

РАЗРАБОТКА СИСТЕМЫ НИЗКОЭМИССИОННОГО ГОРЕНИЯ ТОПЛИВА В ГАЗОТУРБИННЫХ УСТАНОВКАХ

© 2007 В. Н. Лавров¹, А. М. Постников¹, Ю. И. Цыбизов¹,
Г. Д. Мальчиков², В. В. Гребнев³, А. В. Морозов³

¹ОАО «СНТК им. Н.Д.Кузнецова», г. Самара

²Самарский государственный аэрокосмический университет

³ООО «РосЭко», г. Тольятти

Исследовано влияние каталитических нейтрализаторов на снижение концентрации CO и NO_x в продуктах сгорания газотурбинного двигателя. На основании выполненных исследований предложена система низкоэмиссионного горения, включающая камеру сгорания и каталитический нейтрализатор в выхлопной системе двигателя.

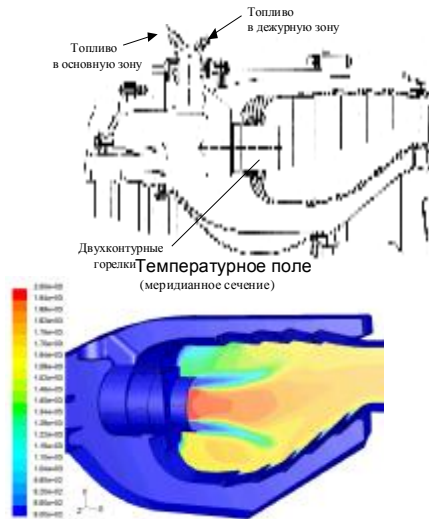
Газотурбинные установки (ГТУ) с высокими параметрами термодинамического цикла со степенью сжатия компрессора – $p_k \geq 20$ широко используются в качестве приводов нагнетателей газоперекачивающих агрегатов (ГПА), электрогенераторов в блочно-модульных электростанциях, а также на железнодорожном и автомобильном транспорте. Одной из основных проблем, решаемых при создании этих ГТУ, является проблема снижения выбросов вредных веществ (оксидов азота NO_x и монооксида углерода CO). Основным направлением при этом является разработка так называемых «сухих» систем горения (без впрыска воды или пара), основанных на сжигании бедной гомогенной топливоздушнoй смеси (ТВС). Такие системы горения с малоэмиссионными камерами сгорания (МКС) без применения специальных устройств являются однорежимными, т.е. обеспечивают низкие выбросы одновременно NO_x и CO в узком рабочем диапазоне мощностей вблизи максимального режима.

В настоящее время действуют «жесткие» требования по нормированию эмиссии NO_x и CO в выхлопе ГТУ в широком диапазоне изменения мощности ГТД (от 0,5 номинала до максимального режима). Прослеживается тенденция к дальнейшему снижению допустимых норм на выброс вредных газов. Нормирование выбросов вредных веществ конкретных ГТУ производит заказчик, основываясь, как правило, на национальных нормативных документах. В Российской Феде-

рации действует ГОСТ 28775-90 для газоперекачивающих агрегатов с газотурбинными приводами и ГОСТ 29328-92 для газотурбинных установок привода электрогенераторов. В ОАО «ГАЗПРОМ» (заказчик) принят стандарт организации СТО ГАЗПРОМ 2-3,5-038-2005, предназначенный для определения показателей выбросов вредных веществ ГТУ и соответствия их требованиям нормативных документов.

Обычно ОАО «ГАЗПРОМ» требует при создании новых ГТУ и модернизации существующих снижения NO_x до уровня 50 мг/м³, по CO – от 100 мг/м³ до 300 мг/м³. (По эмиссии CO - это среднее значение концентраций $C_{co}^{15\%}$ по трем точкам при максимальном минимальном и среднем значениях температуры газа за турбиной в измеренном диапазоне $(0,7 \dots 1,0)N_{ном}$). Энергетики в настоящее время устанавливают более жесткие нормы: 50 мг/м³ по NO_x и по CO при работе на природном газе в рабочем диапазоне мощности $(0,5 \dots 1,0)N_{ном}$.

На рис. 1 показана МКС высокоэффективного двигателя НК-38СТ ($p_k > 25$). Здесь же приведены основные параметры двигателя и технические решения, внедренные в конструкцию МКС. Результаты измерений эмиссии этого двигателя в виде зависимости приведенной к 15% кислорода концентрации NO_x и CO от приведенной мощности и при различной величине подачи топлива в дежурную зону (1-й контур, $G_{m1к}$) представлены на рис. 2. Из анализа этих данных следует, что



| Технические решения |
|--|
| •23 съёмные двухконтурные, двухзонные горелки. |
| •Отсутствие загромождения на входе в завихрители горелок. |
| Улучшенная система охлаждения и эффективное теплозащитное покрытие |
| Основные параметры |
| •Расход воздуха - 52 кг/с. |
| •Расход топлива - 3420 кг/ч. |
| Температура на входе - 800 К |
| Температура на выходе - 1500 К |
| •Давление - 25,6 кг/см ² |
| Кoeffициент избытка воздуха $a_{ac} = 3,28$ |
| Окружная неравномерность < 50 ° |
| Эмиссия: NOx ≤ 50 мг/нм ³ CO ≤ 50 мг/нм ³ |

Рис. 1. Малоэмиссионная камера сгорания двигателя НК-38СТ

на номинальном режиме работы двигателя при $N_{пр} = 16$ Мвт эмиссия NO_x и CO не превышает 50 мг/м³. Однако, если следовать требованиям СТО ГАЗПРОМ 2-3,5-038-2005, где приведенная концентрация CO определяется как средняя величина по трем измеренным точкам при максимальном, минимальном и среднем значениях температурах газа в условиях эксплуатации, то эмиссия CO превышает норму 300 мг/м³.

Практика эксплуатации высокоэффективных ГТУ с современными МКС, показывает, что принятые системы регулирования работы двигателя по оборотам (мощности) не обеспечивают требуемую эмиссию CO на низких и переходных режимах, а так же при отрицательных температурах окружающей среды.

Известно [1], что CO образуется вследствие:

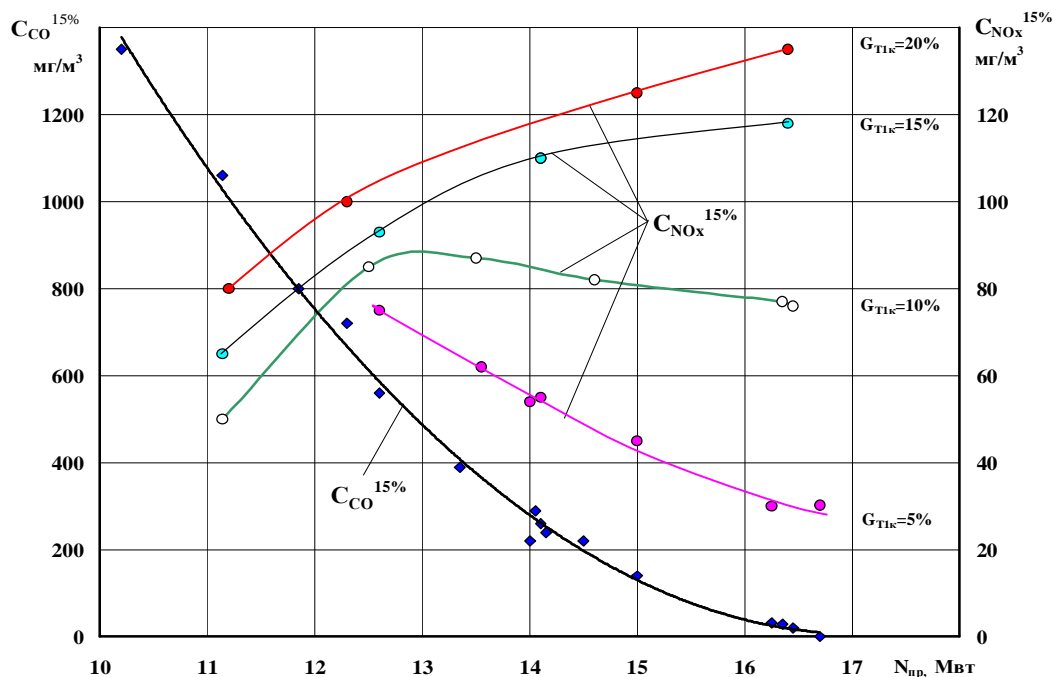


Рис. 2. Результаты испытаний малоэмиссионной камеры сгорания в составе двигателя

- нехватки кислорода при горении богатых смесей ($a < 1,0$) (здесь a - коэффициент избытка воздуха, равный $a = \frac{G_B}{L_o G_T}$,

G_B, G_T - соответственно расход воздуха и топлива, L_o - стехиометрический коэффициент соотношения компонентов);

- диссоциации CO_2 при высоких температурах;

- неполного сгорания топлива в бедных ($a > 1,0$) хорошо перемешанных ТВС;

- наличия холодного пристеночного слоя в традиционной схеме заградительного охлаждения стенок жаровой трубы.

В последних двух случаях можно снизить CO практически до нуля, если правильно организовать рабочий процесс горения с до окислением CO в после-пламенных зонах и использовать не традиционную систему охлаждения. Окисление CO идет относительно медленно (особенно в условиях МКС) и именно скорость окисления CO является фактором, определяющим выбор времени пребывания (длины камеры), необходимого для завершения реакций.

Методы снижения выброса CO основаны на представлениях о физико-химических закономерностях его образования:

- обеспечения состава смеси в зоне горения ближе к $a = 1,1 \dots 1,3$;

- увеличения объема зоны горения и времени пребывания в ней (что особенно актуально для ТВС с $a > 1,3$);

- если смесь в зоне горения $a > 1,3$, то необходимо стремиться к диффузионному горению, т.е. компоненты подавать в камеру раздельно, предварительно их не перемешивая.

Все перечисленные методы невозможно реализовать в МКС, т.к. они приводят к резкому увеличению NO_x . Установлено, что только в очень узком диапазоне температур ($T_{пл} = 1750 \dots 1850$ К) можно одновременно добиться требуемых уровней выбросов NO_x и CO .

В конечном итоге большинство непростых технических решений направлены на то, чтобы обеспечить нужный уровень темпера-

тур пламени во всем объеме зоны горения, исключив «горячие» локальные области, на номинальном режиме. Еще сложнее удержать этот уровень во всем рабочем диапазоне мощностей ГТУ.

Для выполнения требований по эмиссии выхлопных газов ГТД разрабатываются системы низкоэмиссионного горения, обычно включающие:

- собственно камеру сгорания для сжигания бедной гомогенной (предварительно перемешанной) ТВС при температуре пламени не выше 1750 К;

- систему регулирования процесса горения путем строго дозированной подачи топлива по нескольким контурам в зависимости от режима работы ГТД и условий окружающей среды;

- систему управления воздухом в камере сгорания, обычно перепускающей воздух из первичной зоны горения в зону смешения на низких режимах работы для поддержания оптимального соотношения «топливо-воздух» в зоне горения;

- механизмы регулирования компрессора.

Наглядным примером исполнения ГТУ с системой низкоэмиссионного горения может служить ГТУ LM6000+ фирмы Дж.Электрик, которая включает собственно камеру сгорания, регулятор управляющий многоконтурной подачей топлива в отдельные группы горелок с целью поддержания требуемой температуры пламени в этих горелках, механизмы регулирования и управления компрессором (специальные клапаны и регулируемые направляющие аппараты) для поддержания оптимального расхода воздуха в камеру [1, 2].

Очевидным недостатком такой системы низкоэмиссионного горения является конструктивная сложность, высокая стоимость и трудности в ее эксплуатации, что обуславливает необходимость проработки альтернативных методов уменьшения эмиссии CO на пониженных режимах.

На возможные перспективы улучшения экологических характеристик ГТУ указывает опыт использования каталитических нейтрализаторов в двигателях внутреннего сгорания и ГДТ. Так, например, датская компа-

ния «Хальдер топсе А/О» с 1990 г. выпускает установки каталитической очистки выхлопных газов стационарных дизельных двигателей и газовых турбин. Недостатком таких установок является их большие габариты и требуемые площади для монтажа. Установка нейтрализации автономна и служит дополнением к системе низкоэмиссионного сжигания топлива.

Опыт эксплуатации малогабаритных каталитических нейтрализаторов ДВС показывает, что объем нейтрализатора для промышленной ГТУ можно существенно уменьшить и разместить его в канале выхлопного устройства, то есть каталитический нейтрализатор (КН) становится узлом двигателя и может быть включен в систему низкоэмиссионного сжигания топлива. КН, изготовленные по автомобильной технологии, имеют ресурс в составе ДВС порядка 3000 часов, что соизмеримо с ресурсом ГТУ. В составе ГТУ условия работы КН облегчены: при бедном сжигании газа образуется мало частиц сажи, температурный диапазон выхлопного газа находится вблизи максимума эффективности катализатора, а отсутствие больших забросов температуры выхлопных газов исключает его возгорание.

Положительным обстоятельством при этом является то, что во время проведения плановых работ при обслуживании ГТУ допустима периодическая замена каталитических элементов для их последующего восстановления.

Таким образом, исследование отечественных разработок КН, например, по автомобильной технологии применительно к ГТУ семейства НК (НК-38СТ, НК-36СТ, НК-37, НК-361), представляется оправданным и исключительно целесообразным. В связи с этим на специально спроектированной установке были исследованы 9 вариантов КН в габаритных размерах «штатного» нейтрализатора, используемого в выхлопных патрубках автомобилей семейства ВАЗ (изготовитель ЗАО РОСЭКО). Испытания проведены в объеме, предусматривающем:

- определение гидравлических характеристик;

- определение влияния КН на экологические характеристики продуктов сгорания углеводородного топлива при температурах и скоростях потока за свободной турбиной применительно к двигателям семейства НК;

- испытания по надежности при имитации возможного заброса температуры газа при запуске двигателя.

Выбросы вредных веществ измерялись газоанализатором ДАГ-16. Ввиду того, что практически не отмечено влияние КН на эмиссию NO_x , то проверялась в основном эффективность снижения выброса CO .

В качестве критерия эффективности КН было принято отношение концентрации CO на входе и на выходе из него, названная коэффициентом снижения концентрации CO или коэффициентом нейтрализации.

Концентрация CO на входе в КН определялась режимом горения в камере-подогревателе, уровень которой зависел от расхода воздуха через подогреватель и установленной температурой выхлопного газа (расхода топлива в камеру).

При имитации скоростей воздуха на входе в КН получено ограничение из-за снижения устойчивости процесса горения в камере-подогревателе.

Температура выхлопного газа оказалась в качестве определяющего параметра при работе КН. На рис. 3 показано изменение коэффициента снижения концентрации CO в зависимости от температуры на входе в КН. Сравнительные испытания проведены при скорости газа на входе 50...60 м/с.

Влияние входной скорости газа на качество нейтрализации CO представлено на рис. 4, при этом надо иметь в виду, что для катализа важна не сама скорость, а время пребывания газа в КН. Поэтому для оптимизации коэффициента нейтрализации в условиях двигателя, видимо, придется варьировать длиной и пористостью каталитических элементов. Из представленной на графике рис. 4 крутой зависимости коэффициента нейтрализации от скорости можно предположить, что для данной конструкции КН имитация скорости выхлопного газа в ГТУ ~ 130 м/с в диапазоне температур 400...500°C

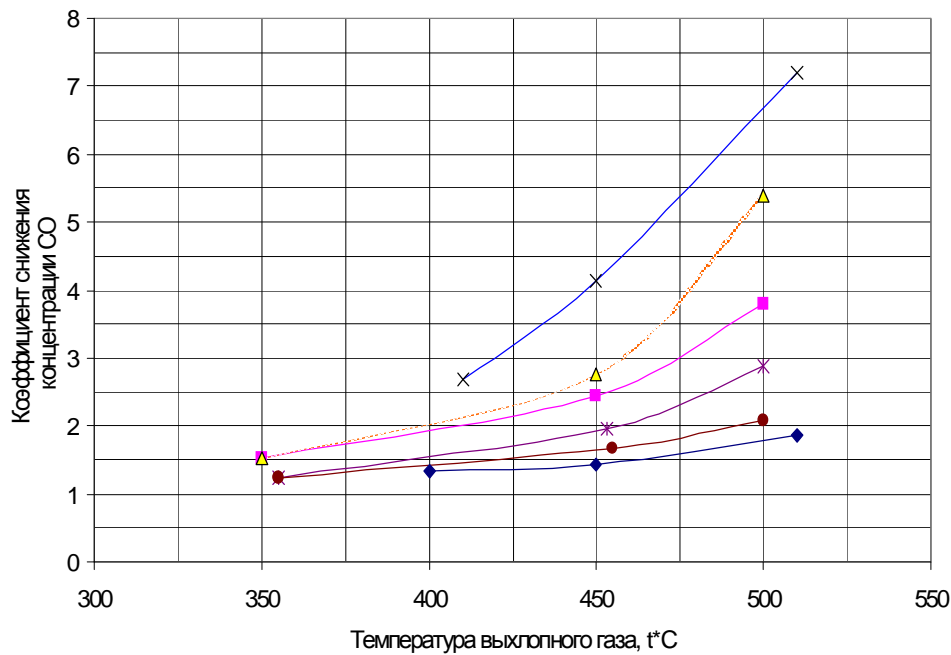


Рис. 3. Эффективность нейтрализации СО в различных типах катализаторов при одинаковом расходе выхлопного газа

снизит коэффициент нейтрализации незначительно.

Как показывают испытания, имеется еще один фактор, определяющий коэффициент нейтрализации - коэффициент избытка кислорода в выхлопном газе. С увеличением доли кислорода, величина которого примерно на 1% растет на выходе из КН, окисление СО происходит более интенсивно, что осо-

бенно важно для работы ГТУ на низких режимах и при отрицательных температурах воздуха окружающей среды.

Гидравлическое сопротивление всех исследованных КН незначительно отличается друг от друга и составляет величину 2...2,7 % при относительной скорости $I = 0,08$, что вполне приемлемо для ГТУ.

Таким образом, проведенные на стен-

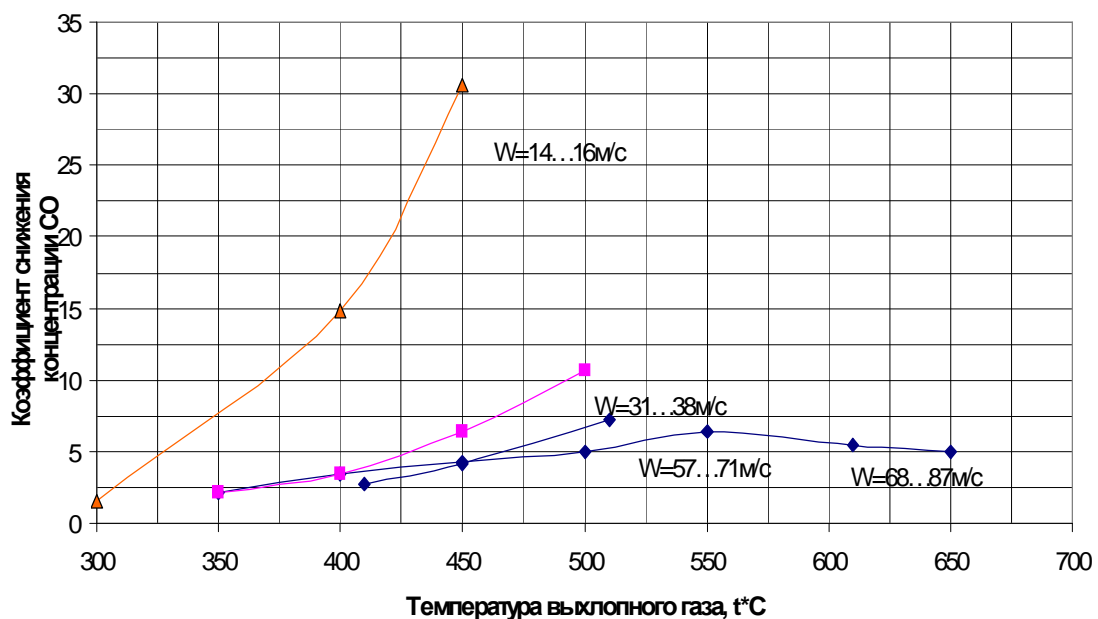


Рис. 4. Эффективность нейтрализации СО от температуры и скорости выхлопного газа

довой установке экспериментальные исследования каталитических нейтрализаторов CO , изготовленных по автомобильной технологии, на стендовой установке СНТК в диапазоне температур выхлопных газов ГТУ 300...500 °С показали их высокую эффективность.

На основании анализа выполненных исследований для ГТУ предлагается новая система низкоэмиссионного сжигания топливного газа, где обеспечивается разделение функций снижения выбросов вредных веществ: NO_x – в малоэмиссионной камере сгорания и CO – в простых каталитических нейтрализаторах автомобильного типа, устанавливаемых в выхлопной системе. За счет этого существенно упрощается конструкция двигателя, системы управления ГТУ, повышается его эксплуатационная технологичность и снижаются затраты.

Конструкция системы низкоэмиссионного горения в ГТУ

Система низкоэмиссионного сжигания топливного газа в ГТУ включает: кольцевую МКС с горелками предварительного гомогенного смешения топлива с воздухом с двухконтурной подачей топлива (дежурное и основ-

ное) и каталитический нейтрализатор оксида углерода, установленный в выхлопном тракте ГТУ за свободной турбиной (рис. 5). На рис. 5 схематично представлены: регулируемый ВНА 1; компрессор 2; кольцевая КС 3 с двухконтурной подачей топлива (дежурное и основное) с горелками с предварительным смешения топлива с воздухом, регулируемую по специальной программе; турбина 4; свободная турбина 5; выхлопное устройство 6, состоящее из осерадиального кольцевого поворотного диффузора и газосборника; КН оксида углерода 7, установленный за свободной турбиной.

Конструкция КН показана на рис. 6. Нейтрализатор выполнен в кольцевом канале выхлопного устройстве ГТД за свободной турбиной, образованном двумя оболочками 1 - наружной и внутренней, связанными между собой ребрами 2, и представляет из себя несколько съемных сегментов 3, установленных в поперечном сечении канала, с окнами, в которых монтируются каталитические элементы цилиндрической или иной формы 4, дающей минимальное загромождение проходного сечения выхлопного канала. Каталитические элементы выполнены по автомобильной технологии.

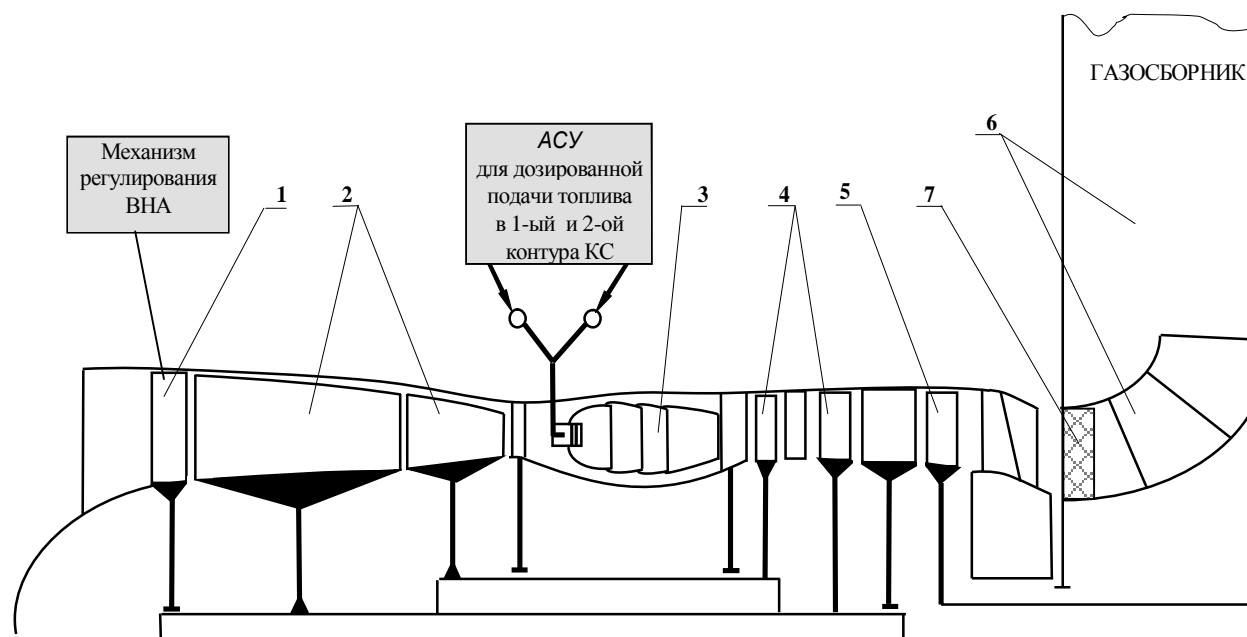


Рис. 5. Принципиальная схема ГТУ с системой низкоэмиссионного горения

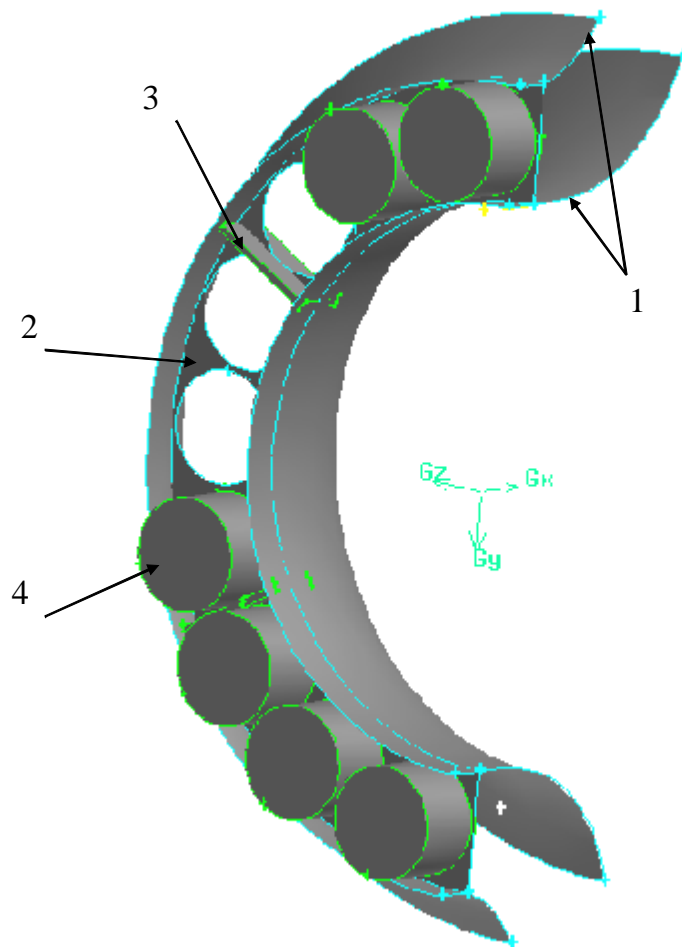


Рис. 6. Каталитический нейтрализатор окислов углерода

Работа ГТУ с системой низкоэмиссионного сжигания топливного газа

Рассмотрим работу системы низкоэмиссионного сжигания топлива на примере эксплуатации двигателя НК-38СТ. После выхода двигателя на минимальный рабочий режим, что составляет 0,7 номинала, по заданной программе производится регулировка расхода топлива в дежурную зону КС для уменьшения эмиссии NO_x до требуемых значений (рис. 2). При этом ухудшается эффективность горения основного топлива и образуется значительное количество оксида углерода. Регулирование дежурного контура по эмиссии NO_x продолжается вплоть до максимального режима работы двигателя. Для получения минимальных выбросов оксидов азо-

та на максимальном режиме работы двигателя требуется высокое качество предварительного смешения основного топлива с воздухом.

Образующийся при горении в камере на низких режимах оксид углерода в выхлопном газе дожигается (окисляется) на каталитической поверхности нейтрализатора. На режимах близких к номинальному снижение CO происходит в основном за счет интенсификации горения в КС. Эффективность КН определяется уровнем температуры выхлопного газа и каталитическими свойствами металлов, используемых в нейтрализаторе. Для ГТУ НК-38СТ выполнен расчет температуры выхлопного газа и возможное снижение выброса CO в диапазоне режимов 0,5...1,2 номинала и температур окружающей среды от $+45^{\circ}C$ до $-50^{\circ}C$ (рис. 7 и 8).

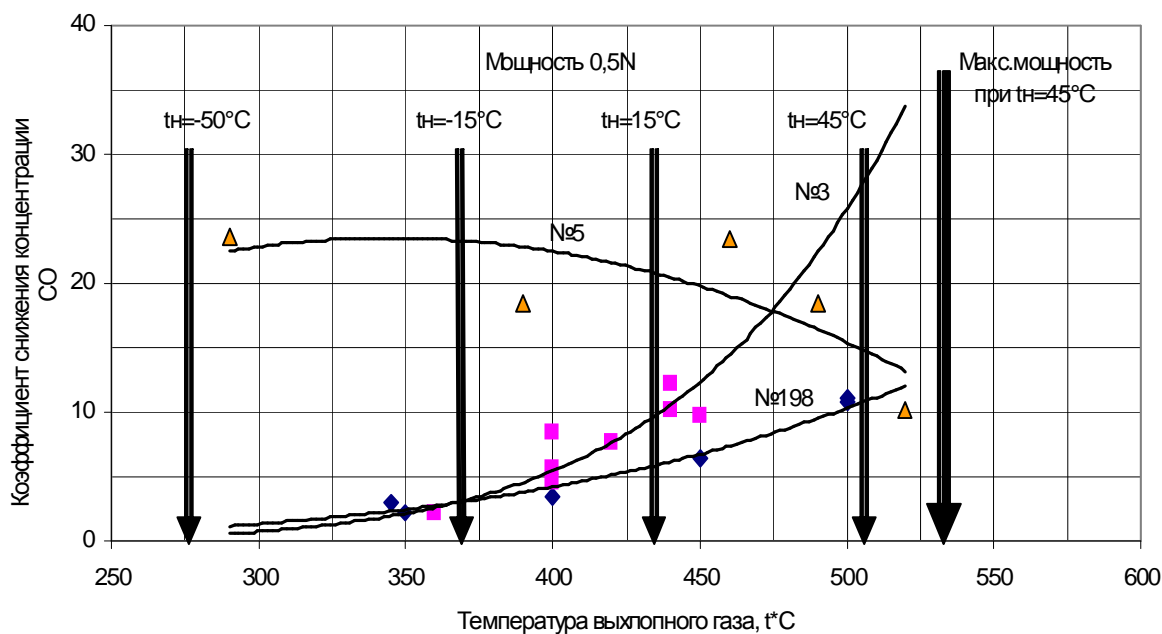


Рис. 7. Диапазон изменения температуры выхлопного газа при работе двигателя НК-38СТ и эффективность исследованных нейтрализаторов

Возможность промышленного применения каталитических нейтрализаторов в системах низкоэмиссионного горения ГТУ

В условиях эксплуатации ГТУ анализируется целесообразность применения КН для улучшения эмиссионных характеристик установки.

Если ставится задача полного (99% дожигания оксида углерода), то требуются автономные крупногабаритные установки каталитической очистки, но на практике часто бывает необходимость снизить только пиковые выбросы CO для улучшения экологического состояния среды.

Для ГТУ максимальные выбросы CO имеют место на переходных режимах (от запуска до начала рабочего диапазона 0,5...0,7 номинала) и в начале рабочего диапазона до $\approx 0,8$ номинального, которые увеличиваются при низкой температуре окружающей среды t_n .

Как показывает оценочный расчет, автомобильный КН со степенью очистки 80...90% позволяет на порядок снизить выброс оксида углерода, при этом за счет гидравлической потерь в каналах нейтрализато-

ра (2...3%) эффективное КПД установки снижается не более, чем на 0,15%.

Использование некоторых типов достаточно дешевых каталитических элементов для нейтрализации не всегда могут обеспечить, например, требование отраслевого стандарта Газпрома ОТС 2-3.5-038-2005, нормирующего эмиссию газотурбинных двигателей – приводов в ГПА. Для обеспечения достаточной степени очистки выхлопного газа КН требуется, чтобы температура газа была не ниже $400^\circ C$, что реализуется только в высоконапряженных газотурбинных установках с $p_k > 20$ при положительных температурах окружающей среды. С понижением температуры воздуха окружающей среды эффективности КН может оказаться недостаточной даже для высоконапряженных ГТУ.

Влияние t_n на эмиссию CO показано на примере стендовых испытаний ГТУ НК-38СТ. На рис. 8 представлены экспериментальные зависимости концентрации CO , приведенные к 15% O_2 , от температуры выхлопного газа перед свободной турбиной СТ для двух температур окружающей среды: $t_n = -3^\circ C$ (кривая 1) и $t_n = +13^\circ C$ (кривая 2). Видно, что с понижением температуры воз-

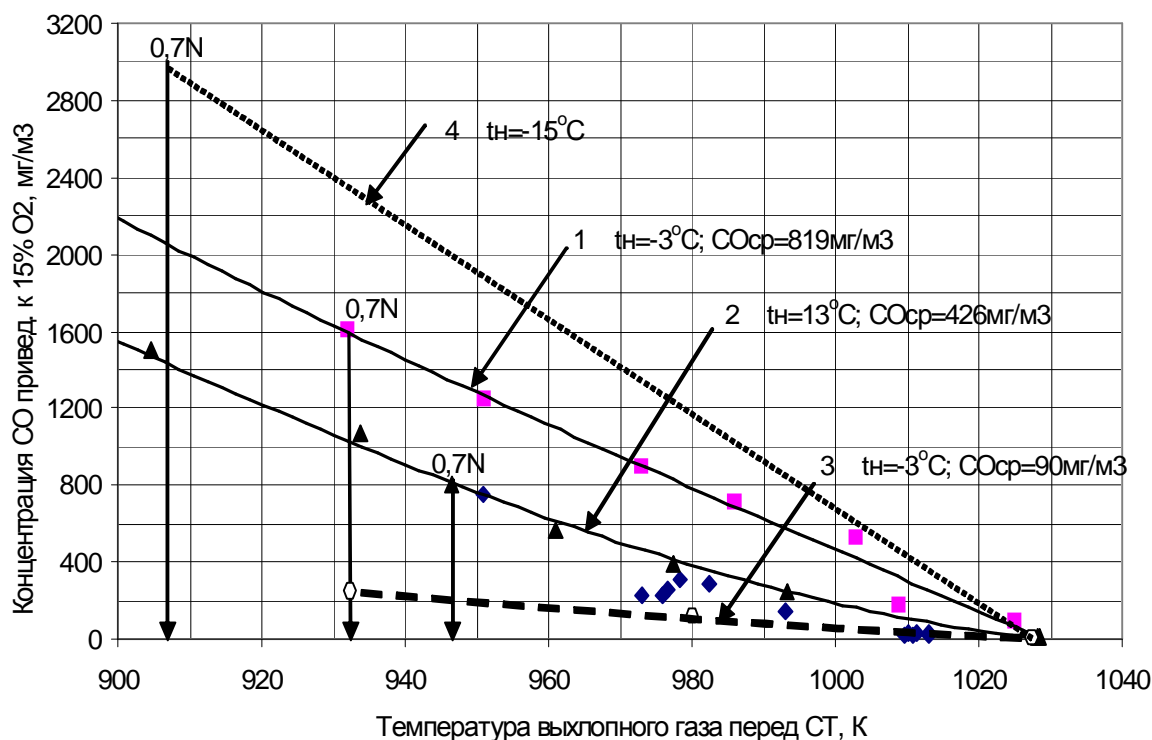


Рис. 8. Изменение эмиссии CO от режима двигателя и температуры окружающей среды

духа t_n на 16°C средняя концентрация CO увеличилась с 426 до 819 мг/м³. Эмиссия окиси углерода на этих испытаниях не соответствует норме отраслевого стандарта Газпрома для ГТУ НК-38СТ. Расчет показывает, что при использовании одного из исследованных КН средняя эмиссия CO ГТУ при работе в условиях $t_n = -3^\circ\text{C}$ снижается до 90 мг/м³ (кривая 3) и будет удовлетворять отраслевым нормам. Однако, при дальнейшем снижении температуры воздуха окружающей среды до -15°C эмиссия CO еще возрастет (кривая 4), а режим 0,7 номинала будет реализован при более низкой температуре выхлопного газа.

Другой исследованный КН в наибольшей степени отвечает этим условиям, он более эффективно снижает выбросы CO при отрицательных температурах окружающего

воздуха и, следовательно, расширяет класс ГТУ по степени сжатия воздуха в компрессоре, в которых целесообразно применять КН автомобильного типа, в меньшую сторону.

Окончательное решение по выбору оптимального варианта должно быть принято после испытаний натурного образца КН и экономического обоснования.

Список литературы

1. Постников А. М. Снижение оксидов азота в выхлопных газах ГТУ. - Самара: Самарский научный центр РАН, 2002. - 286 с.
2. Гриценко Е. А., Данильченко В. П., Лукачев С. В., Резник В. Е., Цыбизов Ю. И. Конвертирование авиационных ГТД в газотурбинные установки наземного применения. - Самара: Самарский научный центр РАН, 2004. - 266 с.