

$W_6^2 \rho_6$  не позволило реализовать достигнутый в составе отсека уровень предварительного перемешивания топливного газа с воздухом предположительно из-за сильной сепарации газа на лопатки канала при работе К.С. в составе ГТУ и его большой локальной концентрации на входе в зону горения.

Полученный результат является важным, так как определяет принципиальный подход к организации процесса предварительного перемешивания смеси в отработываемой конструктивной схеме горелки. Учитывая, что большинство камер сгорания реализует предварительное перемешивание в закрученном потоке воздуха необходимо при проектировании трактов смешения исключать или сводить к минимуму эффект сепарации, для получения равномерных полей концентрации топливо-воздушной смеси.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Гриценко Е.А., Лавров В.Н., Постников А.М., Цыбизов Ю.И. Основные направления совершенствования камер сгорания ГТД//Вестн. СГАУ. Вып.2; Самар. гос. аэрокосм. ун-т, Самара, 1999.-С. 5-9.
2. Рыжов А.А., Гребенюк Г.П. Газотурбинная энергетическая установка мощностью 10 МВт с малотоксичной камерой сгорания. Тезисы доклада Всероссийской научной конференции "Физико-химические проблемы сжигания углеводородных топлив" - М.:РАН. 1998г.-С.8

УДК 621.455 - 63.03.0

### ОПТИМИЗАЦИЯ ЭФФЕКТИВНОСТИ И УСТОЙЧИВОСТИ ПРОЦЕССА ТУРБУЛЕНТНОГО ГОРЕНИЯ В КАМЕРАХ СГОРАНИЯ ЖРД ЗАМКНУТОЙ СХЕМЫ

Савченко В.П.

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

При разработке ЖРД замкнутой схемы возникают задачи о рациональном выборе основных размеров камер сгорания (КС) и схемы смешения (конструкции форсуночной головки), при которой обеспе-

чивается устойчивость процесса горения относительно высокочастотных (ВЧ) колебаний и высокая эффективность его (полнота сгорания топлива).

Большинство исследователей [1, 2,3] сходятся во мнении о том, что в КС ЖРД замкнутой схемы при использовании химически активных компонентов топлива с высоким их начальным подогревом определяющим становится процесс турбулентного смешения, который в виду сложности изучен в меньшей степени, чем процессы испарения топлива и химической кинетики.

В работе [1] указывается на традиционную противоречивость требований к высокой экономичности, устойчивости и работоспособности КС: при повышении эффективности процесса горения повышается склонность к возбуждению ВЧ колебаний и ухудшается её тепловое состояние. Поэтому задача рассматриваемой оптимизации и состояла в том, что бы, исследуя первичные связи между факторами, влияющими на эффективность и устойчивость горения, попытаться ослабить указанную тенденцию и добиться высокой полноты сгорания топлива и устойчивости горения.

Приведены результаты анализа экспериментальных данных по газодинамической доводке КС двигателей ЖРД НК -39, НК - 33, разработанных на ОАО СНТК им. Н.Д. Кузнецова. Схемы газоводов КС этих двигателей и смесительных элементов форсуночных головок приведены на рис. 1,2.

С газоводом А КС двигателя НК- 39 (форма которого была заимствована из опыта доводки ЖРД открытых схем) не удавалось длительное время провести оптимизацию указанных характеристик горения, используя традиционные способы улучшения устойчивости горения: за счёт “растягивания” выгорания смеси в продольном или в поперечном направлениях КС, за счёт снижения уровня скорости истечения газообразного окислителя в КС ( $W\phi^{ок}$ ), применения различных типов смесительных элементов: разнокомпонентных струйно-центробежных (РСЦ) или струйно-струйных (СС), двухкомпонентных центробежно-центробежных (ЦЦ) или соосных струйно-центробежных (СН) форсунок, а также головок “целевого” типа (Ц) и др., см. рис.2.

Одним из направлений оптимизации экономичности и устойчивости горения в КС двигателя НК-39 оказалось выравнивание полей пол-

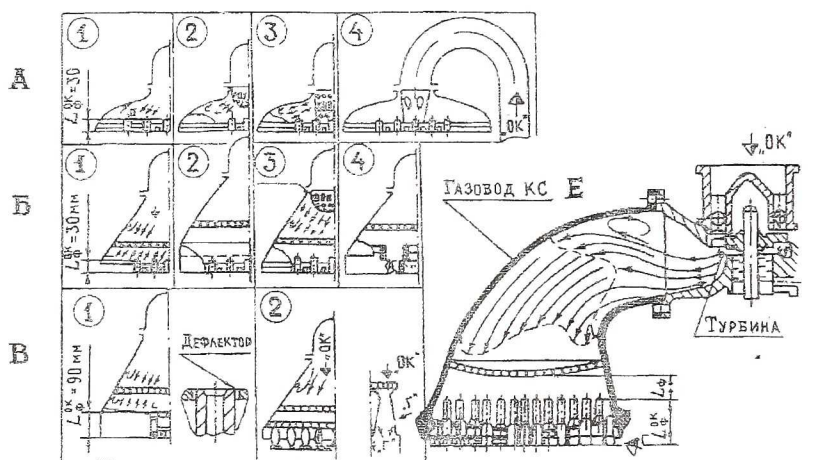


Рис. 1. Схемы газодов камер сгорания

ИНАДЕКС ГОЛОВКИ	СХЕМА ФОРСУНОК	ИНАДЕКС ГОЛОВКИ	СХЕМА ФОРСУНОК
АРСЦ, $d=6$		ЕСН1, $\Delta=0$	
АРСЦ, $d=8$		ЕСН2, $\Delta=4$	
БРСЦ, $d=6$		ЕСН3, $\Delta=5$	
ВРСЦ, $d=6$		ЕСН10, $\Delta=9$	
ВРСЦ, $d=5.5$		ЕСН14, $\Delta=13$	
ВРСЦ, $d=5$		ЕСН15, $\Delta=24$	
АРСЦ, $d=6$		ЕПН1÷	
БРСЦ, $d=6$		ЕПМ5	
БС-СН, $d=5$		Щ	
БСН1, 127		Щ	
БСН3, 331		СН	
АРСЦ, $\ell=4$			
БРСЦ, $\ell=6$			

Рис. 2. Схемы смесительных элементов

ных давлений по сечению КС. На рис.3 приведены поля относительных скоростных напоров на выходе из каналов форсунок ( $\Delta P$ ) и значения среднеквадратичных отклонений полных давлений ( $\sigma_p^*$ ) по сечению КС в зависимости от суммарного коэффициента сопротивления форсуночной головки и выравнивающей решётки  $\zeta_{\Sigma} = \zeta_{\text{гол}} + \zeta_{\text{реш}}$  для газодов КС двигателя НК-39 с большой степенью диффузности потока на входе в форсуночную головку ( $n_{\text{д}} = 14$ ). Видно, что выравнивание по-

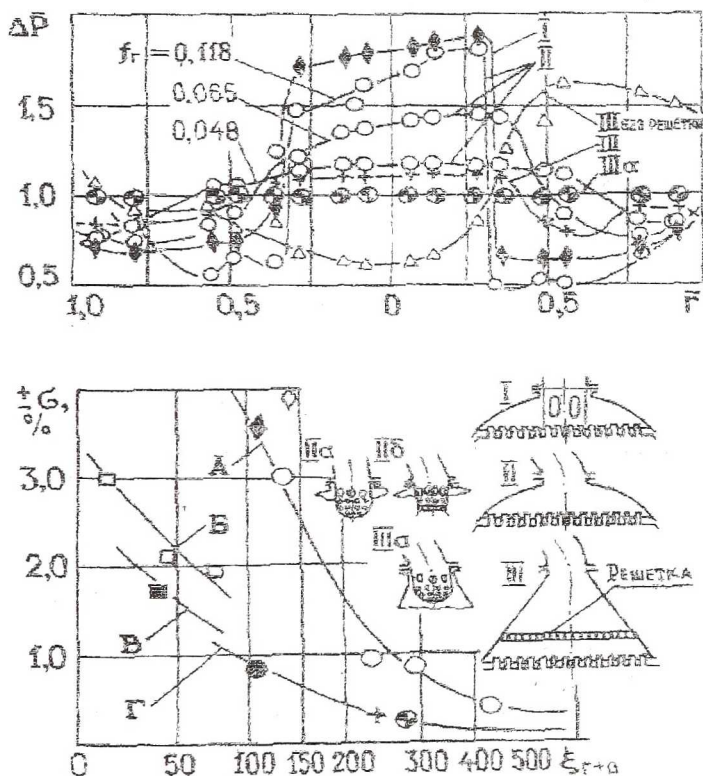


Рис. 3. Крупномасштабная неравномерность полей давлений на выходе из форсуночных головок:

А, Г – КС двигателя НК-39;

Б, В – КС двигателя НК-33 без выравнивающих решеток;

Со сферической предфорсуночной полостью:

▼ - с распределительным стаканом (1); ○ - без распределительного стакана (П), ● - со сферической решеткой (Па); ◇ - с растекателем (Пб);  
 Δ - без выравнивающей решетки; + - с плоской выравнивающей решеткой;  
 ● - с плоской и сферической выравнивающей решетками

лей полных давлений достигается при больших уровнях  $\zeta_{\Sigma} = 300 \dots 400$ .

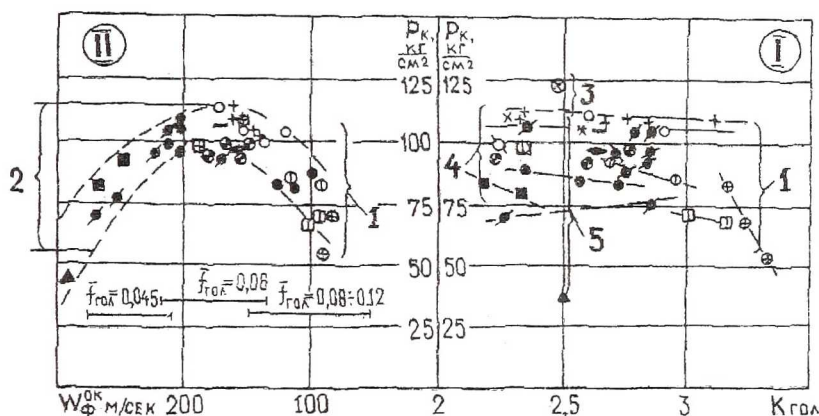
Из рис.4 видно, что попытки повысить устойчивость горения в КС с газоводом А путём увеличения проницаемости  $f_{\text{гол}}$  больше 0,06 привели не к улучшению устойчивости горения, как ожидалось, а к её ухудшению, что связывалось с увеличением крупномасштабной неравномерности поля полных давлений по сечению КС. При уменьшении проницаемости головок до значения 0,045 происходило выравнивание поля полных давлений по сечению КС, но устойчивость горения ухудшалась из-за интенсификации процесса турбулентного смешения в КС и увеличения скорости  $W_{\text{ф}}^{\text{ок}}$

Не приводило к улучшению устойчивости горения и выравнивание неравномерности поля давлений по сечению КС за счёт постановки в газовод А сферических решёток (см. А2, А3 на рис.1), применение различных типов смесительных элементов (см. рис.2), рассредоточения горения в поперечном направлении КС, при постановке в газовод КС, стакана с тремя окнами (см. А4) и др.

Вместе с тем, замена центробежных форсунок (РСЦ1) на струйные (РСС1) привела (см. рис.4, поз.3) к повышению устойчивости горения в КС с газоводом А (несмотря на то, что сохранялось действие факторов по линии газообразного окислителя, понижающих уровень границы неустойчивости горения). При этом сильно снизилась полнота сгорания топлива, что не позволило провести требуемую оптимизацию эффективности и устойчивости горения. Эти данные подтверждают определяющее влияние на ВЧ неустойчивость и эффективность горения интенсификации процесса турбулентного смешения в КС.

Анализ показал, что возникновение ВЧ неустойчивости в КС с газоводом А происходит при достижении определённого уровня скорости в месте её заброса в центральной части форсуночной головки, далее под воздействием возникших акустических ВЧ колебаний происходит дополнительная турбулизация струй и в периферийной части КС так, что при уходе от границы “мягкого” возбуждения ВЧ колебаний проявляется гистерезис амплитуды ВЧ колебаний [5], области которого примыкают к границе “мягкого” возбуждения колебаний и являются при повторном определении воспроизводимыми. Невоспроизводимость относится к внешним импульсам вызывающим “жёсткое” возбуждение ВЧ колебаний.

Эффективным направлением оптимизации оказалось обеспечение безотрывности потока на входе в форсуночную головку за счёт применения газовода в виде конического диффузора с выравнивающей решёткой проницаемостью  $f_p = 0,3$  (см. газовод Б на рис.5), а также увеличение относительной длины газовых каналов форсунок (см. В на рис.5), ослабляющее начальную турбулизацию потока в каналах форсунок. Показано, что к периферийным форсункам газообразный окислитель натекает с большим углом, чем в центральных форсунках. Из-за этого на выходе из газовых каналов периферийных форсунок устанавливается искривлённый профиль скорости и в большей степени с газоводом А, чем с газоводом Б.



Обозначения и конструктивные параметры форсуночных головок

Условн. обозн.	ИНДЕКС форсуночной головки	$\bar{f}_{Гол}$	$n_{Ф}^{OK}; d_{Ф}^{OK}$	Условн. обозн.	ИНДЕКС форсуночной головки	$\bar{f}_{Гол}$	$n_{Ф}^{OK}; d_{Ф}^{OK}$
○	АРСЦ1	0,067	$n_{Ф}=342; d_{Ф}=6$	□	АРСЦ-8	0,067	$n_{Ф}^{OK}=282; d_{Ф}^{OK}=6$
+	АРСЦ1δ	0,06	$96 \times \phi 5,1; 246 \times d=6$	◀	АРСЦ-6	0,06	$96 \times \phi 5,1; 246 \times d=6$
⚡	АРСЦ8	0,0456	$96 \times \phi 4,6; 246 \times d=5,1$	●	АРСЦ8/2	0,084	$96 \times d_{Ф}=6; 246 \times d_{Ф}=7$
■	A-IPСЦδ	0,0456	$96 \times \phi 4,6; 246 \times d=5,1$	—	АРСЦп10	0,06	$172 \times \phi 8,5$
⊙	A-IIPCЦ1δ	0,06	$96 \times \phi 5,1; 246 \times d=6$	⊗	АРСЦ-1(п <sup>Г</sup> -167; d <sub>Ф</sub> =2,5)	0,06	$96 \times \phi 5,1; 246 \times d=6$
▣	АРСЦ1z	0,12	$n_{Ф}=342; d_{Ф}^{OK}=8$	▮	АРСЦ1ж	0,06	$96 \times \phi 5,1; 246 \times d=6$
⊕	АРСЦ1δ	0,12	$n_{Ф}=342; d_{Ф}^{OK}=8$	■	A-IIPCЦ1ж	0,06	$96 \times \phi 5,1; 246 \times d=6$
⊖	АРСЦ1e	0,12	$n_{Ф}=342; d_{Ф}^{OK}=8$	*	АРСЦ9	0,06	$108 \times \phi 5,1; 96 \times \phi 5,3$ $77 \times \phi 7,3; 66 \times \phi 5,5$
⊗	АРСЦ-7	0,0786	$210 \times d=7; 78 \times 32,5 \times \phi 8$	▲	АРСЦ-2	0,066	$n_{Ф}^{OK}=342; d_{Ф}^{OK}=6$

Рис. 4. Влияние конструктивных параметров форсунок на ВЧ-неустойчивость процесса горения в камерах с газоводом типа А

Полученные результаты исследований позволили связать низкий уровень границы ВЧ неустойчивости горения в КС с газоводом А с интенсивной турбулизацией потока газообразного окислителя при его внезапном расширении в предфорсуночной полости и с большим углом натекания потока к периферийным форсункам. Эта модель была существенно дополнена измерениями характеристик дальности струй, истекающих в КС, см. рис.5. Видно, что при переходе от газовада А к газо-

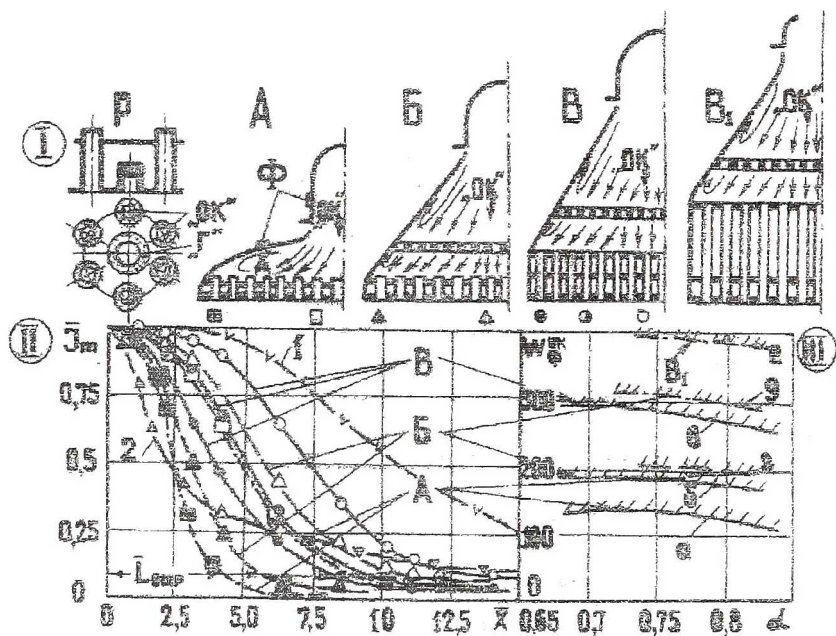


Рис. 5. Влияние увеличения струй форсунок газообразного окислителя на повышение границы ВЧ неустойчивости горения

воду Б и далее к газоводу В происходит увеличение дальности струй центральных и периферийных форсунок и границы устойчивости горения повышается.

Полученный опыт газодинамических исследований использовался при создании КС двигателя НК-33. Как видно из рис. 1, для обеспечения безотрывности потока в предфорсуночной полости газовод Е выполнен S образной формы с плавным расширением потока на входе в

форсуночную головку и с вогнутой по потоку выравнивающей решёткой, см. рис.6, в которой отработано неравномерное распределение проницаемости: ее увеличена на периферии и против малого радиуса газовада.

Проведенная газодинамическая доводка газовада Е с уменьшенной степенью диффузорности  $N_0 = 4$  обеспечила необходимую равномерность поля давлений при значительно меньшем уровне  $\zeta_{\Sigma} = 60 \dots 70$ . При

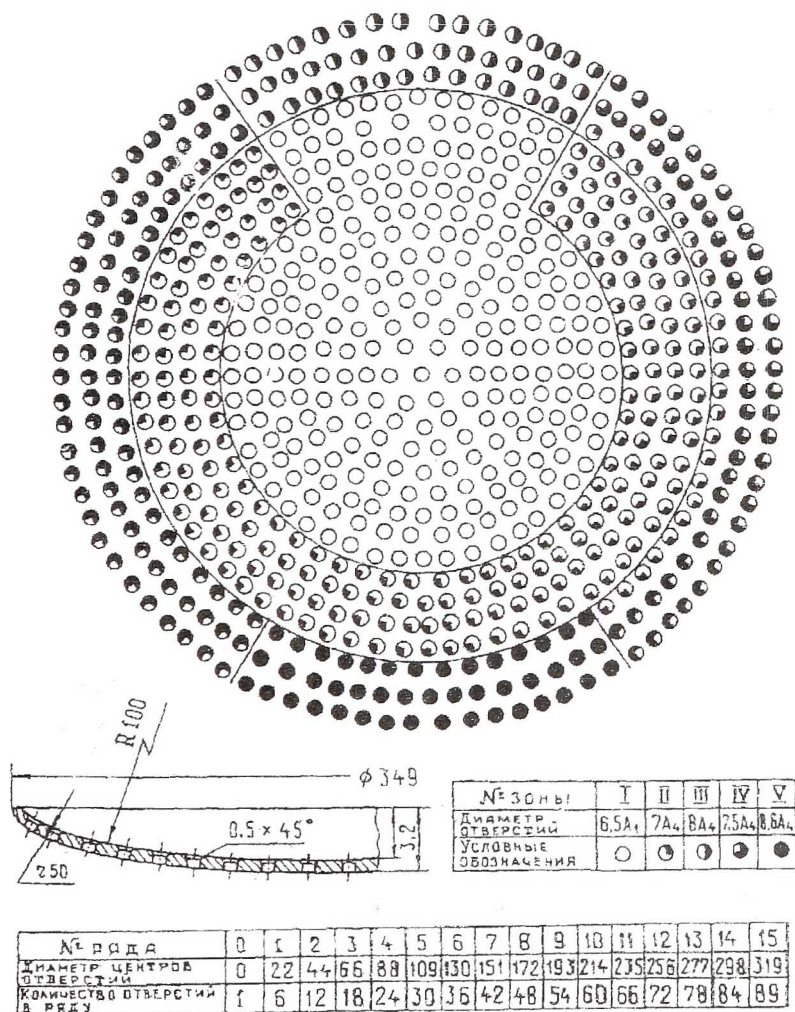


Рис. 6. Схема расположения отверстий выравнивающей решетки КС двигателя НК-33



этом существенно ослаблялось влияния закрутки потока турбиной двигателя на входе в газовод Е, см. рис.7, 8.

Как видно из рис.9 улучшение плавности входа потока в газовые каналы форсунок привело к увеличению дальности струй и повышению устойчивости горения. Понижение границы неустойчивости горения и уменьшении дальности струй происходит при уменьшении отношения скоростного напора окислительного газа к скоростному напору горючего в отверстиях форсунок ( $1/m^2n$ ). Увеличение длины внутрифорсуночного смешения в СН форсунках уменьшает дальность струй форсунок, но из-за частичного внутрифорсуночного сгорания смеси происходит тепловой разгон смеси и увеличение дальности факелов, образованных на этих струях. Поэтому повышение эффективности сгорания смеси происходит с "растягиванием" выгорания по длине КС [6].

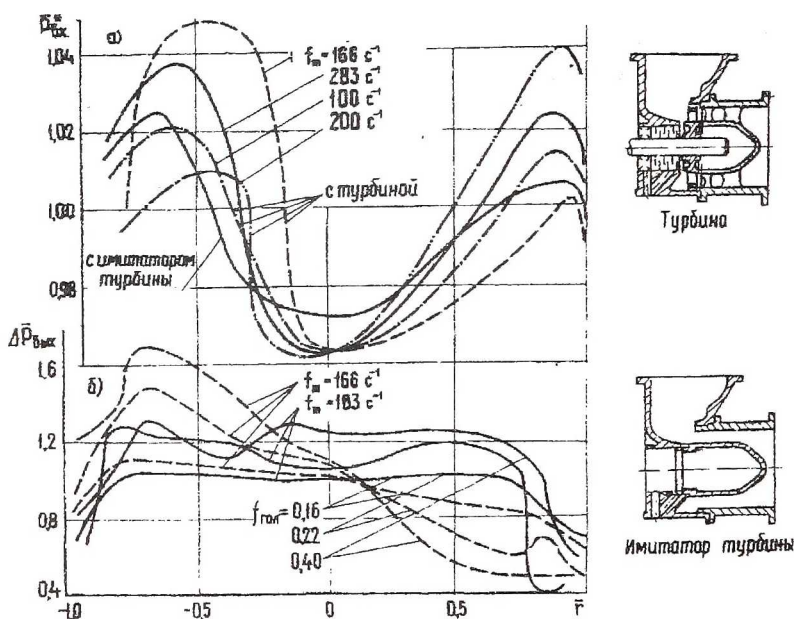


Рис. 7. Влияние частоты вращения турбины на поля давлений на входе в газовод камеры сгорания двигателя 11Д51 и на выходе из форсунок:

$$\text{(при } \pi_m^* = P_{вх}^*/P_{вых}^* = 1,2 \dots 1,8; T_m^* = 520K \text{)}$$

а) на входе в газовод камеры; б) на выходе из форсунок

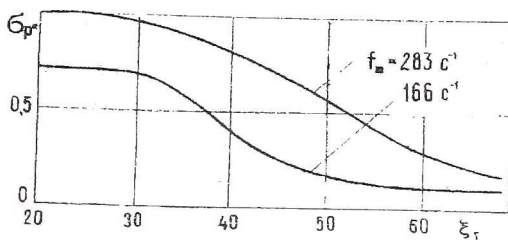


Рис. 8. Влияние суммарного коэффициента сопротивления форсуночной головки и выравнивающей решетки на уменьшение крупномасштабной неравномерности от входа в газодод до выхода потока

из форсунок  $\bar{\sigma} = \frac{\bar{\sigma}_{\text{блх}}}{\bar{\sigma}_P} / \bar{\sigma}_P$

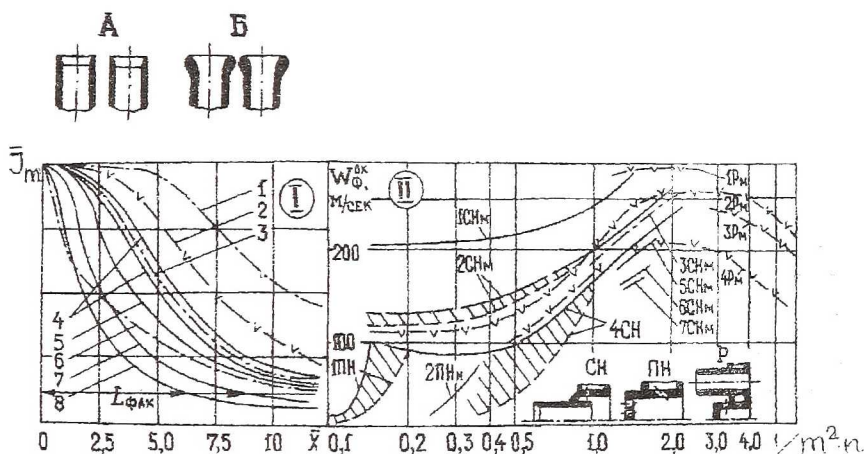


Рис. 9. Влияние уменьшения дальности струй форсунок на снижение уровня границы ВЧ неустойчивости горения:

1, 3, 6 - данные работы [4] ( $\epsilon_0 = 1.5, 8.3, 20.9\%$ ), 2, 4, 7, 8 - СН форсунки ( $L_{\text{ф}} = 6.2, \Delta = 0$ ), 2 - вход Б,  $1/m^2n$  1.. 1.5, 4 - вход А,  $1/m^2n = 1.4$ , 5, 7, 8 - вход А,  $1/m^2n = 0.8, 0.35, 0.18$ , 1СН, 7СН - СН форсунки, 1СН - вход А,  $\Delta = 9, d_k = 200$  мм, 2СН - вход А,  $\Delta = 9, d_k = 430$  мм, 3СН - вход Б,  $\Delta = 9, d_k = 430$  мм, 4СН - вход А,  $\Delta = 9, d_k = 430$  мм, 5СН - вход А,  $\Delta = 13.4, d_k = 430$  мм, 6СН - вход А,  $\Delta = 9, d_k = 430$  мм, 7СН - вход А,  $\Delta = 13.4, d_k = 430$  мм, 1Р - головка В1 РСЦ, 2Р - головка БРСЦ, 3Р - головка ВРСЦ, 4Р - головка АРСЦ, м - модельные испытания, н - натурные испытания

Проведенный анализ опыта доводки КС со струйной подачей окислительного газа позволил определить основные условия оптимизации

высокой эффективности и устойчивости процесса горения по отношению к “мягкому” и “жесткому” режимам возбуждения ВЧ колебаний:

а) Обеспечение выравнивания крупномасштабной неравномерности потока газообразного окислителя по сечению КС при плавном расширении потока в предфорсуночной полости в газовадах конической или S-образной формы с применением выравнивающих решёток переменной проницаемости и вогнутых по потоку, при относительной длине газовых каналов форсунок не менее 6-и калибров с плавными профилированными входами в эти каналы, при этом значение параметра неравномерности  $\sigma_p^* = 0,3...0,5\%$  достигается подбором проницаемостей форсуночной головки и выравнивающей решётки в зависимости от степени диффузорности газовада и уровня скорости  $W_{\phi}^{ок}$ , влияющей на возникновение ВЧ колебаний.

б) В случае применения частичного внутрифорсуночного сгорания смеси высокая эффективность сгорания компонентов топлива достигается при “растягивании” процесса горения в пределах длины КС за счёт ускорения частично сгорающей смеси внутри форсунки, которое отражается увеличением в 2...2,5 раза коэффициента сопротивления форсуночной головки при огневых испытаниях на двигателе по сравнению с данными “холодных” продувок КС в стендовых условиях.

в) Показана необходимость учёта интенсивности турбулентного обмена в КС, рассматривая форсуночную головку как перфорированную решётку (модель “Р”) и по струйной модели смешения (модель “С”), использующей дальнобойность струй (или их угловое расширение), как вспомогательную характеристику интенсивности турбулентного обмена для организации процесса горения в КС.

В ходе оптимизации исследуемых характеристик КС уточнение модели “Р” проводилось путём аппроксимации экспериментальных данных по замеру параметров турбулентности за перфорированными решётками [3], уточнение модели “С” проводилось с использованием данных по исследованию струй с повышенным уровнем начальной турбулентности [4]. При этом на базе разработанной статистической модели получены полуэмпирические зависимости, устанавливающие связь параметров турбулентного обмена с дальнобойностью струй. Это позволило по изменению дальнобойности струй форсунок производить для исследуемых КС оценку изменения интенсивности турбулентного обмена, минуя

сложные измерения локальной турбулентности в условия сложных конструкций КС. На основании проведенных экспериментальных исследований, уточнения модели турбулентного обмена в исследуемых КС, а также на базе ранее проведенных разработок Херша М. и Аггеева А.Н по исследованию эффективности процесса горения в КС ЖРД получены полуэмпирические зависимости эффективности и устойчивости процесса горения в зависимости от аналога диффузионного критерия Фурье, отражающего интенсивность турбулентного обмена по моделям "Р" и "С" и начальную неравномерность подачи компонентов топлива смесительными элементами (см. рис.10 на стр.242).

$$F_{ог} = \frac{1}{\bar{h}^2} \cdot D_T^p(X) \left[ D_T^p \right]^p,$$

Здесь параметр  $1/\bar{h}^2$  отражает начальную неравномерность подачи компонентов смесительным элементом форсуночной головки,  $\bar{h} = h/H$ , где  $H$  – шаговое расстояние между струями газообразного компонента. Для струйно-струйной подачи (РСС)  $\bar{h} = 0,5$  и означает, что полное смешение произойдет в том случае, когда горючего попадет на ось струи газообразного окислителя. Для форсунок СН и ПН в соответствии с работами Аггеева А.Н. значение параметра  $\bar{h}$  принималось 0,35.....0,5 в зависимости от длины внутрифорсуночного смешения. Как видно из рис.10 при интенсификации процесса смешения в КС происходит повышение коэффициента полноты давления в КС и снижение уровня скорости  $W_{\phi}^{ок}$  на границе ВЧ неустойчивости горения.

Более полная оптимизация характеристик интенсивности турбулентного горения проводилась с использованием полученных в ЦИАМ и НИИХИММАШ выражений для коэффициента генерации акустической энергии в КС в трактовке Релея, учитывающих влияния изменяющихся при интенсификации смешения профиля скорости выгорания смеси вдоль КС, затухания амплитуды ВЧ колебаний вдоль КС и относительно-го изменения протяженности области максимальной светимости факелов, образованных на струях форсунок  $S_{мс} = S_{мс}/L_{фак}$  и др. Но, учитывая большую сложность экспериментального измерения этих характеристик, в ходе доводки исследуемых КС удавалось провести указанную

выше оптимизацию высокой эффективности и устойчивости горения с использованием приведенных в настоящей работе результатов анализа и обобщения.

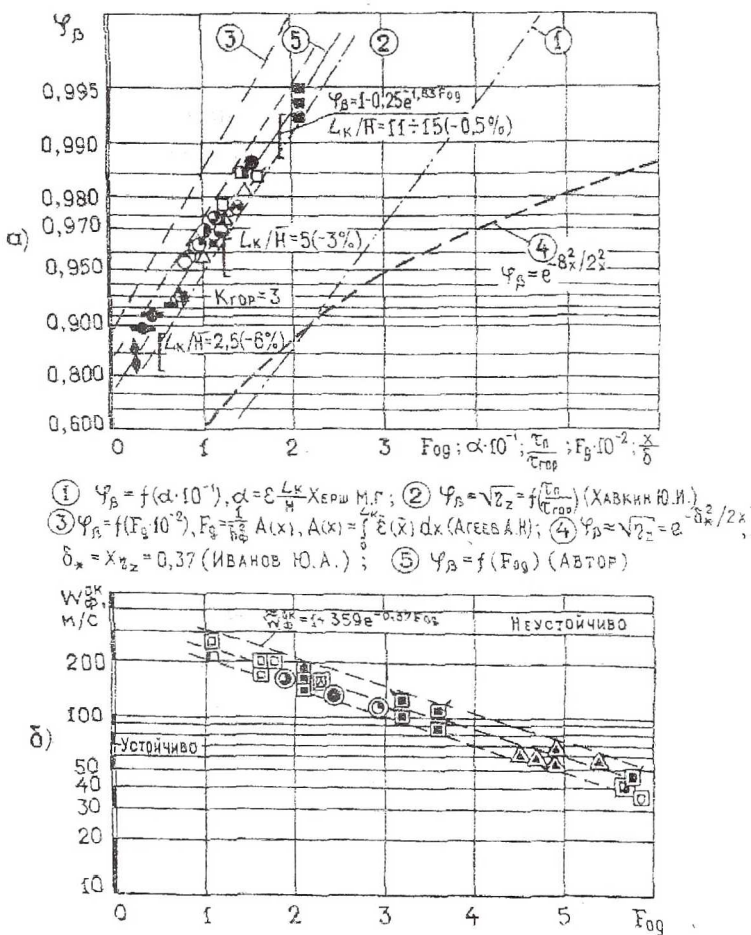


Рис. 10. Влияние диффузионного критерия Фурье  $F_{0g}$  на экономичность и устойчивость горения в камерах сгорания ЖРД замкнутой схемы

### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Valentine R.S. Journal of Spacecraft and Rockets, 9, No, 5,295-307.
2. Нерч М. Experimental Method of Measuring Intensity of Turbulence in a Rocket Camber. ARS - Journal. vol. 31. 1,1961,39-45.

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.