

УДК 621.45.03.0: 532.556.0

К ОРГАНИЗАЦИИ ПРОЦЕССА СМЕШЕНИЯ В ДВУХЗОННЫХ КАМЕРАХ СГОРАНИЯ

Савченко В.П., Постников А.М., Лавров В.Н., Роголёв В.В.

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

Из рассмотрения литературных данных [1, 2, 3] следует вывод о крайней ограниченности возможностей снижения оксидов азота NO_x в традиционных диффузионных камерах сгорания (КС), в которых образование NO_x происходит в зонах стехиометрического состава, где скорость окисления азота велика.

В КС с двухстадийным сгоранием бедной смеси [1] достигается ликвидация стехиометрических зон за счёт предварительной подготовки (гомогенизации) бедной топливовоздушной смеси (ТВС), подаваемой в основную зону КС.

В связи с этим возникают проблемы обеспечения высокого качества подготовки гомогенной ТВС в основном контуре КС, а также её воспламенения, стабилизации пламени, предотвращения проскока пламени или самовоспламенения внутри камеры смешения горелки.

В соответствии с этим в статье рассмотрены некоторые особенности предварительной подготовки ТВС основного контура и формирования структуры истечения этой смеси в двухзонных КС двигателей НК-36СТ, НК-37, НК-38СТ.

Газодинамическая доводка горелок основного контура проводилась на экспериментальной установке, схема которой приведена на рис.1. Воздух с давлением 6 кг/см^2 по трубе с расходомерным участком 1 поступал в ресивер 2, на выходе из которого устанавливалась исследуемая горелка 3 с форсункой 4.

Через форсунку 4 подводился углекислый газ (CO_2) от баллонной системы 5, либо природный газ с давлением $2,2 \text{ кг/см}^2$. Настройка режимов при испытаниях проводилась по перепадам давления по линии воздуха и топлива, а расходы компонентов смеси определялись по заранее измеренным характеристикам пропускной способности линий воздуха и топлива горелки при совместной их работе.

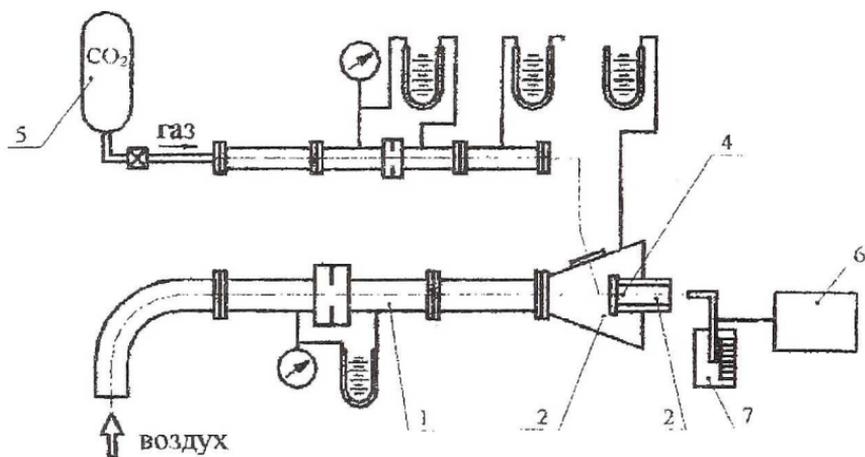


Рис. 1. Схема экспериментальной установки для исследования газодинамических параметров на выходе из горелок основного контура двухзонных КС

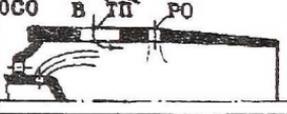
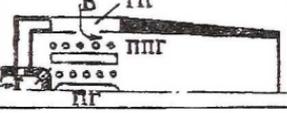
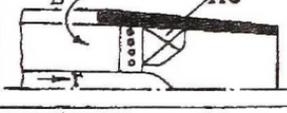
На срезе сопла горелки измерялась осевая составляющая скорости и производился отбор проб газа: CO_2 газоанализатором 6 (IMR-3000P), природного газа в пипетки с дальнейшим определением состава смеси газоанализатором ЛХМ-80. Перемещение датчиков производилось с помощью координатного устройства 7 с переменным шаговым расстоянием 0,5 мм у стенки сопла и 1...2 мм в приосевой части струи. Перед измерениями определялось время отбора пробы, при котором стабилизировалось постоянное значение концентрации на неизменном режиме испытания.

В соответствии с работой [4] при моделировании процесса выравнивания концентрации ТВС на срезе сопла горелки были обеспечены соотношения скоростных напоров в каналах для подачи воздуха и топлива ρw^2 и плотностей смешивающихся потоков $\rho = \rho_g / \rho_m$ как в натуральных условиях. Для предварительного оценки геометрии горелки производилось приближённое моделирование только по ρw^2 при подаче CO_2 , а выбранный при этом вариант горелки исследовался при подаче по линии топлива природного газа.

Проведенное сравнение полей концентрации на срезе сопла одной и той же конструкции горелки (табл.1, тип I) показало, что при подаче по линии топлива природного газа (с меньшей плотностью, чем CO_2) харак-

тер неравномерности сохранялся, см. кривые 1 на рис.2, но происходило более интенсивное её выравнивание, что согласуется с данными работы [4].

Таблица

ТИП ГОРЕЛКИ	СХЕМЫ ГОРЕЛОК ОСНОВНОГО КОНТУРА	ХАРАКТЕРНЫЕ ОСОБЕННОСТИ
I (I-A)		ИСХОДНЫЙ БАЗОВЫЙ ВАРИАНТ ДЛЯ ВЫБОРА ТИПА ПОДАЧИ ВОЗДУХА КС ДВ. НК-36 СТ I-ЦЕНТРАЛЬНАЯ 6-И ТОЧЕЧНАЯ ПОДАЧА ГАЗА (ЦПГ) I-A-ЦЕНТРАЛЬНАЯ МНОГОТОЧЕЧНАЯ ПОДАЧА ГАЗА (ЦМПГ)
II		СЕРИЙНЫЙ ВАРИАНТ ГОРЕЛКИ КОЛЬЦЕВОЙ КС ДВ. НК-36 СТ. ЦЕНТРАЛЬНАЯ ПОДАЧА ГАЗА (ЦПГ)
III		ШТАТНЫЕ ВАРИАНТЫ ГОРЕЛОК КС С ВЖТ ДВ. НК-37, НК-38 СТ. ПЕРИФЕРИЙНАЯ ТОРЦЕВАЯ ПОДАЧА ГАЗА (8 ОТВ.)
IV		ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЙ ВАРИАНТ КС С ВЖТ ДВ. НК-37. ТОРЦЕВОЙ МНОГОТОЧЕЧНАЯ ПОДАЧА ГАЗА (ТМГ)
V		ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ГОРЕЛКИ КОЛЬЦЕВЫХ 2-Х ЗОННЫХ КС, ДВ. НК-36 СТ, НК-14 СТ, НК-18 СТ. ЦЕНТРАЛЬНАЯ (ЦПГ) И ПЕРИФЕРИЙНАЯ (ППГ) ПОДАЧА ГАЗА
VI		ГОРЕЛКИ С АКСИАЛЬНЫМИ ЗАВИХРИТЕЛЯМИ КС ДВ. НК-36 СТ, НК-37, НК-14 СТ. МНОГОТОЧЕЧНАЯ ПОДАЧА ГАЗА ЧЕРЕЗ ОТВЕРСТИЯ В ПОЛЫХ ДОЛАТКАХ

АЗ - АКСИАЛЬНЫЙ ЗАВИХРИТЕЛЬ; РО - РАДИАЛЬНЫЕ ОТВ; ТО - ТАНГЕНЦИАЛЬНЫЕ ОТВ; ТП - ТАНГЕНЦИАЛЬНЫЕ ПАЗЫ; ОСО - ОСЕВЫЕ ОТВ.; В - ВОЗДУХ; Г - ПРИРОДНЫЙ ГАЗ.

В ходе исследований решалась задача выбора наиболее оптимальной конструкции горелки основного контура для обеспечения низкого уровня неравномерности поля концентрации ТВС на срезе сопла, с целью получения минимальной эмиссии оксидов азота и обеспечения характеристик интенсивности горения [2].

Проведена расчётная оценки по методике Лефевра А.Н. влияния на эмиссию NO_x отклонений от среднемассовой температуры продуктов

сгорания, определенных с учетом замеренных, см. рис.2, полей концентраций ТВС. Неравномерность поля концентраций на выходе из горелки значительно влияет на эмиссию NO_x , например, эюре 5 соответствует увеличению NO_x на 90%, а кривой 2 – 3%. Результаты этой оценки согласуются с экспериментальными данными.

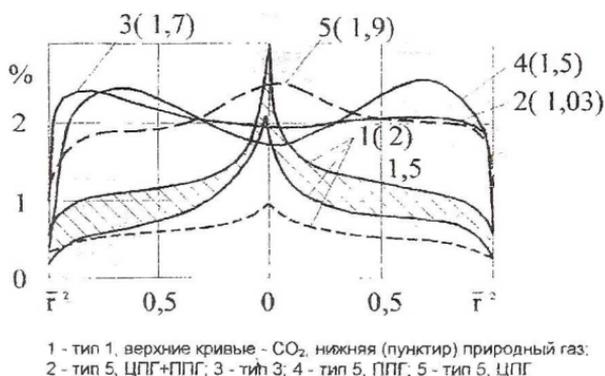


Рис. 2. Сравнение полей концентраций с различными типами горелок

Так, при исследовании горелок - тип I, выравнивание поля концентраций ТВС на срезе сопла горелки за счёт сильного изменения ρw^2 оказалось малоэффективными, см. рис.3. Закрытие тангенциальных пазов (ТП) в этой горелке при сохранении центрального подвода газа привело к значительному выравниванию поля концентрации, см.рис.4. Но

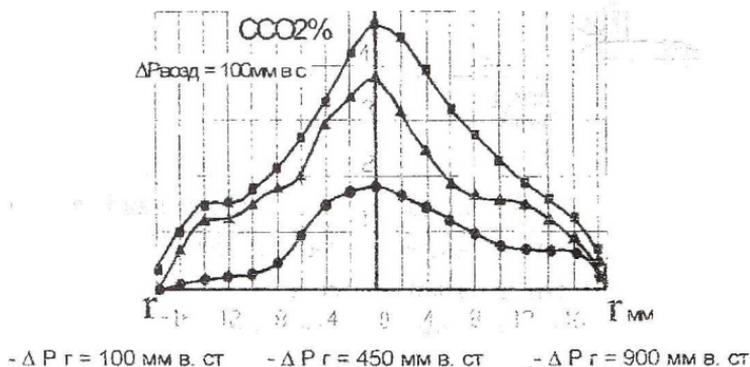


Рис. 3. Влияние соотношений перепадов давлений по линиям топливного газа и воздуха на поле концентраций на срезе горелки типа I

“заполненный” струйный профиль скорости на срезе сопла горелки по данным [5] способствовал росту выбросов окислов углерода на выходе из КС.

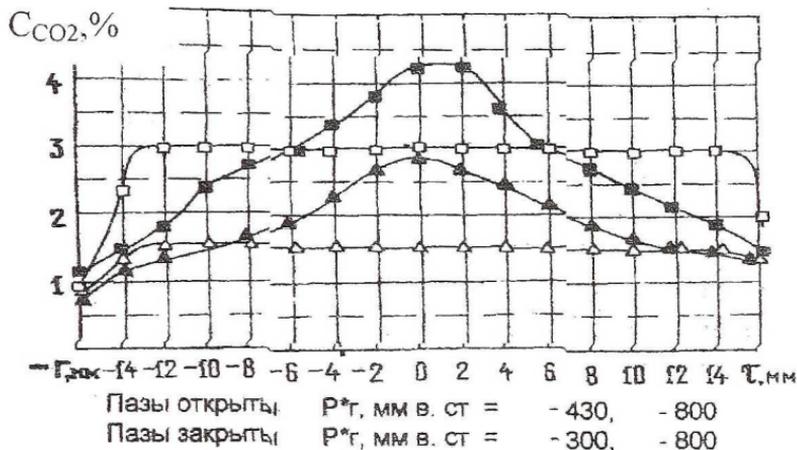


Рис. 4. Влияние закрытия тангенциальных пазов на выравнивание полей концентраций на срезе сопла горелки 91РГ 311.045, тип 5

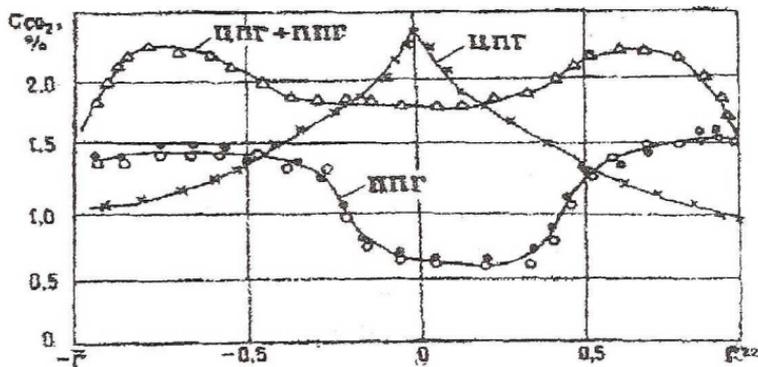


Рис. 5. Влияние подвода топливного газа на неравномерность полей концентраций на срезе сопла горелки основного контура (см. Таблицу)

Не дало положительного эффекта на двигателе также увеличения числа отверстий и рассредоточение их по оси горелки, (табл.1, тип I-A). Многоточечный торцевой подвод газа в горелке, тип IV, приводил к интенсивному нарастанию NO_x при выходе на номинальный режим ра-

боты двигателя НК-37 [2] из-за повышенной неравномерности поля концентрации по оси горелки, аналогичной кривой 1 на рис.2.

Наибольшая степень выравнивания поля концентраций была достигнута при сочетании центрального и периферийного подвода газа в горелках типа V, испытанных в КС двигателя НК-14СТ, см. рис.5. Необходимость такого сочетания обусловлена большими размерами этой горелки, так что отношение диаметра камеры смешения к диаметру отверстия для подачи природного газа составляло 60. При значении этого отношения 35 на аналогичном типе горелки в двухзонной КС двигателя НК-36СТ были получены минимальные уровни выбросов NO_x и CO только с периферийным многоточечным подводом природного газа. Проведенные испытания горелок (тип VI) с аксиальным завихрителем и с многоточечным подводом природного газа через полые лопатки завихрителя на двухзонных КС двигателей НК-36СТ и НК-37 показали их явное преимущество по обеспечению всех указанных выше характеристик, включая эмиссионные, и по тепловому состоянию.

В двухзонных КС с выносными жаровыми трубами (ВЖТ) двигателей НК-37 и НК-38СТ использовался, как исходный, III-ий тип горелки с периферийной торцевой подачей газа, см. табл.1. При проектировании ВЖТ предполагалось, что при соударении струй, истекающих из горелок основного контура, может происходить значительная интенсификация турбулентного горения в зоне С ВЖТ, см. рис.6. Однако, исходный вариант КС двигателя НК-38СТ с 4-мя штатными горелками в каждой ВЖТ не обеспечил низкий уровень эмиссии NO_x .

Исследования температурного поля на выходе из ВЖТ при горении только в дежурной зоне выявили характер неравномерности, см. рис.7, 8. Видно, что на оси и на периферии между струями основного контура имеются забросы температуры, что свидетельствует о неполном смешении этих потоков к выходному сечению ВЖТ. Значения пропускных характеристик В исследуемых горелок определялись по измеренным параметрам при перепаде давления на жаровой трубе 3%.

Интенсификация процесса смешения в основной зоне ВЖТ за счет закрутки потока аксиальными завихрителями, установленными на срезах горелок, приводит к значительному выравниванию поля температур, см. рис.8.

Интересным является приведенный на рис.7 результат, что на оси ВЖТ, где происходит соударение струй, появляется заброс температуры больше, чем на периферии между струями горелок основного контура. По-видимому, это определяется инжекционными свойствами сталкивающихся струй, а также пережимом сечения на

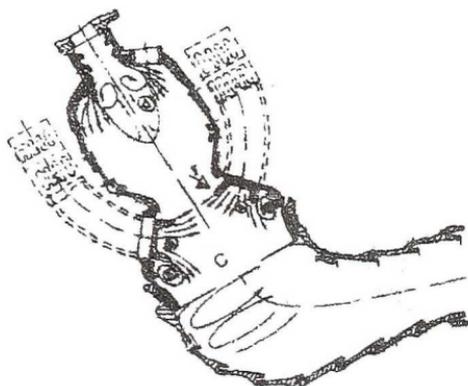


Рис. 6. Схема течений ТВС в выносной жаровой трубе КС

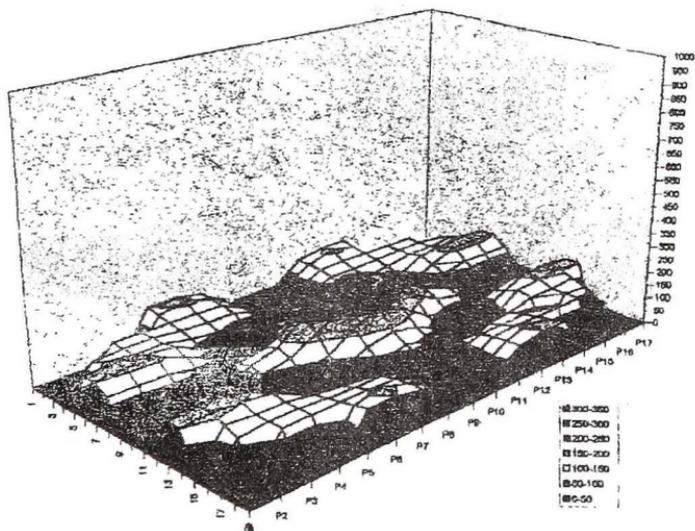
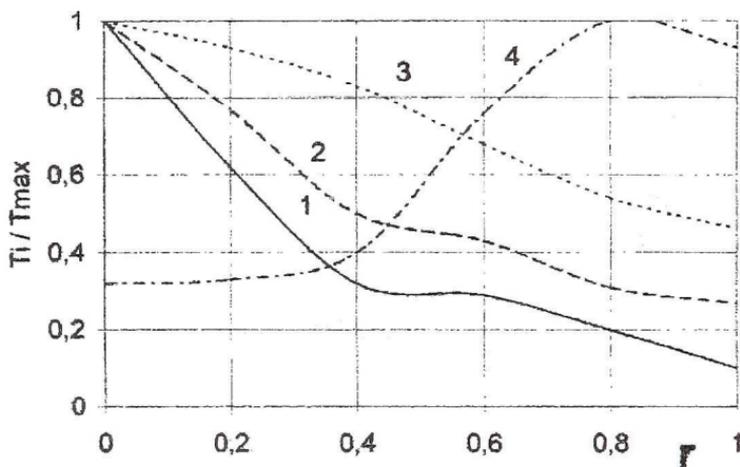


Рис. 7. Моделирование поля температуры на выходе из ВЖТ (температура продуктов сгорания из дежурной зоны 1000°C , в горелках основного контура воздух с температурой 20°C)

выходе из дежурной зоны, так что выходящий поток отрывается от стенок и в виде струи следует по оси камеры, а к периферии поступление "огневой поддержки" ослаблено. Подтверждением этому могут служить данные по повышению температуры на периферии ВЖТ, см. кривая 4 на

рис.8, при выполнении продольных каналов из дежурной зоны в основную между горелками.



- 1- горелка с радиальным подводом воздуха, $B=0,72$
- 2- горелка с тангенциальным подводом воздуха, $B=0,65$
- 3- горелка 2 с аксиальными завихрителями на срезе сопла, $B=0,31$
- 4- горелка 2 с продольными пазами на выходе из форкамеры для прохода продуктов сгорания из дежурной зоны

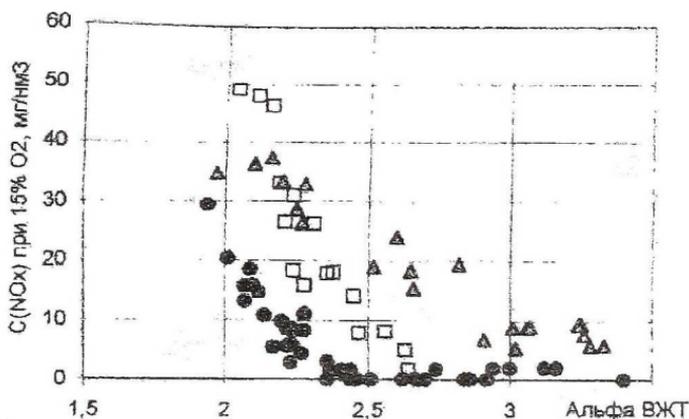
Рис. 8. Влияние конструктивных параметров горелок на выравнивание полей температур в выходном сечении ВЖК КС двиг. НК 38СТ, полученное при модельных испытаниях

В связи с этим возникла необходимость дальнейшей интенсификации турбулентного обмена за счёт увеличения числа горелок основного контура ($n_r = 6...8$) и повышения углового расширения струй, истекающих из этих горелок, при постановке осевого завихрителя на срез сопла с целью снижения эмиссии NO_x .

Увеличение числа горелок в ВЖТ до 8-ми приводит к некоторому снижению эмиссии NO_x по сравнению со штатным вариантом. Но наибольший эффект по снижению NO_x был получен в ВЖТ с 6-ю горелками с многоточечным подводом газа и с закруткой потока на выходе из горелок осевым завихрителем, при испытании ВЖТ на стенде ВТИ, рис. 9.

Приведенные результаты подтверждают необходимость не только высокой степени гомогенизации бедной смеси, но и выбора оптимального числа горелок основного контура [3], увеличения углового расши-

рения струй, истекающих из этих горелок, а также подбора оптимального пережатия сечения на выходе из дежурной зоны КС.



- 4 горелки с завихрителями на срезе сопел, \varnothing 28мм.
- 6 горелок с завихрителями на срезе сопел и многоточечным подводом топлива;
- 8 горелок с выходными соплами \varnothing 20мм

Рис. 9. Влияние числа горелок основного контура и схемы подвода топливного газа на эмиссию NO_x : Испытание модуля ВЖТ на стенде ВТИ при $P_k \approx 1 \text{ кгс/см}^2$, $T_k \approx 700 \text{ К}$

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Тухбатуллин Ф.Г., Кашапов Р.С. Малотоксичные горелочные устройства газотурбинных установок, -М.: Недра, 1997
2. Интенсификация процесса турбулентного горения в камерах сгорания ГТУ./ Савченко В.П., Лавров В.Н., Постников А.М., Цыбизов Ю.И., Денисов И.С. // Вестн. СГАУ. Сер.: Процессы горения, теплообмена и экология тепловых двигателей. Вып. 3; Самар. гос. аэрокосм. ун-т, Самара, 2000. – С.243-252.
3. Снижение NO_x в процессе сжигания горючего на богато-бедных смесях./ Зарзалис Н., Джус Ф. и др.// AIAA/ SAE/ ASME, Propulsion Conference, July, 1992.
4. Турбулентное смешение струй / Абрамевич Г.Н., Крашенинников С.Ю., Секундов А.Н., Смирнова И.П. –М.: Наука ФМЛ, 1974. 272с.
5. Разработка горелок предварительного смешения для малотоксичных камер сгорания высокоэффективных ГТУ / Постников А.М., Савченко В.П., Цыбизов Ю.И., Маркушин А.Н. // Вестн. СГАУ. Сер.: Процессы горения, теплообмена и экология тепловых двигателей. Вып. 2; Самар. гос. аэрокосм. ун-т, Самара, 1999. – С.136-144.