

Результаты разработки были представлены для экспертизы в комитет экологии г. Самары, который выдал положительное заключение о целесообразности внедрения разработанной горелки.

### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Ивлиев А. В. Способ сжигания топлива. Патент РФ № 2078284 на изобретение. МПК F23С 11/00. Зарегистрирован 27.04.97г., приоритет от 10.04.95г.
2. Ивлиев А.В., Ивлиев С.А. Математическая модель процесса образования оксида азота при горении газообразного топлива. – В кн.: Тезисы докладов XXVI Международного научно-технического совещания по динамике и прочности двигателей, посвященного 85-летию со дня рождения Генерального конструктора академика Н.Д. Кузнецова «Динамика и прочность двигателей». Самара: ТОО «Венета», 1996 – с. 71...72.
3. Ивлиев С.А. Математическая модель процесса образования оксида азота. – В кн.: Тезисы докладов X Всероссийской межвузовской научно-технической конференции «Газотурбинные и комбинированные установки и двигатели». М.: МГТУ, 1996 – с. 128...129.
4. Кривоногов Б.М. Повышение эффективности сжигания газа и охрана окружающей среды. – Л.: Недра, 1986 – 280 с.

УДК 621.438

### СИСТЕМЫ УПРАВЛЕНИЯ ПРОЦЕССАМИ ГОРЕНИЯ В КАМЕРАХ СГОРАНИЯ ГТД

Игначков С.М., Постников А.М., Ярославцев В.Г.

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

Одной из самых актуальных проблем, решаемых при создании современных ГТД и при модернизации ГТД, находящихся в эксплуатации, является проблема снижения выбросов вредных веществ (оксидов азота  $\text{NO}_x$ , монооксида углерода  $\text{CO}$  и несгоревших углеводородов  $\text{C}_n\text{H}_m$ ) с выхлопными газами. Известно, что для обеспечения малой эмиссии вредных веществ организуют горение предварительно перемешанной топливовоздушной смеси (ТВС) в узком диапазоне температуры пламени, например,  $T_{\text{пл}} = 1750 \dots 1850$  К, где генерация оксидов азота  $\text{NO}_x$ , монооксида углерода  $\text{CO}$  и несгоревших углеводородов  $\text{C}_n\text{H}_m$  достаточно низка. Последнее иллюстрируется зависимостью температуры пламени  $T_{\text{пл}}$  и концентрации вредных веществ  $\text{NO}_x$ ,  $\text{CO}$ ,  $\text{C}_n\text{H}_m$  от коэффициента избытка воздуха  $\alpha$  предварительно перемешанной

ТВС (рис. 1). Из этих зависимостей следует, что для обеспечения низких выбросов  $\text{NO}_x$ ,  $\text{CO}$ ,  $\text{C}_n\text{H}_m$  на разных режимах работы двигателя камера сгорания должна постоянно работать с оптимальной температурой пламени независимо от режима двигателя и внешних условий. Однако при использовании

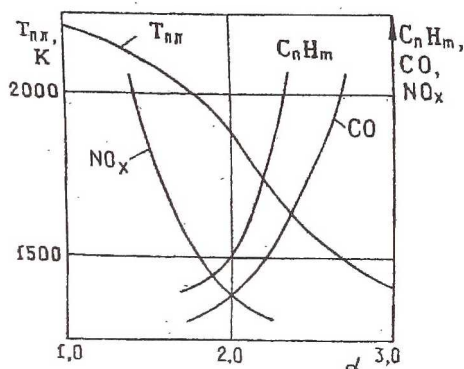


Рис. 1. Зависимость температуры пламени и концентраций вредных веществ в выхлопных газах от состава предварительно перемешанной ТВС

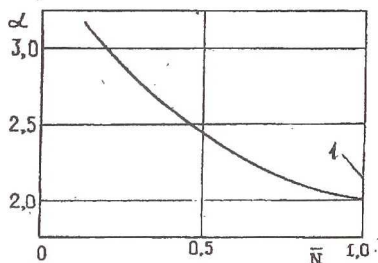


Рис. 2. Типичная зависимость состава смеси в зоне горения от мощности двигателя при обычной системе регулирования.

1 — расчетный номинальный режим

пламени является необходимым условием получения низкой эмиссии вредных веществ на всех режимах эксплуатации двигателя и обеспечения устойчивой и надежной работы камеры сгорания.

Для реализации этого условия зарубежные фирмы внедряют автоматизированные системы управления процессами в камерах сгорания (АСУ КС). В этих системах используются различные способы оптимизации процесса горения:

традиционной системы регулирования это осуществимо только на каком-либо одном расчетном режиме. Пример типичной зависимости коэффициента  $\alpha$  в зоне горения от относительной мощности  $\bar{N}$  двигателя показан на рис. 2. При значительном уменьшении мощности двигателя ТВС обедняется и температура пламени настолько снижается, что горение может стать неэффективным и пламя срывается. Если же при форсировании мощности двигателя температура пламени превысит расчетное значение, то эмиссия  $\text{NO}_x$  может увеличиться сверх допустимой величины, а жаровая труба камеры сгорания при длительной работе может быть повреждена.

Таким образом, тщательное регулирование состава ТВС в зонах горения для поддержания оптимальной температуры

- с помощью регулирования расхода воздуха, поступающего в камеру, путем применения регулируемого входного направляющего аппарата компрессора и клапанов перепуска воздуха («Дж. Электрик» [1, 2], «Сименс» [3, 4], «Аллисон» [5]);

с помощью регулирования расхода воздуха, идущего в зоны горения, путем применения камер изменяемой геометрии («Сименс» [3, 4], «Солар» [5], «Вестингаус», «Митсубиси» [4]);

- с помощью регулирования площади горения  $F_{гор}$  путем последовательной подачи топлива в группы горелок (АББ [4], «Дж. Электрик» [1, 2], «Р. Ройс» [6], «П. Уитни» [7]).

Первый способ регулирования приводит к значительному ухудшению КПД двигателя, при использовании второго или третьего способа этот недостаток является незначительным, но изменяется температурное поле газового потока перед турбиной.

В ОАО СНТК имени Н.Д. Кузнецова разработана система управления процессами горения в двухзонных камерах ГТД, включающая систему регулирования камеры по распределению расхода воздуха, многоконтурную систему подачи топлива по зонам горения в камере сгорания с независимым регулированием расхода топлива по каждому контуру.

Система управления процессами в камере сгорания обеспечивает поддержание оптимальной температуры пламени в каждом контуре.

Для расчета температуры пламени использовано уравнение теплового баланса

$$H_u \eta_z = (1 + L_o)(i_r - i_{rk}) + (\alpha - 1)L_o(i_n - i_{vk}), \quad (1)$$

уравнение изменения энтальпии при адиабатическом процессе

$$i_{пл} - i_k = \int_{T_0}^{T_{пл}} C_p \cdot dT - \int_{T_0}^{T_k} C_p \cdot dT, \quad (2)$$

и линейные зависимости теплоемкостей продуктов сгорания и воздуха от температуры

$$C_{пр} = a + bT, \quad (3)$$

$$C_{вв} = x + yT \quad (4)$$

В результате решения системы уравнений (1), (2), (3), (4) получены формулы для расчета температуры пламени

$$T_{\text{пл}} = \frac{-B + \sqrt{B^2 - 4AC}}{2A},$$

где

$$A = (1 + L_0) \frac{b}{2} + (\alpha - 1) L_0 \frac{y}{2},$$

$$B = (1 + L_0)a + (\alpha - 1)L_0x,$$

$$C = H_u \eta_z + AT_k^2 + BT_k^2$$

и для определения потребного значения коэффициента избытка воздуха, обеспечивающего заданную температуру пламени  $T$  при различных значениях полноты сгорания топлива  $\eta_z$  и температуры воздуха  $T_k$  на входе в камеру

$$\alpha_n = 1 + \frac{H_u \eta_z + (1 + L_0) \left[ \frac{b}{2} (T_{\text{пл}}^2 - T_k^2) + a \cdot (T_{\text{пл}} - T_k) \right]}{L_0 \left[ \frac{y}{2} (T_{\text{пл}}^2 - T_k^2) + x (T_{\text{пл}} - T_k) \right]}$$

В качестве примера рассмотрим АСУ КС двигателя НК-37, предназначенного для привода электрогенератора. Для этого двигателя разработана двухзонная камера сгорания с 12 выносными жаровыми трубами (ВЖТ) (рис. 3.). В каждой ВЖТ установлено по одной дежурной горелке и по шесть основных горелок.

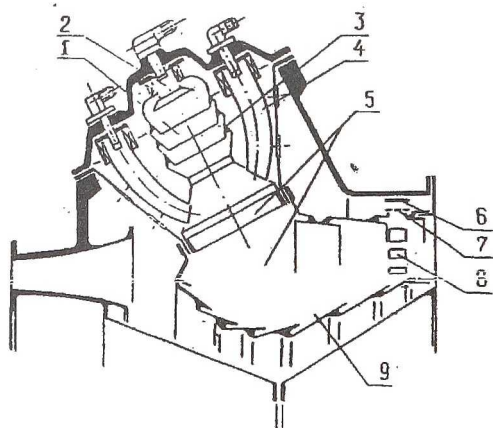


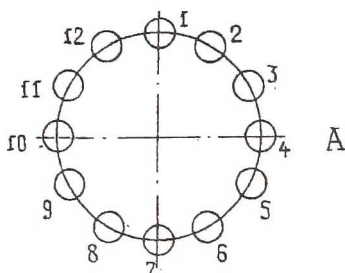
Рис. 3. Схема двухзонной камеры сгорания с ВЖТ:

- 1 – дежурная зона горения,
- 2 – горелки дежурной зоны,
- 3 – выносные жаровые трубы (ВЖТ),
- 4 – горелка основной зоны,
- 5 – основная зона горения,
- 6 – лента механизма перепуска воздуха в положении «открыто»,
- 7 – лента механизма перепуска воздуха в положении «закрыто»,
- 8 – окна перепуска воздуха,
- 9 – кольцевой газосборник

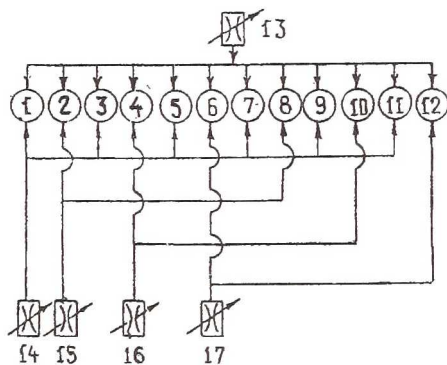
Топливная система камеры сгорания состоит из пяти контуров (рис. 4), один для подачи топлива в дежурную зону одновременно во все ВЖТ и четыре для подачи топлива в основную зону камеры, последовательно в 6, 2, 2 и 2 ВЖТ.

Рис. 4. Схема топливной системы:

- А – расположение ВЖТ по окружности,
- 1...12 – номера ВЖТ,
- 13 – дозатор топлива дежурной зоны,
- 14...17 – дозаторы топлива основных контуров



Запуск двигателя производится по отработанной циклограмме подачи топлива в дежурный контур камеры. После завершения запуска включается в работу АСУ КС (рис. 5). При увеличении режима работы двигателя расход топлива в дежурный контур регулируется таким образом, чтобы температура пламени в дежурной зоне камеры



увеличивалась, например, до 2200 К и далее до определенного режима по  $P_k$  поддерживалась постоянной. Затем в заданном диапазоне  $P_k$  температура пламени в дежурной зоне линейно уменьшается до, например, 1400 К и вновь поддерживается постоянной на этом новом уровне.

После завершения запуска одновременно включается подача топлива в первый основной контур и открывается перепуск воздуха из зоны горения в выходную зону камеры. Расход топлива повышается до достижения оптимальной температуры пламени в основной зоне за включенными ВЖТ. В этой позиции подключается второй основной контур, подающий топливо в следующие две ВЖТ. При дальнейшем увеличении режима расход топлива в оба контура увеличивается, система АСУ КС при этом поддерживает постоянным оптимальное значение температуры пламени за ВЖТ первого контура. Перепуск воздуха в камере позволяет улучшить горение первых порций топлива,

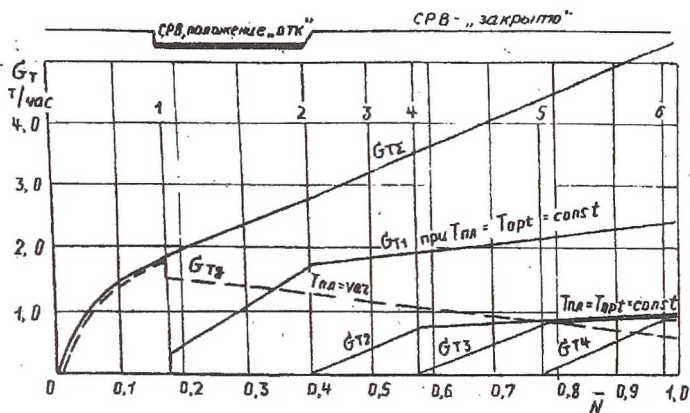


Рис. 5. Программа регулирования расходов воздуха и топлива по зонам камеры сгорания :

$G_{T\Sigma}$ ,  $G_{T\lambda}$ ,  $G_{T1}$ ,  $G_{T2}$ ,  $G_{T3}$ ,  $G_{T4}$  — расходы топлива соответственно суммарный, в дежурный контур, в первый, второй, третий и четвертый основные контуры;

1, 2, 3, 4, 5, 6 — номера позиций циклограммы работы АСУКС

поступающего в основную зону первого и второго контуров, повышает тем самым полноту сгорания топлива на промежуточных режимах и снижает выбросы монооксида углерода и несгоревших углеводородов.

По мере роста режима улучшаются условия для горения ( $\uparrow P_k^*$ ,  $\uparrow T_k^*$ ) и на режиме примерно 50% номинальной мощности система регулирования камеры закрывает перепуск воздуха. При достижении  $T_{шт} = T_{шт}$  за горелками ВЖТ второго контура включается третий контур и т.д.

Снижение режима производится в обратном порядке.

Для реализации описанной программы управления процессами в камере АСУ КС включает 6 блоков регулирования: блок регулирования камеры по воздуху, пять блоков регулирования расхода топлива. Блоки имеют соответствующие связи между собой, АСУ КС управляется ЭСУД-ом двигателя и АСУ агрегата (турбогенератора).

Принципиальная схема системы регулирования  $i$ -того топливного контура приведена на рис. 6. Основным элементом дозировки топлива является поворотный дроссельный кран 3, нужное положение которого обеспечивается исполнительным механизмом 4 (шаговым электродвигателем). Электронный регулятор содержит процессор для расчета фактического и потребного расхода топлива в каждый контур камеры по замеренным значениям параметров

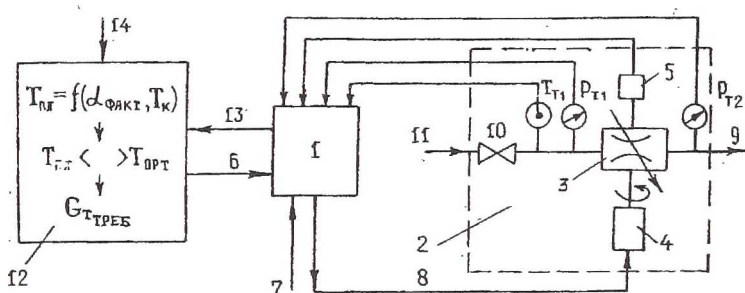


Рис. 6. Принципиальная схема регулирования расхода топлива в  $i$ -й контур :  
 1 – регулятор расхода, 2 – дозатор топлива, 3 – кран,  
 4 – исполнительный механизм, 5 – датчик положения крана,  
 6 – требуемый расход топлива, 7 – состав топливного газа,  
 8 – команда на изменение положения крана, 9 – подача топлива в ВЖТ,  
 10 – запорный клапан, 11 – подвод топлива, 12 – процессор,  
 13 – фактический расход топлива

топлива, заданному значению температуры пламени, дроссельной характеристики двигателя по расходу воздуха и выдает команды на корректировку положения дроссельного крана дозатора.

Конспективно структуру алгоритма управления процессами в камере сгорания можно представить следующим образом.

В базе исходных данных процессора заложены:

- дроссельная характеристика конкретного двигателя

$$G_{в.о} = f_1(n_{в.до}) ;$$

- зависимость для определения фактического расхода воздуха через камеру сгорания

$$G_{в.кс} = f_2(G_{в.о}, t_1^*, P_1^*, \Delta G_{в.}) ;$$

характеристики топлива и продуктов сгорания ( $H_u$ ,  $\rho$ , состав топлива и продуктов сгорания при  $\alpha = 1$ ) ;

характеристики камеры сгорания (количество ВЖТ, дежурных и основных горелок в каждом контуре, гидравлические характеристики камеры и горелок, закон изменения температуры пламени в дежурной зоне от режима работы двигателя, оптимальное значение

температуры пламени в основной зоне камеры, коэффициент перепуска воздуха, геометрические характеристики камеры);

- измеряемые параметры:

$$P_1^*, T_1^*, n_{нд}, P_k^*, T_k^*, P_{mi}^*, \Delta P_{mi}, \varphi.$$

При работе двигателя в процессор непрерывно должны поступать сигналы от соответствующих датчиков. По этим сигналам через заданные интервалы времени с помощью введенных в алгоритм зависимостей рассчитываются потребные для каждого контура значения коэффициента избытка воздуха  $\alpha_n$  и расхода топлива  $G_{в i}$ , и корректируется последний поворотом дроссельного крана на угол

$$\Delta\varphi_i = f(\Delta G_{mi})$$

Очевидно, что максимальная неравномерность температурного поля на входе в турбину при описанной программе АСУ КС будет проявляться на режиме поз. 2 рис. 5, когда шесть ВЖТ полностью включены по  $T_{отт}$ , а в остальных шести ВЖТ включены только дежурные зоны. В этом случае турбина будет работать в нерасчетных по к.п.д. условиях вследствие окружной парциальности потока.

Для оценки окружной неравномерности температур на стенде автономных испытаний камеры сгорания в модельных условиях были проведены специальные исследования. На режиме, соответствующем  $0,4N_{ном}$ , топливо в основную зону подавалось в 6 ВЖТ, расположенных через одну с неработающими ВЖТ. Замер температурного поля производился шеститочечной термогребенкой, установленной во вращающейся турели. Анализ замеров показал, что пиковое значение температуры газа в окружном направлении и средняя на  $i$ -том радиусе температура газа не превышают таковых значений на режиме максимальной мощности. Следовательно, рассмотренные условия не приведут к ухудшению теплового состояния лопаток и дисков турбины и не повлияют на надежность двигателя.

Результаты термодинамического расчета свидетельствуют, что потери к.п.д. двигателя при этом на режиме  $0,4N_{ном}$  не превышает 0,2%, а на режиме  $N_{ном}$  потерь к.п.д. нет.

Влияние перепуска воздуха из зоны горения в выходную часть камеры на экологические характеристики и работоспособность двигателя исследова-



лись при натуральных испытаниях кольцевой двухзонной камеры в составе двигателя. Отбор проб выхлопных газов производился пятиточечной газоотборной гребенкой, каждое отверстие которой располагалось в центре равновеликих кольцевых площадей газового тракта на выходе из двигателя. Анализ выхлопных газов осуществлялся газоанализатором IMR-3000P и хроматографами ЛХМ-80 и ГАЗОХРОМ. При испытаниях система регулирования камеры по воздуху переключалась многократно (16 раз) из положения «закрыто» в положение «открыто» и наоборот. При этом двигатель работал устойчиво, замечаний по работе механизма перепуска не было, при последующих разборках матчасти дефектов не обнаружено. Аналогичное устройство с металлической гибкой лентой применяется на авиационных двигателях в системе охлаждения турбины высокого давления. При специспытаниях оно проверялось при более чем 1500 циклах «открыто – закрыто», замечаний по состоянию матчасти не было.

Эффективность применения перепуска воздуха по эмиссии вредных веществ показаны на рис. 7. На режимах  $(0,35 \dots 0,4)N_{\text{ном}}$  при открытом перепуске воздуха выбросы  $\text{CO}$  снизились с  $1100 \text{ мг/нм}^3$  до  $200 \text{ мг/нм}^3$ , выбросы  $\text{NO}_x$  возросли до  $110 \text{ мг/нм}^3$ , что меньше, чем на максимальном режиме.

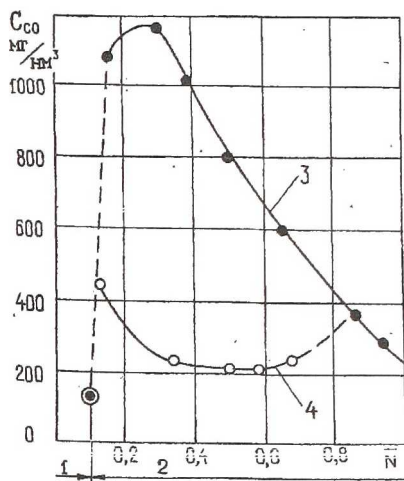
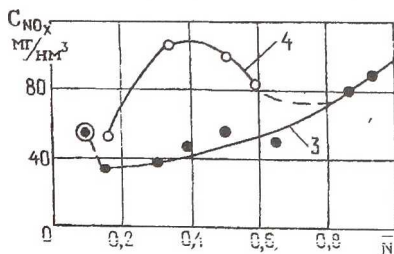


Рис. 7. Пример эффективности применения системы регулирования камеры по воздуху :

- 1 – работает дежурная зона,
- 2 – работают обе зоны,
- 3 – лента в положении «закрыто»,
- 4 – лента в положении «открыто»



## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Gary Leonard. Development of an aeroderivative gas turbine dry low emission combustion system, материалы фирмы «Дж. Электрик» на конференции ASME, апрель 1993 г.

2. Fuel supply control method for a gas turbine engine, патент США № 5303542, 1992.
3. Gas turbine operating performance and considerations for combined cycle conversion at hay road power station / For presentation at the American Power Conference. Chicago, april 23...25, 1990.
4. Ольховский Г.Г. Энергетические ГТУ за рубежом / Теплоэнергетика № 9, 1990 г.
5. Robert Farmer. Dry low NO<sub>x</sub> alternatives for aeroderivatives and small GTS. Gas turbine world, july – august, 1994.
6. В.К. Fulton. Dry low emission design based on series vs parallel fuel staging. / Gas turbine world, january – february, 1996.
7. T.S. Snyder, T.I. Rosfjord. Emission and performance of a leanpremixed gas fuel injection system for aeroderivative gas turbine engines. / Presented at the International gas turbine and aeroengine congress and exposition. The Hague, Netherlands, june 13...16, 1994.
8. Ольховский Г.Г. Снижение концентрации оксидов азота в выбросах ГТУ. / Теплоэнергетика, № 3, 1990 г.

УДК 621.438:546.11

## МОДЕЛИРОВАНИЕ ОБРАЗОВАНИЯ NO<sub>x</sub> В КАМЕРЕ СГОРАНИЯ С ПРЕДВАРИТЕЛЬНОЙ ПОДГОТОВКОЙ ТОПЛИВО-ВОЗДУШНОЙ СМЕСИ

Кашапов Р.С., Максимов Д.А., Скиба Д.В.,  
Баштанников М.Н., Куликов С.В.

*Уфимский государственный технический университет,  
кафедра ТАРД, г. Уфа*

В условиях камер сгорания ГТУ с предварительным смешением топлива, в силу существующих ограничений по габаритам и возможностям интенсификации смешения, можно получить однородную рабочую смесь с некоторым уровнем пульсаций концентрации топлива  $\sigma/\langle z \rangle$  перед фронтом пламени. При этом задача снижения выбросов NO<sub>x</sub> в основном сводится к задаче оптимизации процесса смешения в горелочном устройстве, то есть к формированию потока рабочей смеси с минимальным уровнем пульсаций концентрации при заданных конструктивных ограничениях (длина смесителя L<sub>с</sub>, коэффициент потерь полного давления в смесителе ξ, минимальный размер газового отверстия d, избыточное давление газа Δp<sub>г</sub><sup>\*</sup>).

В данной работе теоретическими и экспериментальными методами исследовалось влияние конструктивных параметров оптимального смесителя на уровень  $\sigma/z$  и объемную концентрацию окислов азота γ<sub>NO<sub>x</sub></sub>. Уровень  $\sigma/z$  оценивался косвенным путем, с помощью математической модели, связывающей γ<sub>NO<sub>x</sub></sub> с эво-