

УДК 621.452.322.034

## ОСОБЕННОСТИ ОТРАБОТКИ ЭКОЛОГИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК И НАДЕЖНОСТИ КАМЕР СГОРАНИЯ ГТУ

©2002 А. М. Постников, Ю. И. Цыбизов, В. Н. Анисимов, В. В. Беляев

ОАО СНТК им. Н. Д. Кузнецова, г. Самара

В работе представлены особенности методологии отработки экологических характеристик и надежности камер сгорания ГТУ. Описаны способы “поузловой” отработки КС на пневмо- и гидромоделях и по секторам на блоке камеры сгорания, применяемые в СНТК им. Н.Д. Кузнецова.

Вопросы кардинального улучшения экологических характеристик при сгорании углеводородного топлива в камерах сгорания (КС) ГТУ могут быть решены за счет кардинального пересмотра традиционных методов организации рабочего процесса.

На основании накопленного опыта разработок малоэмиссионных традиционных и двухзонных КС (кольцевых и с выносными жаровыми трубами) в СНТК им. Н. Д. Кузнецова ниже представлены особенности методологии отработки экологических характеристик на надежности, рассматриваемые как дополнение к известным методам.

В основе лежит способ “поузловой доводки”, т. е. экспериментально-расчетный комплекс специальных испытаний, где главный акцент делается на опережающих исследованиях элементов конструкции камеры, определяющих характеристики и надежность на моделях, установках и отсеках и предшествующих натурным испытаниям в составе двигателя.

Опыт СНТК показывает, что даже при полном и своевременном финансировании и отработанном турбокомпрессоре это время не может быть менее 3-х лет.

На этапе проектирования в технических решениях необходимо учитывать особенности последующей отработки рабочего процесса в КС. В частности, если КС проектируется для вновь разрабатываемого двигателя, то возникает ряд вопросов, связанных с обеспечением необходимого состава смеси ( $\alpha$ ) в зонах горения. Практика показывает, что компрессор и турбина “с листа” не могут гарантировать заявленные КПД. Требуется их

многолетняя доводка. В результате первые экземпляры двигателей обеспечивают номинальную мощность подачей большего расхода топлива, чем заложено в проекте. Обогащение состава смеси в КС по  $\alpha$  достигает иногда 20 % относительно расчетного. По мере доводки турбокомпрессора эта разница существенно уменьшается.

Характеристики двухзонных КС, работающих на «бедной», предварительно перемешанной топливовоздушной смеси (ТВС), чрезвычайно чувствительны к колебаниям  $\alpha$ . Если изначально спроектировать и затем отработать КС на проектные значения расхода воздуха, то реально на лидерных двигателях (и не только) ТВС в дежурной и основной зонах будет забогашена, температура пламени значительно превысит расчетное значение. Это приведет к повышенным выбросам  $NO_x$  и снижению надежности жаровой трубы (ЖТ) в дежурной зоне. Если в конструкции камеры заранее предусмотреть перераспределение воздуха по ее элементам в пользу увеличения расхода последнего (обычно за счет уменьшения расхода на охлаждение ЖТ) в зоны горения для компенсации недобора КПД компрессором и турбиной, то можно реализовать проектные  $\alpha$  и  $T_{пл}$  в зонах горения и на лидерных двигателях. Однако сразу возникнут проблемы с надежностью ЖТ, а с течением времени по мере повышения КПД такая камера может потерять устойчивость относительно срыва пламени и виброгорения на пониженных режимах, упадет эффективность горения, а с ней возрастут выбросы  $CO$  и  $CH$ .

Принципиально есть два подхода к решению этой проблемы:

- на время отработки турбокомпрессора спроектировать и установить на двигатель традиционную КС с одноконтурной и однозначной системой управления расходом топлива с тем, чтобы камерные проблемы “не мешали” доводке компрессора и турбины;

- определить несколько периодов (обычно 2 или 3) отработки двигателя. Под каждый из этих периодов проектировать и отрабатывать горелки дежурной и основных зон с разной пропускной способностью, уменьшающейся от первого периода к последующим для обеспечения нужного  $\alpha$ . Следовательно, конструкция КС должна предусматривать возможность замены этих элементов, а еще лучше решение, когда обе зоны горения - дежурная и основная - являются автономным модулем.

При поузловой отработке на моделях на втором этапе очень полезной и относительно дешевой оказывается модель типа гидравлического лотка, представляющего собой бассейн, в который с одной стороны втекает, а с другой вытекает одинаковое количество воды. В этот бассейн помещают модель камеры, сделанную, например, из виниловых

листов, в масштабе 7:1...10:1 (рис. 1). При скорости воды 4...7 м/с обеспечивается значение критерия Рейнольдса (Re) в автомобильной области. Опыт показал, что в гидроротке целесообразно отрабатывать течения в кольцевых диффузорах и обтекание фронтального устройства жаровой трубы. Для визуализации течения на вход в диффузор на поверхность воды наносят тонкий слой мелкодисперсной алюминиевой пудры.

Для количественной оценки потерь полного давления воздуха и исследования аэродинамики трёхмерных течений используют модель, изготовленную из прозрачного пластика в масштабе 1:1 (рис. 2) для работы на воздухе. Моделируют, как правило, Re и (или) перепад давления на ЖТ.

Выше отмечалось, что для горелок предварительного смешения важно исследовать и отработать:

- пропускную способность по воздуху

$$B = f(\pi), \text{ где } B = \frac{G_6 \sqrt{T_6^*}}{P_6^*}, \pi = \frac{P_6^*}{P_{6\text{вых}}^*}, G_6^*, T_6^*,$$

где  $P_6^*$  – расход, полная температура и давление на входе в КС,  $P_{6\text{вых}}^*$  – полное давление на выходе из КС;

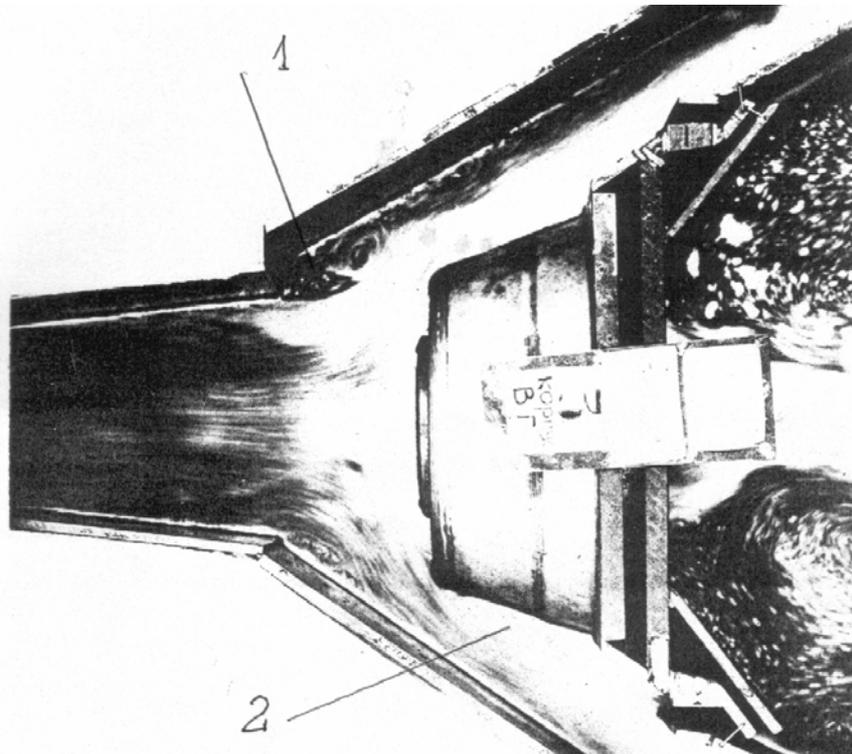


Рис. 1. Пример визуализации течения в гидроротке (1 – стабилизирующий отрыв потока в ступенчатом диффузоре, 2 – зона вихреобразования)

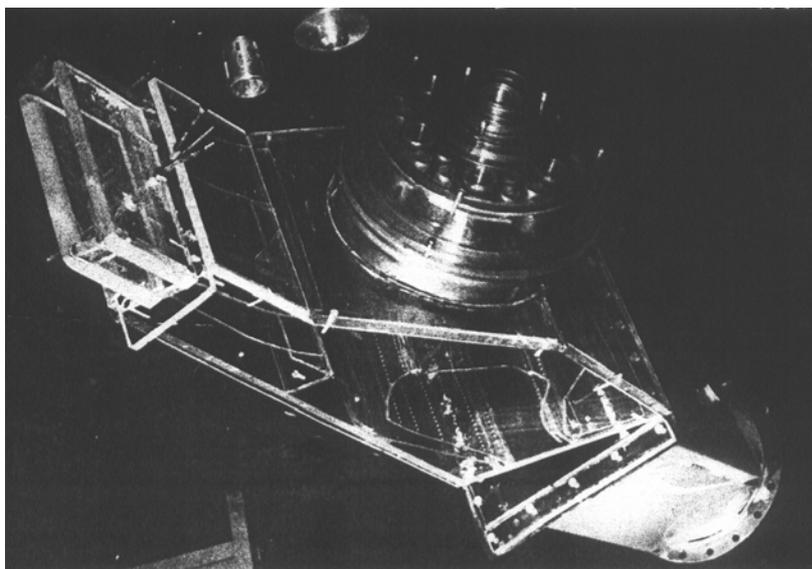


Рис. 2. Прозрачная модель модуля камеры сгорания двигателя НК-37 с выносными жаровыми трубами

- структуру течения на выходе из сопла, характеризующуюся обычно профилем скоростного напора по осевой составляющей  $\Delta P_{ск} = f(r)$ , где  $r$  - радиус сопла горелки;

- поле концентраций топлива по поперечному сечению сопла.

Все характеристики определяются при “холодной” продувке с давлением воздуха, близким к атмосферному. Модель для поузловой отработки горелок может быть выполнена из любого материала, но сама горелка и тракт, по которому к ней подводится воздух, должны соответствовать натурным (рис. 3).

При продувке по определению  $V$  и  $\Delta P_{ск}$  используют общепринятые в таких случаях критерии моделирования. Известно, что при многоструйной подаче одного из компонентов основными критериями являются соотношения скоростных напоров и масс перемешиваемых компонентов

$$\bar{\rho} \cdot \bar{W}^2 = \frac{(\rho \cdot W^2)_e}{(\rho \cdot W^2)_m},$$

где  $\rho$  - плотность,  $W$  - скорость потока.

Однако если при модельных испытаниях выдерживать коэффициент состава смеси  $\alpha_{см}$ , соотношение  $\bar{\rho} \cdot \bar{W}^2$  будет существенно больше натурного. К примеру, для КС двигателя НК-36СТ, где давление на номинальном режиме  $P_{к}^* = 2,4$  МПа, отношение скоростных напоров при модельных испытани-

ях ( $P_{к}^* \sim 0,1$  МПа) больше натурного  $\sim 3$  раза. Так как одновременное моделирование соотношения  $\bar{\rho} \cdot \bar{W}^2$  и  $\alpha_{см}$  при “холодных” продувках невозможно, на практике выбирают для работы более значимый критерий  $\bar{\rho} \cdot \bar{W}^2$ . В случае, когда в камере смешения используют закрученные воздушные потоки, для учёта Архимедовых сил необходимо добавить параметр отношения плотностей  $\bar{\rho} = \rho_e / \rho_m$ . Если при “холодных” продувках использовать натурное топливо - природный газ, - то при реальных температурах компонентов ( $T_e \sim T_2 \sim 273...293$  К)  $\bar{\rho}$  близко к натурному. При использовании других газов для моделирования  $\bar{\rho}$  обеспечивают нужную температуру этого газа.

По результатам второго этапа уточняют конструкторскую документацию на экспериментальную КС.

На третьем этапе идеальным является вариант исследования модуля (отсека) или всей КС натуральных размеров на автономном стенде, обеспечивающем натурные значения параметров: расхода, температуры и давления воздуха на входе в КС. Именно наличие таких стендов в Великобритании, США и Франции явилось основным фактором прогресса, достигнутого западными фирмами в снижении выброса вредных веществ с выхлопными газами ГТУ. При этих исследова-

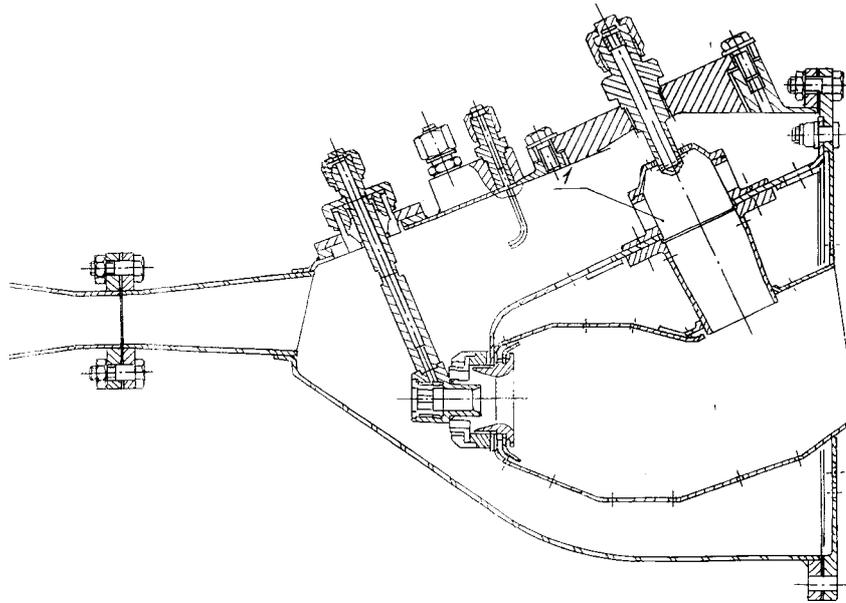


Рис. 3. Схема приспособления для продувки горелок (1- испытываемая горелка)

ниях удается полностью отработать экологические характеристики и полноту сгорания, надёжность, в значительной степени решать проблемы по устойчивости горения относительно срыва пламени, самовоспламенения смеси и проскока пламени в зонах подготовки гомогенной ТВС, а также идеологии управления рабочим процессом. При этих испытаниях не моделируются возмущения и неоднородности потока из компрессора, что может служить объяснением того факта, что иногда отработанные на отсеке по проскоку пламени горелки в составе двигателя имели этот дефект. На модуле (отсеке) остаются нерешенными проблемы температурного поля и виброгорения. Если на автономном стенде исследуется полноразмерная КС, то полностью отрабатывается температурное поле и частично устойчивость процесса относительно виброгорения. Таким образом, использование автономного стенда с натурными параметрами дает возможность решить почти все основные проблемы малотоксичных КС вне двигателя, что, по мнению иностранных исследователей, несмотря на дороговизну, в конечном итоге дает временной и экономической выигрыши.

В СНТК создана установка для отработки модулей, на которой можно получить параметры:  $G_в = 5$  кг/с;  $P_к^* = 2,0$  МПа;  $T_к^* = 700$  К. Ее нельзя назвать автономной, т. к. воздух высокого давления отбирается из-

за компрессора двигателя НК-38СТ. Из-за малости расхода воздуха задачи, которые можно решать на этой установке, ограничены:

- доводка горелочных устройств по предотвращению самовоспламенения и проскока пламени в условиях до  $P_к^* = 2,0$  МПа;
- ориентировочная оценка экологических характеристик;
- проверка теплового состояния ЖТ в дежурной зоне.

Большой объем работ третьего этапа ложится на испытания отсеков и полноразмерной камеры в модельных условиях при  $P_к^* \sim 0,11$  МПа:

- проверка гидравлических характеристик и распределение воздуха по зонам горения при “холодной” продувке и при огневых испытаниях;
- отработка запуска КС и устойчивости относительно срыва пламени;
- отработка температурного поля;
- отработка полноты сгорания;
- оценка гидравлических характеристик топливных магистралей.

При этом моделируются скорость воздуха на входе в диффузор камеры,  $\alpha$  и, по возможности,  $T_к^*$ .

На открытом стенде опытный исследователь получает много полезной информации при визуальном наблюдении картины горения.

Конечно, эти модельные характеристики не всегда совпадают с реальными (кроме характеристик запуска), но всегда можно “перекинуть мостик” от стенда к двигателю. Например, по полноте сгорания с помощью зависимости от критерия форсирования  $\eta_e = f(K_v)$ , по температурному полю, вводя эмпирические поправки, и т. д. То есть, по изменению характеристики на автономном стенде можно судить об ее изменении в составе двигателя, чего нельзя сказать об экологических показателях, в частности по  $NO_x$ .

Практика свидетельствует, что иногда худший вариант по  $NO_x$  при испытании на стенде показывал лучшие результаты на двигателе. По-видимому, эти факты можно объяснить двумя причинами:

- отсутствием моделирования по уже упоминавшемуся критерию смещения  $\bar{p} \cdot \bar{W}^2$ ;

- разным характером изменения кривой выгорания (зависимости  $\eta_e = f(L_{kc})$ ) для различных вариантов конструкции при увеличении давления  $P_k^*$ .

Поэтому, с нашей точки зрения, к результатам отработки экологических характеристик КС, работающих на «бедных» гомогенных смесях на стенде по давлению, близкому к атмосферному, и, соответственно, к пересчету стендовых показателей  $NO_x$  на натурные, нужно подходить очень осторожно.

На четвертом этапе, при натурных испытаниях на двигателе, обрабатываются все

характеристики КС, которые не были доведены при модельных испытаниях. Обычно это экологические характеристики, устойчивость относительно виброгорения и надёжность ЖТ, включая предотвращение самовоспламенения и проскока пламени. Процесс отработки носит итерационный характер, так как любое изменение конструкции неизбежно влияет на другие (возможно, уже доведенные) показатели камеры, поэтому приходится возвращаться ко второму и третьему этапам.

Для сокращения времени и средств на отработку в СНТК предложен и успешно реализуется метод испытаний по изобретению АС № 1176692, суть которого заключается в следующем. КС перед испытаниями на двигателе собирают с различными вариантами горелочных устройств: в кольцевой КС эти варианты размещают по секторам, в КС с выносными жаровыми трубами - по группам модулей. При испытаниях отбор проб газов производят в следе за этими секторами с учетом сноса потока. По результатам такого “чистого” сравнительного испытания выбирают оптимальный вариант. Важнейшим условием реализации этого метода должно быть равенство  $\alpha$  за секторами перед входом в турбину.

На этом этапе окончательно определяются требования к автоматизированной системе управления процессами в КС, а затем система горения обрабатывается в комплексе.

## LOW-EMISSION CHARACTERISTICS AND RELIABILITY OF GAS TURBINE ENGINE COMBUSTION CHAMBER AND PECULIARITIES OF THEIR PROVISION

© 2002 A. M. Postnikov, Yu. I. Tsybizov, V. N. Anissimov, V. V. Belyaev

N. D. Kuznetsov Scientific and Technical Complex, Samara

The paper discusses the peculiarities of the methodology of improving ecological and reliability characteristics of gas turbine combustion chambers. Methods of developing combustion chamber elements using pneumatic- and hydromodels as well as full-scale combustion chambers are described.