низких потерях энергии потока рабочего тела, равномерное поле температуры газа на входе в турбину, надежную стабилизацию пламени и запуск камеры сгорания (КС) [1; 2].

Анализ назначения, требований и особенностей эксплуатации МГТД, а также характера изменения конструктивных и режимных параметров на основе статистических данных позволили сформулировать некоторые основные признаки камер сгорания МГТД, которыми являются: изменения в схеме КС, которые диктуются спецификой облика и низкими термогазодинамическими параметрами двигателя, ростом относительных величин структур, размеров и явлений в организации рабочего процесса и конструкции КС при уменьшении ее размеров.

Вопросами теории горения и ее практическим применением к реальным устройствам занимались многие ведущие ученые-теоретики, экспериментаторы и конструкторы.

Вместе с тем многие вопросы, касающиеся горения в закрученном потоке, воспламенения ТВС с учетом аэродинамики в первичной зоне, зависимости выгорания топлива, стабилизации пламени, полей температуры газа на выходе из КС и их запуска в различных высотноклиматических условиях, характерных для КС МГТД, до сих пор остаются малоизученными.

Для их реализации был создан комплекс стендов, объектов, технологий испытаний и доводки камер сгорания малоразмерных ГТД [1].

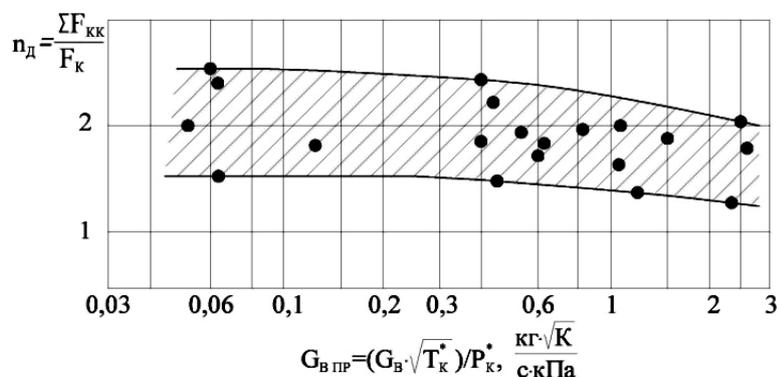
Результаты исследований отдельных стадий рабочего процесса камер сгорания малоразмерных ГТД позволили установить их основные особенности.

**Формы диффузоров, режимы течения и измерение критериев эффективности.** Анализ конструктивных схем КС МГТД показал, что диффузоры для КС данного типа характеризуются целым рядом особенностей: отсутствие начального участка диффузора, наличие поворота части потока воздуха на  $90 - 180^\circ$  во внутренний кольцевой канал.

Для оценки характеристик диффузора за его длину  $L_D$  принималось расстояние от выходной кромки спрямляющего аппарата компрессора до миделевого сечения в кольцевых каналах камеры сгорания. При оценке работы диффузоров и в зависимости от размерности использовались следующие характеристики:

$$n_D = \Sigma F_{KK} / F_K; \quad \sigma_D = P_D / P_{K*}; \quad \xi_D = \Delta P_D / (\rho W_K^2 / 2),$$

где  $n_D$  – степень раскрытия диффузора;  $\sigma_D$  – коэффициент восстановления полного давления;  $\xi_D$  – коэффициент гидравлических потерь. Анализ показывает, что в выполненных камерах сгорания  $n_D$  изменяется в диапазоне от 1,5 до 2,5 (рис. 1). Практика показывает, что при  $n_D < 2,0$  удается обеспечить стабильное протекание процессов в камерах сгорания. Кроме того, в прямооточных кольцевых камерах сгорания потери в диффузоре составляют 30 – 40% от общих потерь, в прямооточных 10 – 15%.

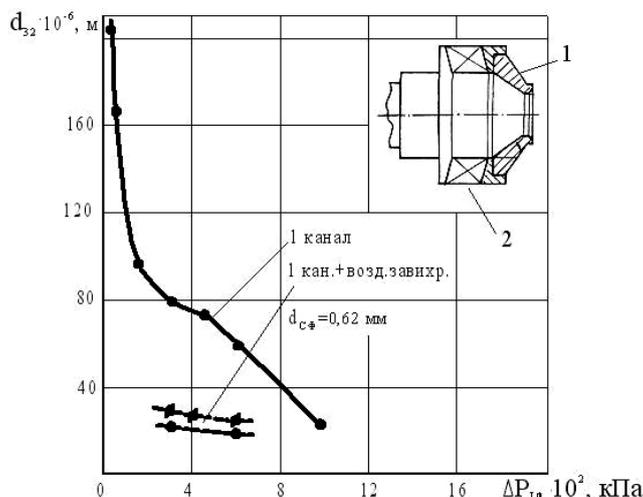


**Рис. 1.** Зависимость степени раскрытия диффузора ( $n_D$ ) от  $G_{в.пр}$ :

$\Sigma F_{KK}$  – суммарная площадь кольцевых каналов;  $F_K$  – площадь на входе в КС;

$T_{к}^*$  – температура воздуха на входе в КС;  $P_{к}^*$  – давление воздуха на входе в КС

**Распыливание топлива пневмомеханическими форсунками.** Для исследования распыла топлива использовалась вихревая горелка с двухканальным подводом топлива. Экспериментальные результаты по ней представлены на рис. 2.



**Рис. 2.** Зависимость среднего диаметра капель от давления топлива ( $P_T$ ):

1 – конфузорный насадок; 2 – лопаточный завихритель

При  $\Delta P_{\text{Тф}} \leq 300$  кПа средний диаметр капле составляет  $d_{32}=80 \dots 200$  мкм, при дальнейшем увеличении давления топлива диаметр капле уменьшается до  $d_{32} = 20 \dots 40$  мкм. При подаче воздуха через завихритель размеры капле оказываются примерно одинаковыми независимо от подачи топлива по контуру.

**Вынужденное воспламенение топливно-воздушной смеси в камерах сгорания** является сложным многостадийным явлением, зависящим от физико-химических процессов, протекающих в первичной зоне. Поэтому, как правило, в практике изучения сложных физических явлений используется прием упрощения рассматриваемого явления и изучения отдельных составляющих его элементарных процессов.

Для формирования представления о физической картине процесса зажигания использовались данные различных исследований, в которых, однако, отсутствуют эксперименты с зоной обратных токов. На моделях, имитирующих первичную зону камеры сгорания, выполнена визуализация процессов воспламенения и распространения пламени в камере сгорания от искрового источника.

**Рабочий процесс вихревых горелок.** Выгорание топлива и стабилизация пламени в вихревых горелках определяются гидродинамикой течения, физико-химическими параметрами вытекающей из горелки топливно-воздушной смеси и массообменом между зоной рециркуляции и основным потоком. В силу многообразия схем горелок и влияющих факторов показать влияние каждого из них в полном объеме не предоставляется возможным. Поэтому были рассмотрены наиболее распространенные в практике сжигания топлив схемы вихревых горелок.

Проведенные исследования аэродинамики течения, факела горения и состава смеси в зоне рециркуляции, процессов массообмена между основным потоком и зоной рециркуляции позволили получить важные эмпирические зависимости и уточнить некоторые особенности рабочего процесса вихревых горелок на различных режимах работы.

**Аэродинамика и гидравлическое сопротивление.** Знания аэродинамической структуры течения в камерах сгорания МГТД имеют важное значение при их проектировании. При правильном сочетании решений в области аэродинамики и подачи топлива в первичную зону возможно сокращение сроков проектирования и доводки конструкции камеры сгорания.

Если в большинстве существующих камер сгорания обтекание жаровой трубы, как правило, условно «симметричное», то в МГТД из-за вынужденных различных схемных решений – более сложное, что приводит к дополнительным потерям полного давления и, следовательно, к разнице статических давлений на обечайках жаровой трубы.

Поэтому был проведен комплекс исследований, позволяющий установить количественные зависимости между параметрами, характеризующими аэродинамическую структуру течения в жаровой трубе. Результаты их были реализованы в виде усовершенствованной методики гидравлического расчета КС МГТД [1].

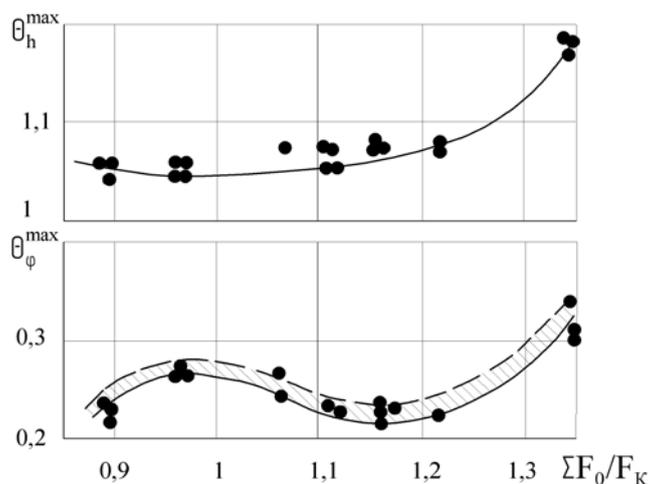
**Выгорание топлива в камерах сгорания малоразмерных ГТД.** Выгорание топливно-воздушной смеси (ТВС) в камере сгорания – это сложный процесс, который определяется аэродинамикой течения в первичной зоне, конструктивными, режимными параметрами и размерами КС. Учитывая многообразие факторов, влияющих на выгорание ТВС, его изучение было построено в следующем порядке: исследовалось выгорание топлива по длине жаровой трубы на природном газе (для исключения влияния жидкой фазы), определялось влияние на него конструктивных и режимных параметров, обобщались по различным моделям и критериям полученные результаты для камер сгорания переменной размерности на жидком и газообразном топливах [1].

**Стабилизация пламени в камерах сгорания малоразмерных ГТД.** Если стабилизация пламени за плохообтекаемыми телами изучена достаточно полно, то работ по изучению вышеотмеченного явления в закрученном потоке недостаточно. Что касается КС МГТД, то данной проблеме уделялось крайне мало внимания. Поэтому были проведены исследования стабилиза-

ции пламени в закрученном потоке (в основном использовались результаты Самарской школы «горельщиков»). Это позволило разработать математическую модель стабилизации с учетом особенностей закрученных течений [1].

**Формирование полей температур газа на выходе из камер сгорания малоразмерных ГТД.** Если в большинстве существующих камер сгорания обтекание жаровой трубы, как правило, «симметричное», то в малоразмерных ГТД из-за различных схемных решений – более сложное, что приводит к дополнительным потерям полного давления во внутреннем кольцевом канале и, следовательно, к разнице статических давлений на стенках жаровой трубы.

На рис. 3 приведено влияние раскрытия жаровой трубы (в данном случае за счет уменьшения относительной площади  $\Sigma F_o/F_K$ ) на характеристики КС двигателя МД-120.



**Рис. 3.** Влияние относительной площади  $\Sigma F_o/F_K$  на характеристики выходного поля температуры газа камеры сгорания двигателя МД-120:

$$T_{kc}^* = 423 \text{ К}; \alpha_k = 4,5 \dots 5,2; F_{\phi p} = 0,147; \lambda_k = 0,25; P_k^* = 100 \text{ кПа}$$

Как показывают исследования, минимальный уровень окружной и радиальной неравномерности поля температуры газов достигается при равных расходах через наружный и внутренний смесители.

Так как наружная обечайка жаровой трубы камер сгорания МГТД находится под избыточным перепадом давления, то можно предположить, что любые неравномерности потока на выходе из диффузора прежде всего оказывают влияние на характеристики поля температуры газа (ПТГ) в окружном направлении [1; 3].

**Запуск камер сгорания.** Результаты экспериментального исследования влияния параметров потока воздуха, параметров системы зажигания, свойств топлива и качества ТВС на пусковые характеристики камер сгорания МГТД показали, что снижение температуры ( $T_{kc}^*$ ) и давления ( $P_k^*$ ) приводит к смещению «бедной» границы в область более «богатых» значений по  $\alpha_k$  и, кроме того, к снижению предельных значений  $\alpha_k^{\max}$  и  $\lambda_k^{\text{пред}}$  (рис. 4, 5). Это объясняется ухудшением качества ТВС и перераспределением топлива в первичной зоне.

Устойчивое воспламенение смеси в камере сгорания в значительной степени зависит от концентраций паров топлива у свечи, которая определяется качеством подготовки смеси и свойствами топлива. Учитывая, что в малоразмерных ГТД используются различные топлива, было исследовано влияние температуры и вязкости топлива на пусковые характеристики КС. Уменьшение температуры топлива приводит к уменьшению предельных значений  $\alpha_k^{\max}$  и  $\lambda_k^{\text{пред}}$ . Это связано как со снижением скорости испарения, так и с ухудшением качества распыливания топлива из-за увеличения вязкости [1; 4].

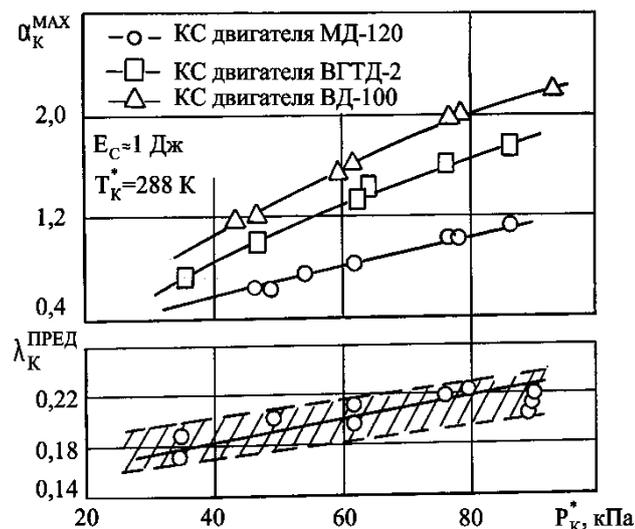


Рис. 4. Влияние давления воздуха на входе в КС на  $\alpha_k^{\text{max}}$  и  $\lambda_k^{\text{пред}}$

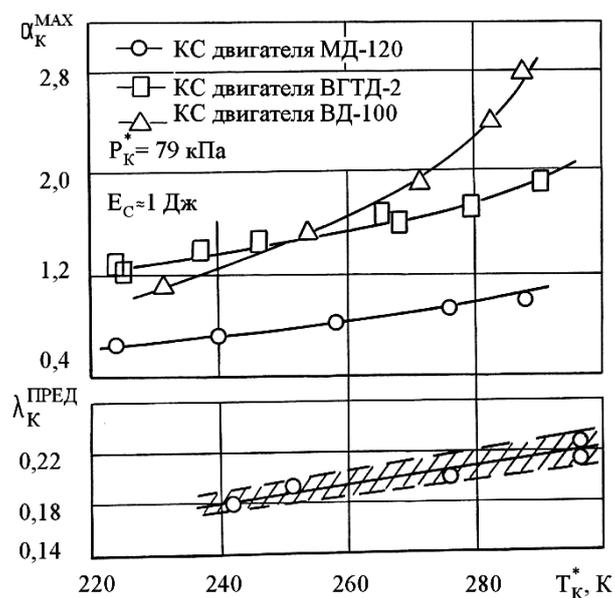


Рис. 5. Влияние температуры воздуха на входе в КС на  $\alpha_k^{\text{max}}$  и  $\lambda_k^{\text{пред}}$ .

### Заключение

В результате выполненного комплекса теоретических и экспериментальных исследований решена важная задача повышения эффективности рабочего процесса камер сгорания ГТД. Разработаны практические рекомендации по выбору параметров вновь создаваемых конструкций КС МГТД [1].

### ЛИТЕРАТУРА

1. Ланский А.М. Рабочий процесс камер сгорания малоразмерных ГТД / А.М. Ланский, С.В. Лукачев, С.Г. Матвеев. - Самара: Изд-во СНЦ РАН, 2009.
2. Лукачев В.П. Рабочий процесс камер сгорания малоразмерных ГТД, проблемы и некоторые пути повышения его эффективности / В.П. Лукачев, А.М. Ланский, В.Ю. Абрашкин // Вестник СГАУ, серия Процессы горения, теплообмена и экологии тепловых двигателей. - 1998. - Вып. 1. - С. 11-39.

**3. Абрашкин В.Ю.** Формирование полей температуры газа на выходе из камер сгорания малоразмерных ГТД: дис. ... канд. техн. наук. - Самара: СГАУ, 2006.

**4. Зубков П.Г.** Исследование процесса воспламенения при запуске камер сгорания малоразмерных ГТД: дис. ... канд. техн. наук. - Самара: СГАУ, 1991.

### **CURRENT STATE OF THE PROBLEM AND WAYS OF IMPROVING CHARACTERISTICS OF WORKING PROCESS OF COMBUSTION CHAMBERS OF LOW-DIMENSIONAL GTE**

**Lansky A.M., Lukachev S.V., Matveev S.G.**

The condition of research in the field of the organization of working process in chambers of combustion of low-dimensional GTE is considered. Ways of improving characteristics of combustion chambers are planned.

**Key words:** low-dimensional GTE, combustion chambers, diffuzors, the compelled ignition, hydraulic resistance, flame stabilization, burning out of fuel, a field of gas temperature, start of combustion chambers.

#### **Сведения об авторах**

**Ланский Анатолий Михайлович**, 1950 г.р., окончил КуАИ (1975), кандидат технических наук, доцент кафедры теплотехники и тепловых двигателей СГАУ, автор более 70 научных работ, область научных интересов – физика и моделирование процесса горения в камерах сгорания ГТД.

**Лукачев Сергей Викторович**, 1949 г.р., окончил КуАИ (1973), профессор, доктор технических наук, заслуженный работник высшей школы, заведующий кафедрой теплотехники и тепловых двигателей СГАУ, автор более 150 научных работ, область научных интересов - физика и моделирование процесса горения в камерах сгорания ГТД.

**Матвеев Сергей Геннадьевич**, 1959 г.р., окончил КуАИ (1982), кандидат технических наук, доцент кафедры теплотехники и тепловых двигателей СГАУ, автор более 70 научных работ, область научных интересов – физика и моделирование процесса горения в камерах сгорания ГТД.