

3. Baines W.D. and Peterson E.S. An Investigation of Flow Through Screens. Transakction of ASME 1951, 5, vol 739, p.467-480.
4. Гиневский А.С. Теория турбулентных струй и следов. -М.: : Машиностроение, 1969, С. 170 - 190.
5. Анисимов В.С., Данильченко В.П., Савченко В.П., Ярославцев В.Г. Вестник СГАУ/ Исследование гистерезисных явлений на неустойчивых режимах работы камеры сгорания., вып.2, 1999 г., С.18
6. Данильченко В.П., Савченко В.П., Ярославцев В.Г. Вестник СГАУ/ Влияние интенсификации процесса смешения в двухкомпонентных форсунках на коэффициент гидравлического сопротивления и эффективность горения.. вып.1, 1998 г. с.117-121.

УДК 621.438

ИНТЕНСИФИКАЦИЯ ТУРБУЛЕНТНОГО ГОРЕНИЯ ГОМОГЕННОЙ СМЕСИ ОСНОВНОГО КОНТУРА В ДВУХЗОННЫХ КАМЕРАХ СГОРАНИЯ ГТУ

Савченко В.П., Постников А.М., Лавров В.Н., Цыбизов Ю.И

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

Одним из весьма перспективных направлений резкого снижения выбросов оксидов азота (NO_x) и окиси углерода (CO) является организация рабочего процесса со стадийным сжиганием бедной гомогенной смеси [1], [2].

Несмотря на значительный прогресс в изучении процессов распыла, испарения топлива, химической кинетики, турбулентной диффузии проектирование оптимальной конструкции фронтных устройств КС с минимальным уровнем вредных выбросов при высокой эффективности и устойчивости процесса горения остается проблематичным.

На определённом этапе исследований использование модели реактора идеального смешения, учитывающего влияние химической кинетики, сыграло положительную роль в изучении внутрикамерных процессов. Но с повышением параметров рабочего цикла ГТУ, наиболее медленным и определяющим процесс горения становится процесс турбулентного обмена в КС.

При организации процесса сжигания топлива в двухзонных КС решаются противоречивые задачи: обеспечение характеристик горения: полноты сгорания – потерь давления – устойчивости горения, неравномерности полей температур – времени пребывания – токсичности и т.д. В настоящей статье выполнено обобщение опыта доводки двухзонных КС по оптимизации ее характеристик с использованием параметров турбулентного обмена.

В работах Херша [3], Агеева А.Н. (НИИТП) процесс турбулизации потока в КС ЖРД замкнутой схемы представлен подобно течению за перфорированной решёткой (модель “Р”), а интенсивность турбулентного смешения выражается в виде аналога диффузионного критерия Фурье:

$$\alpha = \frac{L_K}{H} \cdot \varepsilon \quad (1)$$

Выравнивание концентрации (или температуры) на длине КС L_K может быть достигнуто за счёт уменьшения шагового расстояния между горелками - H (увеличением их числа) или интенсификацией турбулентности - ε .

В работе [4] процесс турбулентного смешения в КС ГТУ представлен по струйной модели смешения (модель “С”). Параметр турбулентного обмена определялся в виде:

$$D_t = K_d \cdot w_o \cdot d_c \quad (2)$$

где: $K_d = 0,022 \dots 0,03$; w_o , d_c – скорость на выходе из насадка и диаметр сопла. Для закрученной струи [5]:

$$D_t = 0,003(1 + \beta \cdot \operatorname{tg}^2 \varphi)^{0,5} \cdot w_o \cdot d_c \quad (3)$$

где β , φ - согласующий коэффициент и угол закрутки потока. В работе [6] параметр турбулентного обмена D_t связан с коэффициентом сопротивления плохобтекаемых тел или с интенсивностью вдува поперечных струй воздуха в поток газа.

На основании работ [3-7] критериальное уравнение для оптимизации характеристик горения в КС ГТД можно представить в следующем виде:

$$F_1 \{ \eta(x), NO_x, CO, v_q, \Theta \} = F_2 \left(\alpha, Mi, P^{n-l_d} / W, Dm, Sh \right) \quad (4)$$

где $\eta(x)$, NO_x , CO , v_q , Θ — характеристики горения, соответственно: полнота выгорания топлива, эмиссия оксидов азота NO_x и окислов углерода CO , коэффициент генерации акустической энергии в КС (например, в виде критерия Релея [8]) и параметр неравномерности температурного поля на выходе из КС.

Критерии α , Mi , $P^{n \cdot ld} / W$, D_m — соответственно, аналог диффузионного критерия Фурье, критерий Михельсона (описывающий стабилизацию пламени по кинетическому механизму), кинетический комплекс $P^{n \cdot ld}$, отражающий равновесность протекания химических реакций, критерий Дамкеллера $D_m = \frac{\tau_{cm}}{\tau_n}$ в виде отношения времени химических реакций ко времени турбулентной диффузии, Sh — критерий Струхалея, описывающий стабилизацию пламени. Известно, что критерий D_m является следствием самого процесса горения, т.е. не является определяющим, а отражает в какой мере диффузионный или кинетический режим горения в КС.

На основании исследований Хакера [5] и др. в диффузионной области параметр турбулентного обмена может определять не только интенсивность турбулентного обмена, но и стабилизацию пламени. В этом случае влиянием Mi можно пренебречь.

Применительно к горению заранее подготовленной смеси основного контура, параметр начальной неравномерности концентрации Lk / H , входящий в выражение Fog , можно заменить на Lk / dc , где dc — диаметр сопла горелки, определяющий протяжённость и время сгорания гомогенной смеси.

Известно, что сам процесс горения оказывает значительное влияние на протекание турбулентного обмена в КС:

- с горением происходит растягивание зоны горения по длине КС (в 3 и более раз) по сравнению с “холодными” продувками КС, поэтому в соответствии с работой [9] вводится параметр K_p , учитывающий это влияние;
- процесс горения гомогенной смеси может сопровождаться дополнительной автотурбулизацией пламени [10], которая представляется параметром K_a . При сильной интенсификации процесса горения гомогенной смеси, может реализоваться “объёмный” механизм горения [11], что учитывается параметром K_m , который в соответ-

вии с известными работами Талантова А.В. и др., равен отношению объёма факела, в котором происходят реакции, ко всему объёму занимаемому турбулентным пламенем. В случае объёмного горения $K_w \rightarrow 1$.

Качество подготовки ТВС (гомогенизация смеси) учитывается неравномерностью концентрации на срезе сопла горелки $\chi_{мин}$.

Интенсивность горения гомогенной смеси основного контура зависит от огневой поддержки, создаваемой дежурным контуром КС, поэтому вводятся, как определяющие, безразмерные параметры: относительный расход смеси q_1 , коэффициент состава α_1 и полноту сгорания топлива η_{z1} в дежурной зоне КС.

Ввиду того, что при диффузионном горении в дежурной зоне выделяются вредные выбросы NO_x , то возникает требование подачи минимального расхода топлива в эту зону. Это условие можно реализовать, если выполнена оптимальная организация горения “бедной” ТВС в основной зоне КС (обеспечены высокая скорость турбулентного сгорания смеси и достаточный стабилизирующий эффект).

Таким образом, организация горения гомогенной смеси основного контура в двухзонных КС сводится к исследованию критериального уравнения:

$$F_1 = F_2 (Dt(x), Lk/dc, Sh, K_a, K_p, K_m, \chi_{мин}, q_1, \alpha_1, \eta_{z1}) \quad (5)$$

В ходе отработки КС двигателей различного назначения была выполнена оценка влияния на характеристики горения основных из перечисленных критериев.

Для обеспечения высокой эффективности сгорания ТВС и равномерности температурного поля на выходе из КС важным вопросом является выбор числа горелок фронтного устройства (ФУ) и длины КС.

В обзорной работе Валентайна [12] указывается, что для КС жидкостных ракетных двигателей (ЖРД), выполненных по открытой схеме, при подаче компонентов топлива в жидком виде, “длина камеры сгорания должна по крайней мере в 30 раз превышать расстояние между соседними смесительными элементами с целью исключения потерь в удельном импульсе из-за недостаточного перемешивания”

В табл.1 приведены значения L_k / H для КС двигателей различного назначения семейства НК с высокой эффективностью и устойчивостью горения.

Таблица 1

Тип двигателя	Схема подачи компонентов топлива	Число горелок	L_k/H	L_k/dc
ЖРД открытой схемы	Жидкость жидкость		>30	
ЖРД замкнутой схемы (НК-33)	Газ- жидкость	127	16	
ЖРД замкнутой схемы (НК-39)	Газ- жидкость	342	12	
ГТУ (НК-12СТ)	Газ-воздух	12	3,6	
ГТУ (НК-16СТ)	Газ-воздух	32	6,3	-
ГТД (НК-321)	Керосин-возд.	139	11	
ГТД (НК-93)	Керосин-возд.	79	7,8	
ГТУ (НК-36СТ)	Газ-воздух	28	8,4	
ГТУ (НК-36СТ)	Газ-воздух	28	4,2	-
ГТУ (НК-36СТ двухзонная КС)	Газ-воздух	42		6,3
ГТУ (НК-38СТ)	Газ-воздух	26	5	
ГТУ (НК-14Э двухзонная КС)	Газ-воздух	42		9,3
ГТУ (НК-36СТ КС с ВЖТ)	Газ-воздух	72		9,4
ГТУ (НК-38СТ КС с ВЖТ)	Газ-воздух	44		8,2

Для КС ЖРД замкнутой схемы НК-33, НК -39 параметр $L_k / H = 12...16$. На основании этого опыта Генеральным конструктором Кузнецовым Н.Д. были предложены многорелочные ФУ КС газотурбинных двигателей с числом горелок $n_{гор} = 140$ и с отношением $L_k / H = 11$ (вместо традиционного числа горелок в КС ГТД $n_{гор} = 12...30$), которые

обеспечили надёжность по тепловому состоянию жаровой трубы и турбины двигателя.

На основании работы Герша [3] примем, что процесс выравнивания концентрации (или температуры) по длине КС зависит от L_K / H , а турбулизация потока в КС определяется относительным перепадом давления на жаровой трубе КС, так что:

$$\alpha = L_K / H \cdot \Delta \bar{P}_{ж.тр.}, \quad (6)$$

Где $\Delta \bar{P}_{ж.тр.} = \Delta P_{ж.тр.} / P_K$ – относительный перепад давления на жаровой трубе. Из этого выражения следует, что многогорелочная КС допускает меньшую степень турбулизации потока в струях горелок, а, следовательно, и меньшее угловое расширение факелов за горелками, что было реализовано в конструкции КС семейства НК при работе на жидком топливе. Сосредоточение пламени в центральной части КС благоприятно сказывалось на тепловом состоянии стенок жаровой трубы, а увеличенное значение $L_K / H = 11$ обеспечивало минимальную окружную неравномерность температурного поля перед турбиной.

Вместе с тем уменьшение числа горелок от 139 ($L_K/H=11$) до 28 ($L_K/H=8,4$) при сильной турбулизации потока не привело к росту окружной неравномерности, рис.1. Дальнейшее уменьшение L_K / H до 4,2 в “короткой” КС двигателя НК -36СТ для снижения эмиссии NO_x привело к некоторому повышению окружной неравномерности температурного поля на выходе из КС. На КС двигателя НК-12СТ при $L_K / H = 3,6$ про-

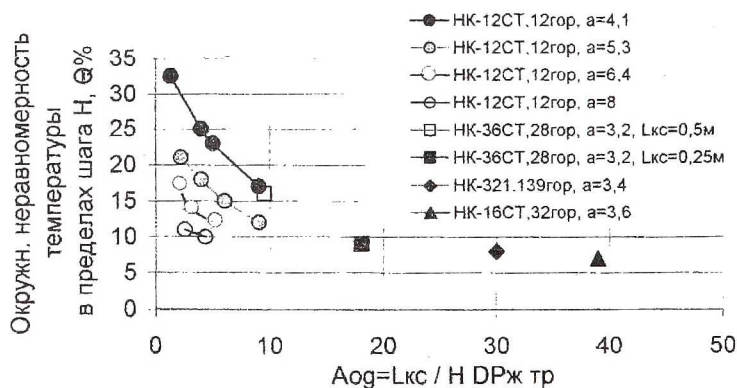


Рис. 1. Неравномерность температурного поля в КС с различным числом горелок $\theta = (T_{max} - T_{cp}) / (T_{cp} - T_K)$

должается рост Θ . Но при низком среднем уровне температуры на выходе их КС обеспечен заданный ресурс эксплуатации. Таким образом, выбор оптимального значения Lk / H должен быть проведен в тесной связи с интенсивностью турбулизации газового потока в КС, которая способствует снижению эмиссии NO_x [6]. Но, как следует из рис.2, в традиционных однозонных КС с высокими параметрами цикла не представляется возможным достигнуть уровня эмиссии NO_x менее 100 мг/нм^3 простым обеднением смеси в ФУ или интенсификацией процесса смешения путем увеличением числа горелок.

В настоящее время отсутствуют рекомендации по выбору числа го-

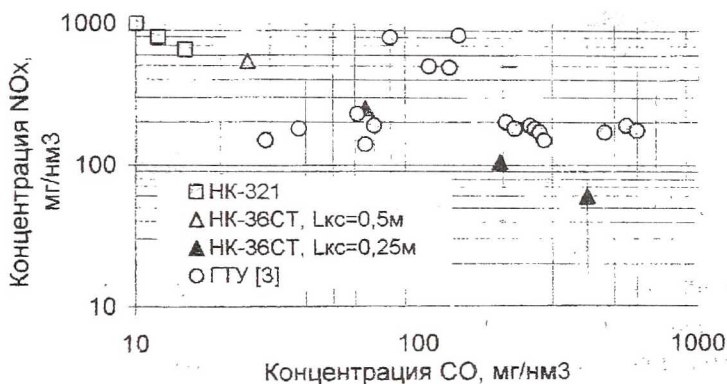


Рис. 2. Эмиссионные характеристики традиционных однозонных КС ГТУ

релок основного контура и в двухзонных КС. В работе [2] для богатобедной схемы горения показано, что растет интенсивность смешения струй основного контура с потоком из дежурной зоны при увеличении числа горелок и за счёт подбора глубины их проникновения в поток газа, выходящий из дежурной зоны. При этом расход газа их дежурной зоны, эжектируемый струями основного контура, можно учесть следующей формулой:

$$g_1 = A \pi d_c n_f L_{cmp} \rho_1 w_1 / 2, \quad (7)$$

Выражение получено для струй вторичного воздуха в однозонных КС [13], где d_c , n_f , L_{cmp} - диаметр сопла, число и длина струй горелок основного контура, $\rho_1 w_1$ - плотность и скорость набегающего потока из дежурной зоны КС, A - согласующий коэффициент.

В соответствии с зависимостью (2), интенсивность процесса горения ТВС основного контура в КС ГТУ определяется параметром Dt , который пропорционален угловому расширению струй горелок основного контура db/dx . Поэтому увеличением db/dx в ходе газодинамической доводки КС возможно интенсифицировать турбулентное горение и улучшить, в соответствии с работами [5, 11], стабилизацию пламени. При сильном увеличении db/dx можно осуществить переход к интенсивному объёмному микродиффузионному горению (параметр $K_m \rightarrow 1$), что является основной предпосылкой рациональной организации горения бедной смеси.

В двухзонных кольцевых КС двигателей НК-14СТ, НК-36СТ, имеющих отношение $L_k/d_c = 6,3$ и $9,3$, происходит выравнивание окружной неравномерности температуры на выходе из КС. Однако при малом числе горелок может возникнуть необходимость уменьшения радиальной неравномерности температурного поля за счет подачи воздуха через отверстия в жаровой трубе, что может приводить к росту эмиссии CO . Более эффективным направлением является увеличение углового расширения этих струй, например, за счет постановки осевого завихрителя на срез сопла горелки [14].

Интенсивность турбулентного смешения в двухзонных КС с ВЖТ двигателей НК-37 и за счет соударения струй основного контура, увели-

чения числа горелок, а также за счет гомогенизации ТВС (многоточечный подвод топлива) приводит к снижению эмиссии NO_x до уровня 50 мг/нм^3 , см. рис.3. В КС с ВЖТ двигателя НК-38СТ дальнейшее снижение NO_x достигнуто при стендовых испытаниях за счет увеличения числа горелок, постановки аксиальных завихрителей на срез сопла и многоточеч-

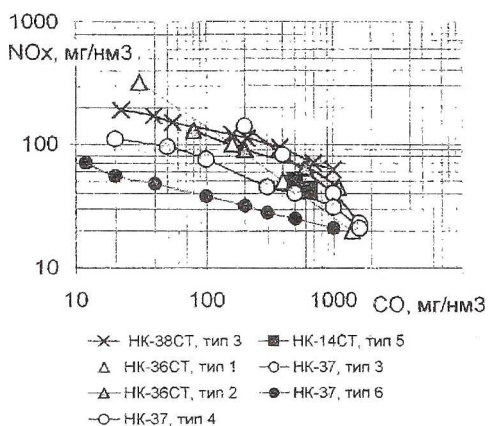


Рис. 3. Эмиссионные характеристики двухзонных КС ГТУ

ной подачи топлива [14]. Об интенсификации процесса смешения в ВЖТ с аксиальными завихрителями свидетельствует более интенсивное изменение скоростного напора вдоль оси ВЖТ, см. рис.5.

Таким образом, многолетний опыт доводки двухзонных КС показал возможность оптимизации характеристик горения с использованием параметров турбулентного обмена.

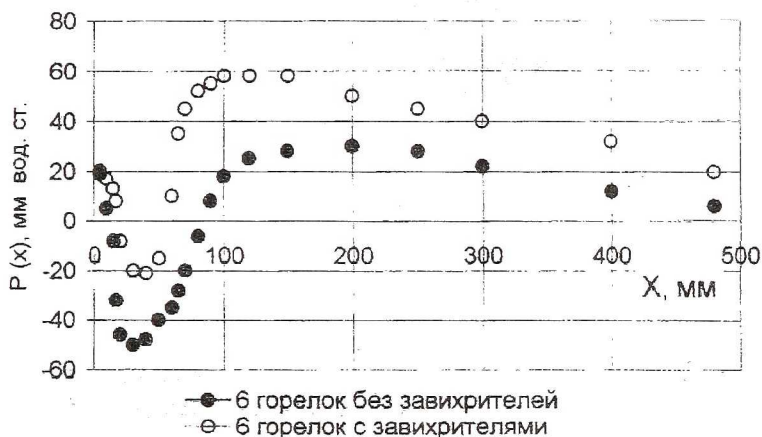


Рис. 4. Изменение давления вдоль оси ВЖТ

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Мемфорд, Хун, Сингх Гибридная камера сгорания газотурбинного двигателя с низкими выбросами NO_x // Энергетические машины и установки, 1977, №4, -С.150-157.
2. Снижение NO_x в процессе сжигания горючего на богато-бедных смесях/ З а р з а л и с Н, Джус Ф. и др.// AIAA/SAE/ASME Propulsion Conference, July, 1992.
3. Н е р с c h М. Experimental Method of Measuring Intensity of Turbulence in a Rocket Chamber.// ARS - JorneI, vol.31, №1, 1961, p. 39-45
4. Х а в к и н Ю.И. К расчёту полноты выгорания газообразного топлива в камере сгорания ГТУ. -Сб. Теория и практика сжигания газа, Недра, ЛО, 1964.
5. Х а к е р Д.С. Модели стабилизации пламени в закрученном потоке, основанные на упрощённой теории пути смешения // Ракетная техника и космонавтика, 1974, № 1, -С.78-76.
6. Т у х б а т у л л и н Ф.Г., К а ш а п о в Р.С. Малотоксичные горелочные устройства газотурбинных установок, -М.: Недра, 1997.

7. Иссерлин А.С. Основы сжигания газового топлива, -Л.: Недра, ЛО, 1980.
8. Нестационарное распространение пламени, -М.: Мир, 1968.
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 экология тепловых двигателей. Вып. 1; Самар. гос. аэрокосм. ун-т, Самара, 1998г.
10. Влияние горения на уровень турбулентности / Кузнецов И.Л., Баранова Г.Р., Игнатенко Ю.В., Трохан А.М. // ФГВ, Наука, СО, №3, 1966, -С.129-132.
11. Интенсификация горения осевыми вихрями . Г у т м а р к Е. и др. // AIAA -87-1831, Технический перевод ЦИАМ № 14721, 1988.
12. В а л е н т а й н Экономичность, устойчивость и работоспособность ЖРД, // Journal of Spasecraft and Rockets, 9, №5, 295-307.
13. Оценка эжекционной способности сплошных струй в сносящем потоке / К о с т е р и н В.А., М а щ е н к о Г.И., Ш а л а е в Г.М., М о т ы л и н с к и й И.П. // В кн. Газодинамика двигателей летательных аппаратов, -Казань, 1981, с.60-65.
14. К организации процесса в двухзонных камерах сгорания / П о с т н и к о в А.М., С а в ч е н к о В.П., Л а в р о в В.Н., Р о г а л е в В.В. // Вестн. СГАУ. Сер.: Процессы горения, теплообмена и экология тепловых двигателей. Вып. 3; Самар. гос. аэрокосм. ун-т, Самара, 2000 .