

ОБОБЩЕНИЕ ОПЫТА ОРГАНИЗАЦИИ ТУРБУЛЕНТНОГО ГОРЕНИЯ В КАМЕРАХ СГОРАНИЯ ДВИГАТЕЛЕЙ АЭРОКОСМИЧЕСКОГО И ЭНЕРГЕТИЧЕСКОГО НАЗНАЧЕНИЯ

© 2002 В. П. Савченко

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

Приведены результаты исследований влияния интенсификации процесса турбулентного смешения на эффективность, устойчивость горения и эмиссию вредных веществ в камерах сгорания аэрокосмического и энергетического назначения двигателей семейства НК. В ходе доводки КС получены зависимости “мягкого” и “жесткого” возбуждения высокочастотных (ВЧ) колебаний в КС ЖРД замкнутой схемы (двигателей НК-39, НК-33) от неравномерности потока газообразного компонента по сечению КС и от дальнобойности струй форсунок. На базе исследования источников возникающей турбулентности в КС разработаны две модели турбулизации потока: модель “Р” - в зонах обратных токов форсуночной головки и модель “С” - в струях форсунок от динамического взаимодействия компонентов топлива, от начальной турбулизации потока в газоводе КС, при входе потока в газовые каналы форсунок и др. Путём усовершенствования критерия Херша указанными моделями “Р” и “С” на базе созданных моделей генерации акустической энергии в КС экспериментально подтверждены разработанные принципы оптимизации указанных характеристик горения в форсажных камерах двигателей НК-25, НК-321 и в двухзонных камерах двигателей НК-36 СТ, НК-37, НК-38 СТ.

Решение ряда важнейших задач современных высокоэффективных двигателей достигается путем интенсификации процесса горения в камерах сгорания (КС). При этом требования высокой экономичности обуславливают необходимое достижение высоких параметров рабочего цикла двигателей и повышение теплонапряженности КС. При интенсификации процесса горения в КС повышается склонность к возникновению высокочастотной (ВЧ) неустойчивости горения, приводящей к разрушению КС и других агрегатов двигателя (рис. 1).

Несмотря на большой объем проведенных в нашей стране и за рубежом исследований ВЧ неустойчивости горения [1, 2], к настоящему времени не создана приемлемая инженерная методология оптимизации важнейших характеристик: эффективности, устойчивости горения и эмиссии вредных ве-

ществ. Это связано с недостаточным изучением процессов, протекающих в КС.

1. Интенсификация процесса горения в КС

Известно, что способность возбуждения ВЧ колебаний обычно связывается с распределением процесса горения по длине КС (с кривой выгорания $\eta(x)$ [1, 2]), отражающим интенсивность протекания физико-химических процессов вдоль КС:

$$\eta(x) = \frac{1}{1 + \frac{1}{\bar{\tau}_{nn}} + \frac{1}{\bar{\tau}_{nd}}}, \quad (1)$$

где $\bar{\tau}_{nn} = \frac{\tau_n}{\tau_n}$, $\bar{\tau}_{nd} = \frac{\tau_n}{\tau_d}$ - отношения времени пребывания сгорающей смеси в КС τ_n соот-

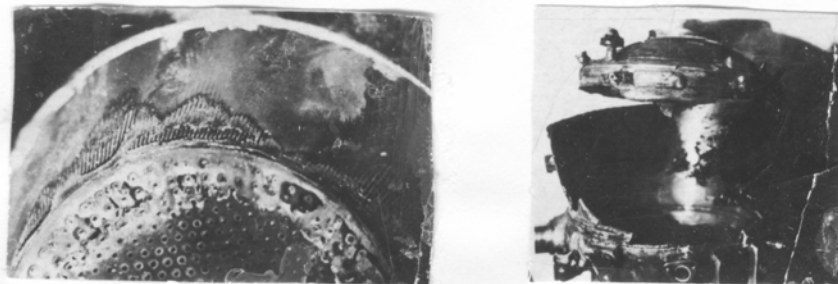


Рис. 1. Характер разгара и разрушения КС двигателя НК-39 при ВЧ колебаниях

ветственно к характерному времени реакции τ_n и ко времени турбулентной диффузии τ_d .

В работах Дорошенко В. Е. (ЦИАМ) параметр τ_{nn} представлен как “критерий форсирования” применительно к КС ГТД в виде

$$K_V = \frac{G_\theta}{(P^*)^{1,25} \cdot T^* \cdot V_{ж.тр.}}, \text{ где } G_\theta - \text{расход воз-}$$

духа через КС, P^* - давление в КС, T^* - температура воздуха на входе в КС, $V_{ж.тр.}$ - объём жаровой трубы. На ранних этапах доводки КС этот критерий сыграл положительную роль при обобщении влияния интенсификации кинетического горения на эффективность горения в КС газотурбинных двигателей.

Интенсивность турбулентного горения в КС ЖРД в работе Херша [3] выражена в зависимости от аналога диффузионного кри-

терия Фурье в виде $\alpha = \varepsilon \cdot \frac{L_{КС}}{H}$, где ε - ин-

тенсивность турбулентности, $L_{КС}$ - длина КС, H - расстояние (шаг) между форсунками. При этом для КС ЖРД открытых схем принято некоторое осредненное значение интенсивности турбулентности и не установлена связь ее уровня с конструктивными параметрами форсуночных головок. В КС ЖРД замкнутых схем при прохождении газообразного компонента через форсуночные головки с различ-

ной проницаемостью ($\bar{f}_{зол} = 0,06...0,3$) происходит сильное изменение интенсивности турбулизации потока и, как следствие, эффективности и устойчивости горения [4]. Поэтому возникают практические задачи по учету турбулизации потока газообразного компонента.

2. Связь характеристик эффективности и устойчивости горения с газодинамическими параметрами, отражающими интенсивность турбулентного смешения в КС

В ходе экспериментальной доводки КС со струйной подачей газообразного компонента двигателей ЖРД замкнутой схемы НК-39, НК-33 (рис. 2, 3) были установлены зависимости скорости истечения газообразного компонента в КС на границе ВЧ колебаний W_ϕ от газодинамических параметров, определяющих структуру потока на выходе из форсуночной головки [4]: от крупномасштабной неравномерности поля давлений по сечению КС (σ_{P^*} - среднеквадратичное отклонение от средней величины полного давления), от дальнобойности струй форсунок

газообразного окислителя ($\bar{L}_{cmp} = \frac{L_{cmp}}{d_c}$), от турбулизации потока при уменьшении проницаемости $\bar{f}_{зол}$ (рис. 4):

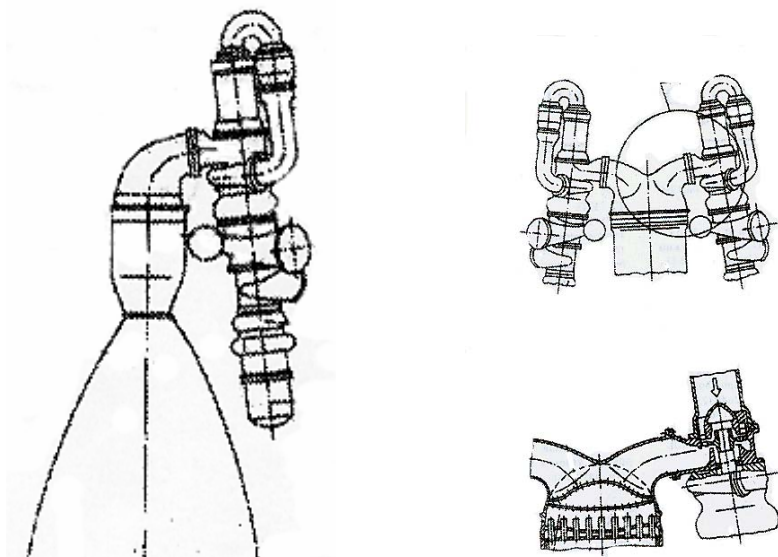


Рис. 2. Общий вид двигателя НК-33 и его перспективных компонентов

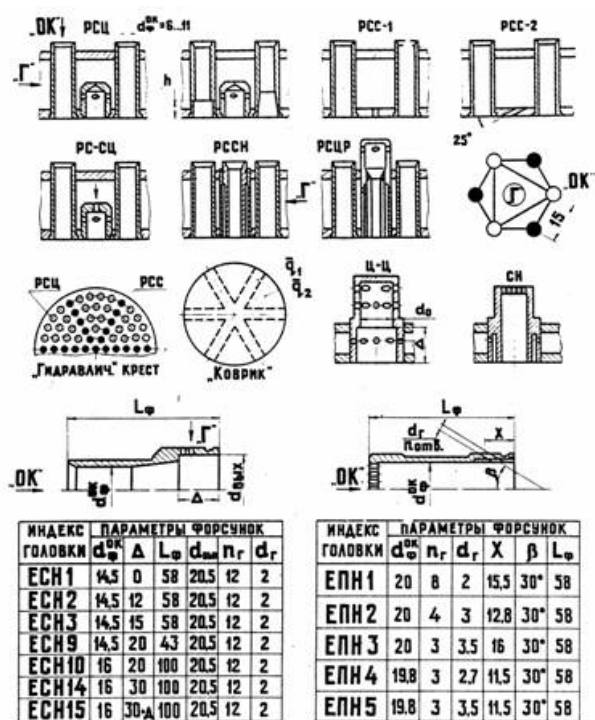


Рис. 3. Смесительные элементы

$$W_{\phi} = F_1(\sigma_{\Sigma^*}, \bar{L}_{стр}, \bar{f}_{зол} \dots) \quad (2)$$

Выравнивание крупномасштабной неравномерности поля полных давлений по сечению КС до величины ($\sigma_p^* < 0,1 \dots 0,2\%$) приводило не только к повышению значения скорости W_{ϕ} , но и к уменьшению протяженности областей “жесткого” возбуждения ВЧ колебаний [5].

В свою очередь, характеристики дальнобойности струй $\bar{L}_{стр}$ зависят от конструктивных $\Omega_{кон}$ и режимных параметров форсуночных головок $\Omega_{кон}$ [4], от формы газоваода КС, от относительной длины газовых каналов форсунок \bar{L}_{ϕ} и плавности входа потока в эти каналы, от конструктивных параметров форсунок, от режимных параметров смешения $\Omega_{реж}$ (соотношения скоростных на-

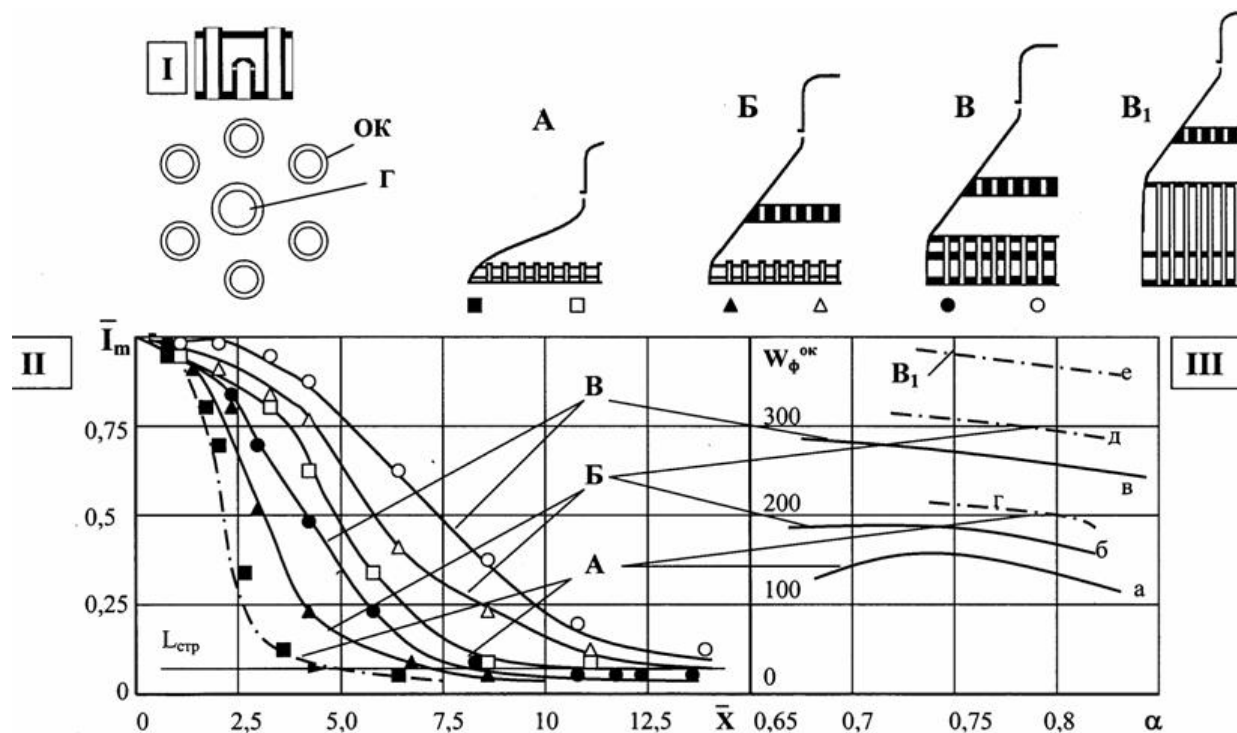


Рис. 4. Влияние увеличения дальнобойности струй форсунок на повышение границы “мягкого” возбуждения ВЧ колебаний в КС двигателя НК-39:

А, Б, В, В1 – форсуночные головки с проницаемостью $\bar{f}_{зол} = 0,06$;

□, △, ○ – центральные форсунки; ■, ▲, ● – периферийные форсунки;

а, б, в – данные натурных испытаний; г, д, е – данные модельных испытаний

поров компонентов топлива в отверстиях форсунок $\frac{1}{m^2 \cdot n}$):

$$\bar{L}_{стр} = F_2 \left[\Omega_{кон}, \Omega_{реж} \left(\frac{1}{m^2 \cdot n} \right) \right]. \quad (3)$$

Анализ опыта доводки КС двигателя НК-39 показал, что для повышения границы “мягкого” возбуждения и для уменьшения протяженности области “жесткого” возбуждения ВЧ колебаний незначительно, какими мероприятиями достигается снижение σ_{p^*} . Эффективным оказалось направление снижения σ_{p^*} мероприятиями, повышающими дальность струй форсунок $\bar{L}_{стр}$.

В соответствии с этим разработан способ повышения устойчивости горения за счёт снижения σ_{p^*} в КС ЖРД замкнутой схемы [4], предусматривающий плавное расширение потока на входе в КС коническими диффузорами с выравнивающей решёткой (проницаемостью $\bar{f}_{пен} \approx 0,3$) или газоведами криволинейной S-образной формы (рис. 2), с применением выравнивающей решётки переменной проницаемости и с подбором проницаемости форсуночной головки $\bar{f}_{гол}$ и относительной длины газовых каналов форсунок $\bar{L}_ф \geq 6$ с улучшением плавности входа потока в эти каналы (а. с. СССР № 42182 от 31.7.67 г. и патент РФ № 2168049 от 27 мая 2001 г.).

Внедрение разработанных конструктивных мероприятий позволило обеспечить высокую эффективность горения в КС и запасы устойчивости горения в КС двигателей НК-39 и НК-33 по всей циклограмме работы двигателей, включая форсированные режимы.

3. Полуэмпирический метод оценки интенсивности турбулентного обмена в КС со струйной подачей газообразного окислителя

Необходимость оптимизации указанных выше характеристик горения потребо-

вала разработки простых инженерных полуэмпирических методов оценки интенсивности турбулентного смешения в КС с учетом влияния выявленных в ходе доводки КС большого числа конструктивных и режимных параметров.

Анализ основных источников турбулентности, возникающих в КС со струйной подачей газообразного окислителя двигателями ЖРД замкнутой схемы, показал необходимость учета турбулизации потока по двум моделям турбулентности: по модели «P», учитывающей турбулизацию потока в зонах обратных токов форсуночной головки как перфорированной решетки [5, 6], и по струйной модели «C», учитывающей начальную турбулизацию потока в газоведе КС при входе потока в каналы форсунок, внутрструйные градиенты газодинамических параметров от взаимодействия компонентов топлива и др.

Для оценки влияния на эффективность и ВЧ неустойчивость горения интенсификации турбулентного обмена параметр τ_{no} был представлен, в соответствии с работой [3], в виде аналога диффузионного критерия Фурье, учитывающего начальную неравномерность подачи топлива как отношение длины КС к шаговому расстоянию между форсун-

ками $\left(\frac{L_K}{H} \right)$. Также учитывались параметры турбулентного обмена по модели «P» (D_T^P) и по модели «C» (\bar{D}_T^C) в следующем виде:

$$F_{0g} = (L_K/H) \cdot D_T^C \cdot \bar{D}_T^C. \quad (4)$$

В соответствии с (4) одинаковую степень выравнивания концентрации на располагаемой длине КС можно достичь изменением трех независимых параметров, но в соответствии с (2) интенсификация турбулентного обмена по модели «C» сопровождается уменьшением $\bar{L}_{стр}$ и снижением скорости W_ϕ на границе ВЧ колебаний. Поэтому достижение высокой эффективности горения достигалось турбулизацией потока по модели «P» за счет уменьшения проницаемости форсуночной головки $\bar{f}_{гол}$.

На начальном этапе доводки КС двигателя НК-39 с полусферической полостью возникающая в КС ВЧ неустойчивость горения в течение 2-х лет задерживала доводку КС [4]. Попытки улучшения устойчивости горения за счет увеличения начальной неравномерности подачи топлива приводили не к улучшению устойчивости горения, как ожидалось, а к ее ухудшению [3], при этом часто ухудшалась эффективность сгорания смеси. Поэтому основным направлением оптимизации характеристик эффективности и устойчивости горения явилось уменьшение начальной неравномерности подачи топлива путем применения увеличенного числа мелких разнокомпонентных струйно-центробежных (РСЦ) и двухкомпонентных соосных (СН) струйно-центробежных форсунок с прямоструйной подачей газообразного окислителя (рис. 3).

При выбранном значении $L_k/H = 12...16$ (рис. 4, 5) характерные особенности различных типов смесительных элементов отражались дополнительным параметром начальной неравномерности подачи топлива $\bar{h}_\phi = h_\phi/H$. Так, по рекомендациям Аггеева А. Н. [4], значение \bar{h}_ϕ принималось равным 0,5 для разнокомпонентных

струйно-струйных РСЦ форсунок (рис. 3) как отношение расстояния форсунки горючего к форсунке окислителя h к шаговому расстоянию, взятому по осям форсунок окислителя H .

По физическому смыслу это означает, что в данном смесительном элементе полное смешение на длине КС произойдет при попадании горючего на ось форсунки окислителя. Для РСЦ форсунок $\bar{h}_\phi = 0,25$, для СН и ПН форсунок это значение определялось по дополнительным зависимостям, учитывающим "пробиваемость" струй горючего в поток газообразного окислителя в форсунке.

3.1. Модель турбулизации потока за форсуночной головкой как перфорированной решеткой (модель «Р»)

Определяющее влияние интенсификации процесса турбулентного смешения на ВЧ неустойчивость горения подтверждено большим числом натурных и модельных огневых испытаний КС двигателей НК-39 и НК-33. Для обобщения полученных экспериментальных данных по эффективности и устойчивости горения с использованием аналога диффузионного критерия Фурье (4) была проведена систематизация экспериментальных

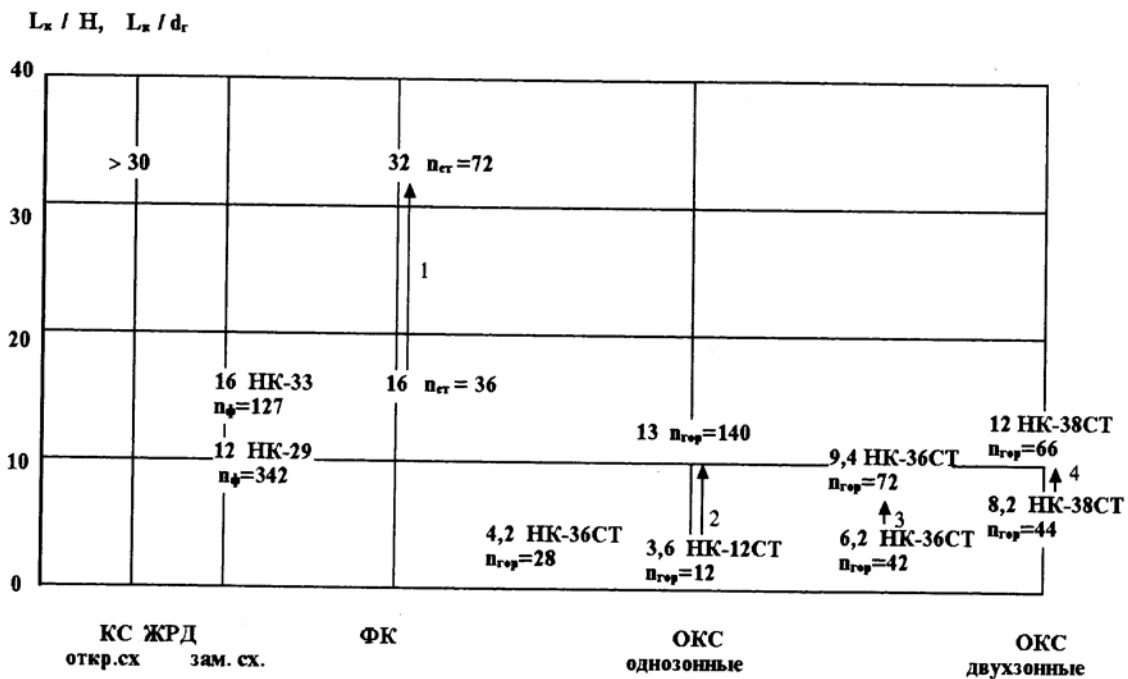


Рис. 5. Сравнение значений параметров начальной неравномерности подачи топлива для КС реактивных двигателей семейства НК

данных по интенсивности турбулентности за решетками [3, 6] и в струях [7, 8] с повышенным уровнем начальной турбулентности.

Была показана универсальность зависимостей возрастания и затухания турбулентности за решетками, что позволило описать закономерности ее относительного изменения $\bar{\varepsilon}(x) = \varepsilon/\varepsilon_{\text{макс}}$ в виде интегральной функции

$$A(x) = \int_0^x \bar{\varepsilon}(x) dx.$$

Значение $\varepsilon_{\text{макс}}$ определялось в зависимости от проницаемости форсуночной головки, положение координаты $\varepsilon_{\text{макс}}$ - в зависимости от шагового расстояния между форсунками [6]. По номограммам, полученным путем аппроксимации интенсивности и масштаба турбулентности за решетками, определялись эффективные значения параметра $D_T^p(x)$.

3.2. Струйная модель турбулентного смешения (модель «С»)

В работе [4] показано, что на эффективность и устойчивость горения в КС ЖРД замкнутой схемы значительное влияние оказывает начальная интенсивность турбуликации потока ε_0 в газоведе, соединяющем турбину двигателя и предфорсуночную полость КС. При повышении ε_0 происходит уменьшение дальнобойности струй $\bar{L}_{\text{стр}}$, увеличение их углового расширения, что свидетельствует о повышении турбуликации потока [6, 7, 8].

Для возможности оценки влияния различных параметров на интенсификацию процесса турбулентного смешения возникла необходимость в уточнении модели «С». На базе созданной статистической модели, описывающей нормальным законом распределения в поперечном сечении струи инвариантов струйного течения: избыточного импульса, избыточной энтальпии и расхода вещества центральной струи в спутном потоке, установлена связь параметров в поперечном сечении струи и параметров на ее оси.

Полученный постоянный закон затухания параметров в осевом направлении струи [8] позволил определить длину переходного

участка струи \bar{X}_n (отражающего ее дальнобойность) как газодинамическую характеристику интенсивности турбулентного смешения в струе. Но для обобщения экспериментальных данных была получена более общая характеристика, отражающая влияние параметров $\varepsilon_0, m, n, \delta^*$ на значение параметра турбулентного обмена $\bar{D}_T^C(x)$ в струях форсунок. С этой целью использовались экспериментальные данные, полученные Гиневским А. С. [4], по исследованию влияния начальной интенсивности турбулентности ε_0 (от 1,5 до 21 %) на изменение $\varepsilon_m(x)$ вдоль оси струи. Изменение $\varepsilon_0(x) = f(x)$ за решетками, с помощью которых создавалась начальная турбулентность, было описано в виде зависимости $\varepsilon_0(x) = B/(B + \varepsilon_0)$, где значение константы $B = 5$.

Суммарное значение интенсивности турбулентности определялось из условия суперпозиции основных составляющих турбулентной вязкости, возникающей от сдвига скорости и вносимой в слой смешения начальной турбулентности. В предположении, что масштаб турбулентности пропорционален угловому расширению струи db/dx , были получены зависимости, позволяющие определять соответствующее значение параметра турбулентного обмена по модели «С».

Разработанная статистическая модель «С» позволяет учесть влияния указанных выше начальных параметров на величину \bar{X}_n [8], а следовательно, и на дальнобойность струи $\bar{L}_{\text{стр}}$. По рассчитанному или замеренному за форсуночной головкой КС значению $\bar{L}_{\text{стр}}$ определялось $\bar{D}_T^C(x)$.

3.3. Результаты обобщения

На базе разработанного полуэмпирического метода [6] с использованием аналога диффузионного критерия Фурье (4) обобщены данные по эффективности и устойчивости горения в КС ЖРД замкнутой схемы в виде зависимостей

$$\varphi_{\beta} = 1 - 0,25 \cdot e^{-1,832 \cdot F_{0g}}, \quad (5)$$

$$W_{\phi} = 360 \cdot e^{-0,37 \cdot F_{0g}}. \quad (6)$$

Эти зависимости отражают общую тенденцию повышения эффективности и снижения границы ВЧ колебаний при интенсификации процесса турбулентного горения в КС со струйной подачей газообразного окислителя. Обеспечение высокой эффективности и устойчивости горения в исследуемых КС достигнуто при значениях параметров начальной подачи топлива в КС

$$L_K/H = 12 \dots 16, \quad \bar{h}_{\phi} = 0,25$$

и значении $F_{0g} = 1,1 \dots 1,5$ [4]. В соответствии с этими условиями обеспечивалось повышенное значение дальности струй \bar{L}_{cmp} (не допускалось снижение отношения скоростного напора газообразного окислителя к скоростному напору жидкого горючего в отверстиях форсунок в область значений $\frac{1}{m^2 \cdot n} < 1$

по всей циклограмме работы двигателей ЖРД). Интенсификация процесса турбулентного смешения достигалась по модели «Р» за счет уменьшения проницаемости форсуночной головки.

4. Влияние интенсификации горения на генерацию акустической энергии в КС

Опыт доводки КС двигателя НК-33 с СН форсунками и с частичным внутриворсуночным смешением и сгоранием компонентов топлива [9] показал необходимость более полной оптимизации характеристик эффективности и устойчивости горения с использованием профиля скорости выгорания топлива вдоль оси факела, образующегося на струе, выходящей из форсунки $f_m(x) = d\eta_z(x)/dx$, темпа затухания амплитуды ВЧ колебаний $f_p(x)$, возрастающего при более интенсивном выгорании смеси вдоль КС и фазового сдвига $\psi(x)$ между акустическими колебаниями давления и скорости горения при интенсификации процесса турбулентного смешения по модели «С».

Влияние интенсификации процесса турбулентного горения на генерацию волновой энергии в КС исследовалось при следующих предположениях:

1) При высоких начальных температурах химически активных компонентов топлива $T_{OK} = 300 \dots 400$ °С; $T_T = 100 \dots 150$ °С пренебрегалось влиянием процессов распыла и испарения топлива.

2) Скорость химических реакций превышает скорость физических процессов: диффузии и теплопередачи; химическая активность компонентов топлива определяет интенсивность энерговыделения в КС. Самым медленным процессом, определяющим результирующее протекание процесса горения в КС, является процесс турбулентного смешения.

3) Основными источниками неравномерности потока в КС являются:

- крупномасштабная неравномерность поля давлений по сечению КС, формируемая в газовой КС закруткой потока турбиной двигателя, а ее выравнивание осуществляется решетками и форсуночными головками;
- начальная мелкомасштабная неравномерность концентрации топлива (в пределах шагового расстояния между форсунками).

4) Основными источниками турбулизации потока газообразного компонента в КС является его турбулизация в газовой при прохождении выравнивающих решеток, форсуночной головки, в струях, истекающих из газовых каналов форсунок, возникающая при динамическом взаимодействии потоков компонентов топлива, выходящих из отверстий форсунок. Значение коэффициента турбулентной диффузии в КС $\bar{D}_T = \bar{D}_T(x)$ определяется указанными источниками турбулизации потока и влиянием собственно процесса горения на растягивание процесса смешения по длине КС.

5) Вид кривой выгорания топлива $\eta_z(x)$ зависит от интенсивности нарастания параметра $D_T(x)$, от химической активности топлива и других факторов, определяющих влияние собственно процесса горения на протекание процесса турбулентного обмена в КС.

6) Форма акустических колебаний в КС близка к собственной моде поперечных тангенциальных колебаний и соответствует теоретическому решению волнового уравнения [2].

7) Распределение амплитуд пульсационной скорости горения по длине диффузионного факела форсунки подобно распределению средней скорости горения [2]. Сдвиг по фазе $\psi(x)$ между колебательными составляющими давления p' и скорости тепловыделения m' по длине факела зависит от временной задержки энерговыделения, которая определяется на начальном диффузионном участке факела форсунки интенсивностью турбулентного обмена и скоростью переноса очагов горения вдоль факела форсунки. В конце факела, где происходит догорание уже перемешанных компонентов и реагирующая смесь близка уже к равновесной, сдвиг фаз определяется скоростью химических реакций. В этой области принималось, что энерговыделение осуществляется в противофазе с колебаниями давления.

8) Генерация акустической энергии в КС определяется повышением энерговыделения в “чувствительной” зоне, расположенной у форсуночной головки.

9) Основными источниками диссипации акустической энергии в КС является вынос ее в газовой КС. Выносом акустической энергии в сопло КС для исследуемых поперечных колебаний можно пренебречь в соответствии с экспериментальными исследованиями, проведенными в ЦИАМ.

10) При возникновении ВЧ неустойчивости горения происходит дополнительная интенсификация процесса турбулентного смешения так, что происходит выравнивание крупномасштабной и мелкомасштабной неравномерности (полей скоростей, концентраций, температур...).

4.1. Оптимизация эффектов интенсификации и растягивания выгорания смеси по длине КС при частичном внутрифорсуночном сгорании смеси

В предположении определяющего влияния профиля скорости выгорания $f_m(x)$ на

тепловыделение в “чувствительной” зоне, расположенной у форсуночной головки, при аппроксимации $f_m(x)$ нормальным законом распределения с введением коэффициента асимметрии описано влияние на коэффициент генерации γ_g двух противоположно действующих процессов: интенсификации процесса горения при уменьшении параметра σ_η и растягивания выгорания смеси по длине КС при увеличении параметра K_σ .

Созданная модель позволила описать полученный сильный эффект повышения удельной тяги (на 12 единиц) без значительного ухудшения устойчивости горения с учетом относительного увеличения коэффициента сопротивления форсунки ξ (в 2...2,5 раза) от теплового ускорения частично сгорающей смеси внутри форсунки [9, 10].

Обработка с использованием полученных зависимостей, литературных данных по замеру кривых выгорания смеси за форсуночными головками модельных КС ЖРД показала, что в большинстве случаев значение $K_\sigma = 3...4$. Было также показано, что увеличение полноты сгорания топлива и ухудшение устойчивости горения происходит с уве-

личением параметра $\frac{2}{\sigma_\eta \cdot (1 + K_\sigma)}$. При этом интенсивное понижение границы ВЧ неустойчивости горения происходит, если параметр формы кривой выгорания превышает значения 20... 25.

В случае частичного внутрифорсуночного сгорания смеси параметр K_σ повышается до 10...12. Эти данные свидетельствуют о влиянии двух противоположно действующих процессов, позволяющих достичь высокой эффективности без значительного ухудшения устойчивости горения.

4.2. Оптимизация интенсификации процесса горения и затухания амплитуды ВЧ колебаний вдоль КС

В случае определяющего влияния на коэффициент генерации γ_g характеристик

$f_m(x)$ и $f_p(x)$ было показано, что более интенсивное нарастание кривой выгорания $\eta_z(x)$ приводит к увеличению амплитуды ВЧ колебаний у форсуночной головки и к повышению γ_q . Анализ показал, что для ослабления влияния на коэффициент генерации характеристик $f_m(x)$ и $f_p(x)$ необходимо процесс горения организовать так, чтобы общая протяженность зоны горения была больше половины длины КС и градиент нарастания кривой выгорания $d\eta_z(x)/dx$ был меньше двух [10].

4.3. Оптимизация интенсификации процесса горения $f_m(x)$ и характеристик фазового сдвига $\psi(x)$ между колебаниями скорости горения m' и акустическими колебаниями давления p'

В случае определяющего влияния на γ_q характеристик $f_m(x)$ и $\psi(x)$ с учетом принятого предположения п. 7 было показано, что устойчивость горения ухудшается при сильной интенсификации процесса горения по струйной модели, когда отношение протяженности области максимальной светимости на начальном диффузионном участке факела форсунки к общей длине факела повышается до значения $\bar{S}_{мс} = \frac{S_{мс}}{L_{фак}} > 0,5$. Этот результат подтвержден экспериментально [4] при снижении отношения скоростного напора окислительного газа к скоростному напору горючего в отверстиях форсунок. При этом увеличивается угловое расширение факела форсунки, уменьшается его дальность, что вызывает интенсификацию процесса турбулентного смешения.

Из анализа полученного выражения аналога диффузионного критерия Фурье можно сделать вывод, что на профиль скорости выгорания смеси вдоль КС $f_m(x)$ влияют независимые параметры L_k/H , \bar{h}_ϕ , $D_m^p(x)$, $\bar{D}_m^c(x)$. Эти параметры в различной степени влияют на эффективность и устойчивость горения. Поэтому при изучении внут-

ренних связей между исследуемыми явлениями с использованием этих параметров проводилась организация высокоэффективного и устойчивого горения в исследуемых КС.

5. Обоснование условий обратной связи

Возбуждение ВЧ колебаний зависит не только от параметров смещения, но и от скорости W_ϕ , определяющей темп внешних воздействий L_{cmp}/W_ϕ на процессы в камере. Длина струи газообразного окислителя или факела зависит от конструкции форсунок и интенсивности турбулентного обмена [4, 6, 7].

В соответствии с условием 6 можно принять, что для заданных формы и размеров камеры, а также для конкретного типа топлива период акустических колебаний $\tau_{ак}$ является величиной известной. Учитывая влияние акустических колебаний на интенсивность процесса смещения, на скорость горения, можно принять параметр $\tau_{ак}$ также определяющим параметром, входящим в условия обратной связи.

Предположим, что уровень скорости на границе ВЧ неустойчивости определяется временной задержкой, которая зависит от следующих характерных времен:

а) от времени пребывания смеси на длине факела форсунки

$$\tau_n = \frac{2 \cdot L_{фак}}{W_\phi + W_k}; \quad (7)$$

б) от времени распространения от фронта пламени до корневой части струи акустических возмущений, возникающих во фронте пламени при сгорании крупных турбулентных вихрей $\tau'_{ак} = \frac{L_{фак}}{C_k}$, где C_k - скорость распространения звука в КС. От этих возмущений в соответствии с механизмом, разработанным Фурлетовым В. И., происходит образование вихрей и зарождение ВЧ неустойчивости горения, а усиление вихреобразования и рост амплитуды колебаний вызываются возникшими в камере акустическими колебаниями первой или второй моды;

в) от времени турбулентного сгорания смеси в зоне горения форсунки, которое по аналогии со временем турбулентного горения

гомогенного факела $\tau_o = \frac{L_{\text{фак}}}{W'} = \frac{L_{\text{фак}}}{\varepsilon \cdot W}$ определяется в виде:

$$\tau_o = \frac{L_{\text{фак}}}{F_{0g} \cdot W_p} \quad (8)$$

Используя эти характерные времена, рассмотрим влияние длины струи или факела, образованного на этой струе, на изменение уровня границы ВЧ неустойчивости. Принимая время запаздывания в виде $\tau_o = \tau_n + \tau'_{\text{ак}}$, условие возбуждения ВЧ колебаний можно записать следующим образом:

$$\tau_s = \frac{2 \cdot L_{\text{фак}}}{W_{\phi} + W_{\kappa}} + \frac{L_{\text{фак}}}{C_{\kappa}} \quad (9)$$

Из этого выражения представим значе- ние скорости $\tilde{W}_{\phi}^{\text{ок}}$ на границе ВЧ неустойчи- вости горения в виде следующей зависимости:

$$W_{\phi} = L_{\text{фак}} \cdot W_{\kappa} + 2 \cdot L_{\text{фак}} \cdot C_{\kappa} + \frac{\tau'_{\text{ак}} \cdot C_{\kappa} \cdot W_{\kappa}}{\tau'_{\text{ак}} \cdot C_{\kappa} - L_{\text{фак}}} \quad (10)$$

Зависимость (10) отражает влияние уве- личения дальности струй форсунок

$L_{\text{стр}}$ на повышение границы устойчивости горения (рис. 6). Но, отражая общую тенден- цию улучшения устойчивости горения, эта зависимость не позволяет решить исследуе- мую задачу оптимизации характеристик эф- фективности и устойчивости горения, так как не учитывает рассмотренного выше влияния большого числа конструктивных и режимных параметров смещения и внешних факторов.

Приведенные в работе [4] результаты обобщения влияния интенсификации процес- са турбулентного смешения на эффектив- ность и устойчивость горения в КС ЖРД сви- детельствуют о необходимости при оптими- зации исследуемых характеристик горения проводить полный учет влияющих парамет- ров, входящих в аналог диффузионного кри- терия Фурье. Проведенная обработка экспе- риментальных данных по изменению даль- нойности струй $L_{\text{стр}}$ и соответствующих значений скорости на границе ВЧ неустой- чивости горения с использованием зависимо- сти (8) показала, что уменьшение $\bar{L}_{\text{стр}}$ на 40 % приводит к увеличению коэффициента генерации в 2 раза (рис. 7).

При переходе от форсунок РСЦ к фор- сункам РСС значение параметра \bar{h}_{ϕ} увели- чилось от 0,25 до 0,5, за счет этого устойчи- вость горения повысилась настолько, что гра- ница ВЧ неустойчивости не была достигну-

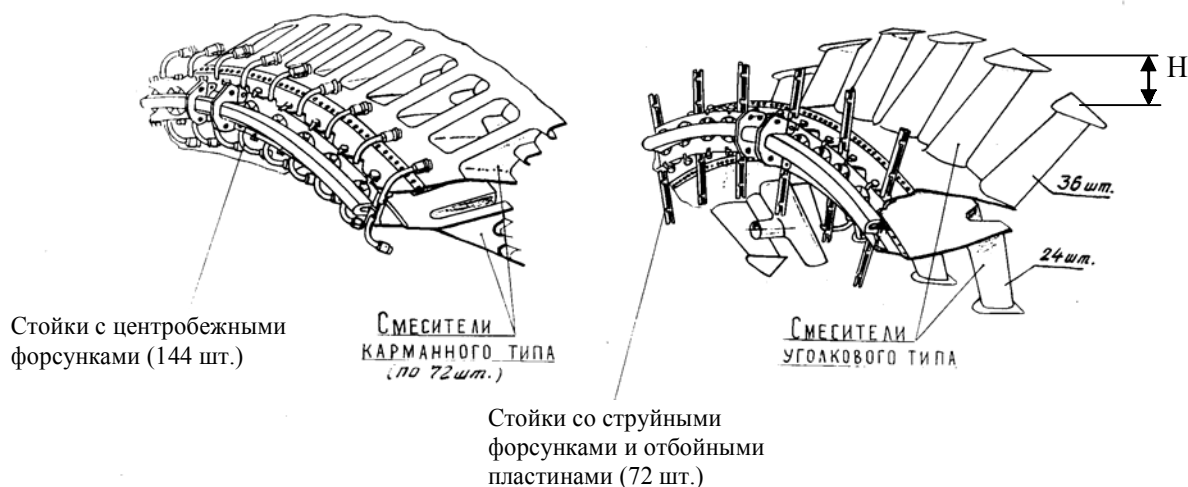


Рис. 6. Увеличение начальной неравномерности подачи топлива в ФК при упрощении конструкций фронтального устройства ФУ (б.) $L_{\kappa}/H = 16$. Оптимальное значение параметра $(L_{\kappa}/H)_{\text{опт}} = 32$ получено путем установки на периферии между уголками ФУ (б.) чашечных стабилизаторов пламени

та. Переход к ПН форсункам резко снизил границу ВЧ неустойчивости горения по сравнению с РСЦ форсунками. Несмотря на сильное влияние начальной неравномерности подачи топлива на ВЧ неустойчивость горения, оптимальным направлением оптимизации оказалось увеличение дальности струй форсунок газообразного окислителя при значении $L_k/H = 12...16$.

6. Критериальное уравнение приближенного подобия, отражающее влияние интенсификации кинетического и турбулентного горения на исследуемые характеристики горения в КС

На базе анализа большого числа натуральных и модельных огневых испытаний полноразмерных КС с различными типами смесительных элементов двигателей ЖРД замкнутой схемы установлены основные закономерности влияния интенсификации кинетического и диффузионного горения на генерацию акустической энергии. Эти закономерности подтвердились при устранении ВЧ неустойчивости горения в форсажных камерах (ФК) и в двухзонных КС ГТУ.

В ходе доводки КС различного назначения приходилось путем экспериментальной доводки проводить оптимизацию большой совокупности характеристик горения в КС.

В соответствии с [4, 12÷16] в ходе доводки двухзонных КС ГТУ влияние интенсификации турбулентного смешения на исследуемые характеристики горения в КС ($\eta_z(x), NO_x, CO, \gamma_q, \Theta, \zeta_{\phi,y}$) определялось в зависимости от критериев подобия

$$F_3(\tau_{nn}, \tau_{nd}, \tau_{nk}, \chi, H_u, \Phi_i \dots) = 0. \quad (11)$$

При этом NO_x, CO - уровни эмиссии оксидов азота, окислов углерода, γ_q - коэффициент генерации акустической энергии в КС (например, в виде критерия Релея [2]); Θ - параметр неравномерности температурного поля на выходе из КС; $\zeta_{\phi,y}$ - коэффициент потерь полного давления фронтального устройства. Здесь отношение $\tau_{nk} = \tau_n / \tau_k$ при-

нято в виде числа Струхала Sh , связанного со значением скорости истечения смеси из газовых каналов форсунок в КС на границе ВЧ колебаний и с акустическими характеристиками исследуемой моды колебаний [2]

$$\left(\frac{W_\phi}{Sh \cdot d_\phi} = \alpha \cdot C_k \cdot d_k \right), \quad \chi - \text{степень гомогени-}$$

зации смеси, H_u - теплотворная способность топлива, Φ_i - факторы, учитывающие граничные условия, касающиеся диссипации волновой энергии [3], проскока пламени внутрь сопла горелки и т. д.

Оптимизация характеристик $\Theta, \zeta_{\phi,y}$.

КС ГТД и ГТУ проводилась с учетом подпора потока в диффузоре, изменения числа горелок [17]; оптимизация эмиссии NO_x и CO связана с подготовкой "бедной" гомогенной смеси основного контура двухзонных КС и с формированием определенного профиля скорости на срезе сопла горелки, определяющего высокую скорость турбулентного горения в закрученном потоке и препятствующего проскоку пламени внутрь горелки [13÷16].

7. Влияние на ВЧ неустойчивость горения интенсификации кинетического горения

Опыт доводки КС ЖРД замкнутой схемы и систематизация литературных данных позволили определить следующие особенности влияния интенсификации химической активности компонентов топлива на ВЧ неустойчивость горения:

- минимальное значение скорости W_ϕ в КС на гомогенной смеси проявляется при стехиометрическом соотношении компонентов топлива; в КС с отдельной подачей компонентов топлива характер этой зависимости изменяется из-за влияния диффузионных факторов;

- при переходе на топливо с меньшей химической активностью значительно повышается значение W_ϕ (от 160 до 280 м/сек) и понижается уровень частоты первой моды поперечных ВЧ колебаний (от 1 400 Гц до 1 100 Гц). Учет удельной теплоты химической реакции в виде следующей зависимости: $q = (C_p^{ПС} T^{ПС} - C_p^0 T^0)$, где 0 - начальные условия на входе в КС, ПС - продукты сгора-

ния, позволяет прогнозировать значение скорости на границе ВЧ колебаний по данным модельных огневых испытаний полноразмерных КС;

- в ходе испытаний КС двигателя НК-33 на натуральных компонентах при пониженных давлениях в КС (до 2...5 атм), моделировании начального подогрева газообразного компонента и процесса турбулентного смешения получено практически совпадение значения скорости на границе устойчивости горения с данными натуральных испытаний. Это позволяет отрабатывать запасы устойчивости горения в КС ЖРД замкнутой схемы на пониженных режимах по давлению в КС;

- подтверждено для КС ЖРД определяющее влияние на повышение W_{ϕ} увеличения общей протяженности зоны горения $L_{зг}$, ранее установленное в работах Дорошенко В. Е., Фурлетова В. И. (ЦИАМ) для КС, работающих на гомогенной смеси, и обобщенное в зависимости от объемной скорости

тепловыделения $\frac{q \cdot H_u}{L_{зг}}$, где $q = G_{см} / F_k$ -

относительная расходонапряженность, F_k - площадь поперечного сечения КС, H_u - теплотворная способность смеси, зависящая от вида и состава смеси [4].

8. Оптимизация характеристик эффективности и устойчивости горения в форсажных камерах двигателей НК-25 и НК-321

Приведенная выше методология, предусматривающая установление связи исследуемых характеристик эффективности и устойчивости горения с газодинамическими характеристиками, определяющими структуру потока на выходе из фронтального устройства, использовалась при доводке форсажных камер (ФК) и основных КС ГТД, ГТУ.

Для возможности оптимизации этих характеристик горения в форсажных камерах (ФК) двигателей НК-25 и НК-321 детально исследовалась газодинамическая структура потока за смесительными и фронтными устройствами на специально созданной полноразмерной секторной модели [11]. Проведен-

ная газодинамическая доводка ФК позволила исследовать влияние большого числа конструктивных параметров на гидравлические потери, провести доводку более совершенной конструкции лепесткового смесителя, определить основные закономерности влияния газодинамических характеристик на эффективность и устойчивость горения, а также на целый ряд других характеристик, включая и коксование топлива в коллекторах ФК.

В результате проведенных исследований получены следующие результаты:

1) Вместо струйного смесителя внедрен лепестковый смеситель в диффузоре ФК оптимальной конструкции [11], что позволило снизить гидравлические потери на 1,5 %, что соответствует снижению удельного расхода топлива на бесфорсажных режимах работы (3...4 г/кг топлива).

2) Показано, что для улучшения устойчивости горения за счёт уменьшения начальной неравномерности скорости потока, набегающего на ФУ, относительное расстояние ФУ от среза смесителя ($L_{см} / H_{см}$) должно быть больше в 2,5 раза характерной ширины смесителя, угловое расположение лепестков смесителя выбирается таким образом, чтобы горячий газ поступал на периферийные стабилизаторы пламени (а. с. СССР № 134573 от 8.09.79, а. с. СССР № 183796 от 2.02.83, а. с. СССР № 203819 от 29.05.84).

3) Для обеспечения устойчивости горения за счет растягивания выгорания смеси стабилизаторы пламени выполняются плавно обтекаемой формы, соединенные специальными пламяперебрасывающими устройствами. Для исключения местного переобогащения смеси топливом разрежение за стабилизаторами пламени выравнивается за счет подбора оптимального расстояния между ними (а. с. № 291265 СССР от 1.04.89).

4) Для повышения эффективности горения увеличивается число стабилизаторов пламени так, чтобы параметр начальной неравномерности подачи жидкого топлива $L_k / H \geq 32$, а также устанавливаются за радиальными стабилизаторами пламени охлаждаемые экраны, создающие зоны обратных токов без значительного повышения гидравлического сопротивления и ухудшения устойчивости

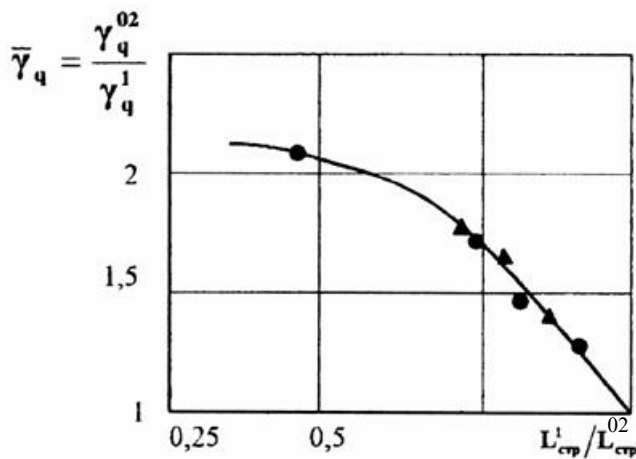


Рис. 7. Изменение коэффициента генерации волновой энергии в зависимости от дальности струй

(индексы 02, 1 обозначают $\frac{1}{m^2 \cdot n} = 0,2; 1;$

● – ЕСН14; ▲ - ЕПН5

горения. Эффективность данного подхода к оптимизации подтверждена в ходе доводки ФК на двигателе и не противоречит традиционным, связывающим, например, условия возбуждения с расположением стабилизаторов пламени в сечении с максимумом амплитуды колебательного давления.

5) Устранение коксования топлива в коллекторах ФК достигается за счет выравнивания крупномасштабной неравномерности поля температур путем увеличения расстояния от среза смесителя до ФУ $L_{см}/H_{см}$ больше 2,5. Для модификации ФК с меньшим значением этого расстояния устранение коксования топлива достигнуто путем теплоизоляции топливных коллекторов. Разработаны конструктивные мероприятия по повышению ресурса работы ФК путем ослабления коксовыведения на переходных режимах работы двигателя и регламентной очистки распылительных отверстий в условиях эксплуатации.

9. Оптимизация характеристик эффективности, устойчивости горения и эмиссии вредных веществ в двухзонных камерах сгорания двигателей НК-36 СТ, НК-37 и НК-38 ТС

В ходе доводки основных КС ГТУ двигателей НК-36 ТС, НК-37, НК-38 СТ (рис. 6) возникла более сложная проблема оптимизации не только характеристик эффективности, устойчивости горения, но и характеристик эмиссии вредных веществ, проскока пламени внутрь сопла горелок основного контура двухзонных КС, устойчивости горения «бедной» смеси, гидравлических потерь и

равномерности температурного поля на выходе из КС и др.

В основу оптимизации указанных характеристик горения положены следующие результаты исследований:

1) Полуэмпирические зависимости по выбору темпа расширения потока в диффузорах КС ГТД, ГТУ [17] и созданная методика и программа расчета гидравлических потерь на ЭВМ, позволяющие обеспечить безотрывное течение и стабилизацию потока в КС.

2) Систематизация параметра начальной неравномерности подачи топлива L_k/H , входящего в выражение F_{0g} для традиционных однозонных и двухзонных КС ГТД, ГТУ [12÷16], на базе которой проведено увеличение числа горелок основного контура в двухзонных КС с выносными жаровыми трубами двигателей НК-37 и НК-38 СТ [13], приводящее к повышению эффективности горения, снижению эмиссии СО и выравниванию радиальной эпюры температурного поля на выходе из КС.

3) Создана модель оптимизации характеристик $\eta(x)$, NO_x , CO , γ_q , а также проскока пламени внутрь сопла горелок основного контура путем формирования определенной структуры потока на выходе из горелок основного контура. При этом обеспечивалась высокая степень гомогенизации смеси χ [12,...16] для снижения NO_x . При $L_k/H \geq 12...14$ и высокой степени крутки потока обеспечивалась высокая эффективность горения и низкие уровни СО. Но при этом обеспечивалась в приосевой части сопла горелки с конфу-

зорностью потока 1,1...1,2 запас по осевой составляющей скорости потока $0,2 W_{\text{макс}}$, препятствующий проскоку пламени внутрь сопла горелки [12].

На базе созданной модели путем формирования оптимальной структуры потока на выходе из горелок основного контура на КС с ВЖТ двигателя НК-37 были получены показатели эмиссии $NO_x = 70 \text{ мг/нм}^3$, $CO = 30 \text{ мг/нм}^3$, а на кольцевой КС двигателя НК-36 СТ было устранено вибрационное горение путем уменьшения протяженности зоны обратных токов в струях основного контура $\bar{L}_{\text{зонт}} = L_{\text{зонт}}/d_c$ от 2,5 до 1, приводящее к растягиванию зоны горения по длине КС.

Таким образом, на базе проведенных исследований и обобщений опыта доводки КС различного назначения двигателей семейства НК разработаны полуэмпирические методы оптимизации высокой эффективности, устойчивости горения и эмиссии вредных веществ, основанные на организации процесса турбулентного горения в КС.

Список литературы

1. Неустойчивость горения в ЖРД/Под редакцией Харье Д. Т. и Рирдона Ф. Г. М.: Изд. "Мир", 1975. - 864 с.
2. Устойчивость рабочего процесса в двигателях летательных аппаратов. М.: Машиностроение, 1995. С. 19-121.
3. Hersch M. / Experimental Method of Measuring Intensity of Turbulence in a Rocket Chamber. ARS - Journal. vol. 31. 1, 1961. С. 39-45.
4. Савченко В. П. Оптимизация эффективности и устойчивости процесса турбулентного горения в камерах сгорания ЖРД замкнутой схемы. // Вестн. СГАУ. Сер. Процессы горения, теплообмена и экологии тепловых двигателей. Вып. 3. Самар. гос. аэрокосм. ун-т. Самара, 2000. С. 230-243.
5. Анисимов В. С., Данильченко В. П., Савченко В. П., Ярославцев В. Г. Исследование гистерезисных явлений на неустойчивых режимах работы камеры сгорания. // Вестн. СГАУ. Сер. Процессы горения, теплообмена, и экологии тепловых двигателей. Вып. 2. Самар. гос. аэрокосм. ун-т. Самара, 1999. С. 18-22.
6. Савченко В. П. Полуэмпирический метод оценки интенсивности турбулентного смешения в камерах сгорания со струйной подачей газообразного компонента. // Труды 13-ой Всероссийской НТК, КФВАУ, часть 1. Казань, 2001. С. 157-158.
7. Савченко В. П. Струйная модель турбулентного смешения. // Труды 13-ой Всероссийской НТК, КФВАУ, часть 1. Казань, 2001. С. 159-160.
8. Савченко В. П., Лавров В. Н. О законе изменения относительных параметров вдоль оси турбулентной струи. // Межвузовский сборник "Горение в потоке". Вып. 2. Казан. авиац. ин-т. 1979. С. 81-86.
9. Данильченко В. П., Савченко В. П., Ярославцев В. Г. Влияние интенсификации процесса смешения в двухкомпонентных форсунках на коэффициент гидравлического сопротивления и эффективность горения. // Вестн. СГАУ. Сер.: Процессы горения, теплообмена и экологии тепловых двигателей. Вып. 1. Самар. гос. аэрокосм. ун-т. Самара, 1998. С. 117-121.
10. Савченко В. П. Влияние интенсификации процесса турбулентного смешения на генерацию акустической энергии в камерах сгорания ЖРД замкнутой схемы. // Труды 13-ой Всероссийской НТК, КФВАУ, часть 1. Казань, 2001. С. 47-49.
11. Ануров В. М., Савченко В. П., Носырев Д. Я., Фрейдин А. С. Исследование потерь полного давления в каналах смесителей ТРДД. // КуАИ, Самара, 1982. С. 58-67.
12. Постников А. М., Савченко В. П., Цыбизов Ю. И., Маркушин А. Н. Разработка горелок предварительного смешения для малотоксичных камер сгорания высокоэффективных ГТУ. // Вестн. СГАУ. Сер.: Процессы горения, теплообмена и экологии тепловых двигателей. Вып. 2. Самар. гос. аэрокосм. ун-т. Самара, 1999. С. 18-22.
13. Савченко В. П., Постников А. М., Лавров В. Н., Цыбизов Ю. И. Интенсификация турбулентного горения гомогенной смеси основного контура в двухзонных камерах сгорания ГТУ. // Вестн. СГАУ. Сер.: Процессы горения, теплообмена и экологии тепловых двигателей. Вып. 3. Самар. гос. аэрокосм. ун-т. Самара, 2001. С. 243-253.

14. Савченко В. П., Постников А. М., Лавров В. Н., Роголёв В. В. К организации процесса смешения в двухзонных камерах сгорания. // Вестн. СГАУ. Сер.: Процессы горения, теплообмена и экологии тепловых двигателей. Вып. 3. Самар. гос. аэрокосм. ун-т. Самара, 2001. С. 253-261.
15. Денисов И. С., Епейкин Л. Ф., Постников А. М., Савченко В. П. Двухзонные камеры сгорания ГТУ авиационного типа. // Энергетик № 12, ООО НПФ. Мир. 1998. С.24-26.
16. Савченко В. П., Маркушин А. Н., Анисимов В. Н., Цыбизов Ю. И. Газодинамическая доводка двухзонной камеры сгорания с выносными жаровыми трубами ГТД наземного применения // Труды 13-ой Всероссийской НТК, КФВАУ, часть 1. Казань, 2001. С. 51-52.
17. Лавров В.Н., Епейкин Л.Ф., Савченко В. П., Постников А.М., Цыбизов Ю. И. Оптимизация кольцевых диффузоров камер сгорания двигателей семейства НК. // Вестн. СГАУ. Сер.: Процессы горения, теплообмена и экологии тепловых двигателей. Вып 1. 1999. С. 90-97.

SUMMARIZING THE EXPERIENCE OF TURBULENT COMBUSTION IN AIRCRAFT ENGINE AND INDUSTRIAL GAS TURBINE COMBUSTION CHAMBERS

© 2002 V. P. Savchenko

N. D. Kuznetsov Scientific and Technical Complex, Samara

The paper presents the results of investigating the influence of turbulent mixing process intensification upon the efficiency, combustion stability and harmful emissions in combustion chambers (CC) of NK-family aircraft engines and industrial gas turbines. In the course of CC development relationship between “soft” and “hard” excitation of high-frequency (HF) vibrations in thrust chambers of closed-circuit liquid-propellant rocket engines (NK-39, NK-33) and non-uniformity of gas flow across the CC cross-section, as well as the range of injector jet action were obtained. On the basis of investigating the sources of turbulence in CC two models of flow turbulization have been developed: “R” model for areas of injector head reverse flows; and “C” model for injector jets caused by dynamic interaction of fuel components, due to initial flow turbulization in the CC gas passage, as the flow enters the injector gas channels etc. application of “R” and “C” models for Hersch criterion improvement made it possible to create models of acoustic energy generation in CC and to prove experimentally the developed principles of optimizing the above-mentioned combustion characteristics for NK-25, NK-321 engine afterburners and for two-zone CC of NK-36ST, NK-37, NK-38ST engines.