

чего процесса, включая эмиссионные характеристики. Возможности глубокого анализа влияния различных факторов на рабочий процесс узлов способствуют повышению эффективности двигателя в целом. Известно также, что отношение стоимостей численного и натурного экспериментов в общем случае составляет около 100.

На основании вышесказанного можно утверждать, что использование численных методов исследований рабочего процесса узлов ГТД и ГТУ в дополнение к натурным экспериментам позволяет значительно снизить суммарную стоимость работ по проектированию и доводке изделия до начала его серийного производства.

УДК 621.438.577.4

ТЕХНИЧЕСКИЕ РЕШЕНИЯ ПО ОПТИМИЗАЦИИ ЭКОЛОГИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК ПАРОГАЗОТУРБИННОЙ УСТАНОВКИ

Васильев В.И., Постников А.М., Ярославцев В.Г., Ануров Ю.М.,
Федорченко Д.Г.

*ОАО СНТК им. Н.Д.Кузнецова, г. Самара
«Энергомаш ЮК.», г. Санкт-Петербург*

Для снижения эмиссии вредных веществ обычно организуют горение предварительно перемешанной (гомогенной) топливовоздушной смеси (ТВС) в узком диапазоне температуры пламени $T_{пл} = 1750 \dots 1850 \text{ K}$, где генерация оксидов азота NO_x , монооксида углерода CO и несгоревших углеводородов CH достаточно низка. Температура пламени и, следовательно, концентрации вредных веществ NO_x , CO , CH зависят от коэффициента избытка воздуха α предварительно перемешанной топливовоздушной смеси в первичной зоне горения. При традиционной системе регулирования ГТУ коэффициент α в зоне горения существенно изменяется с изменением режима работы двигателя. При значительном уменьшении мощности двигателя ТВС обедняется (коэффициент α увеличивается) и температура пламени настолько снижается, что горение становится неэффективным, - уменьшается полнота сгорания топлива.

увеличиваются концентрации CO и CH , в предельном случае пламя может срываться.

Известны различные способы поддержания оптимальной температуры пламени при изменении режима работы ГТУ. Например, регулированием расхода воздуха в камеру сгорания [1] и изменением площади горения путём последовательного подключения в работу нескольких топливных контуров [2]. Указанные способы применимы при использовании регулируемого входного направляющего аппарата, клапанов перепуска воздуха из компрессора, нескольких топливных контуров (коллекторов, горелок, дозаторов), управляемых процессорами, что существенно усложняет систему регулирования двигателя.

Эффективным способом снижения температуры пламени $T_{пл}$ и, соответственно, NO_x является впрыск пара в камеру сгорания [3]. Известно, что в передовых парогазотурбинных установках впрыск пара непосредственно в двигатель преследует две цели:

повышение мощности установки и её КПД («энергетический» впрыск);

- снижение выбросов оксида азота NO_x («экологический» впрыск).

Так на ГТУ *LM-5000* фирмы «General Electric» (США) впрыск пара в компрессор, камеру сгорания и турбину обеспечил:

- снижение концентрации NO_x с 225 до 25 ppm,

- увеличение мощности с 32,5 до 49,5 МВт,

- прирост КПД с 36 до 43%.

При этом выбросы CO не превышают значения 60 ppm, нормы для *LM-5000* [4].

Для повышения эффективности «энергетического» впрыска пар необходимо подавать в камеру сгорания, т.е. перед турбиной высокого давления.

Однако, как показывают расчёты и опыт фирмы «General Electric» впрыск пара через форсунки камеры в количестве $\frac{G_{пара}}{G_{топлива}} > 2$ приводит

к недопустимому снижению $T_{пл}$, росту выброса CO , падению полноты сгорания и погасанию пламени.

Для решения этой проблемы, обеспечения при всех условиях эксплуатации установки в диапазоне заданных режимов её работы низкого

уровня эмиссии CO , CH , NO_x , устойчивой работы камеры сгорания, повышенной мощности и КПД, авторы статьи для ПГТУ, в которой

$$\frac{G_{\text{параКС}}}{G_{\text{топлива}}} > 4 \text{ предлагают:}$$

пар, подаваемый в КС, разделить на две части. Первая часть, необходимая и достаточная для снижения NO_x , впрыскивается в первичную зону КС (экологический впрыск «первичного» пара). Вторая – во вторичную зону (энергетический впрыск «вторичного» пара);

«первичный» пар предварительно перемешивается с топливом в специальном смесителе, а «вторичный» пар – отбирается из паровой магистрали до смесителя.

Тем самым обеспечивается возможность организации горения однородной парогазовой смеси с оптимальной температурой пламени.

Регулирование расхода пара в первичную зону камеры можно осуществлять по сигналам датчиков концентраций NO_x , CO с пробоотборника, устанавливаемого на выхлопе установки.

Если NO_x больше установленной нормы, перепуск пара во вторичную зону уменьшается. Если CO больше нормы – перепуск пара увеличивается. При уменьшении режима работы установки по мощности расход пара в смеситель и соответственно в первичную зону КС уменьшается увеличением его перепуска во вторичную зону. При увеличении режима, наоборот, расход пара в первичную зону увеличивается.

Предлагаемая схема подачи пара в камеру сгорания приведена на рис.1. Пар по трубопроводу 1 через управляемые дроссельные краны 3 и 5 и форсунки 16 и 17 подается в первичную зону 15 и вторичную зону 11 КС 14.

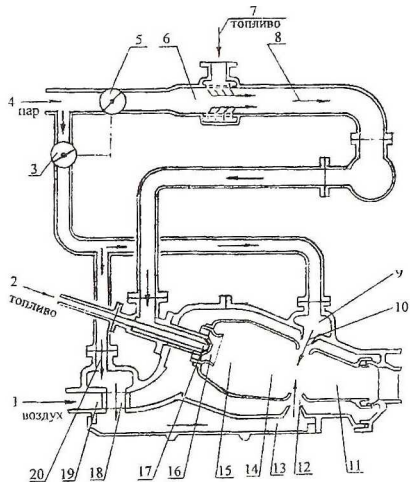


Рис.1. Схема подачи пара в камеру сгорания

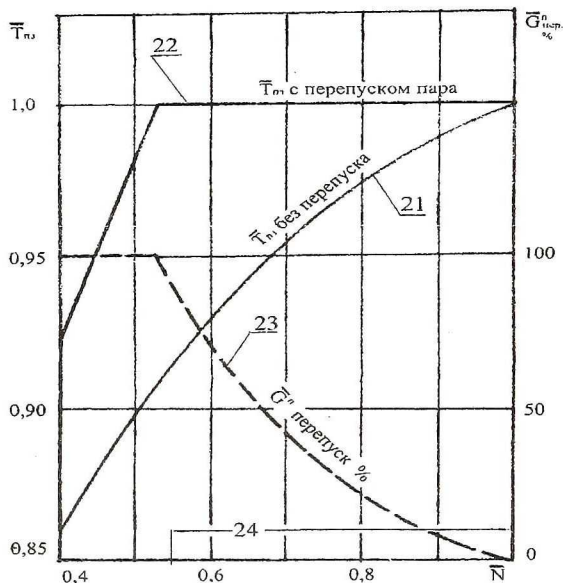


Рис. 2. Расчётные зависимости температуры горения в первичной зоне камеры от режима работы установки по относительной мощности без перепуска (21) и с перепуском (22) пара во вторичную зону

пазоне 24 режимов работы ПГТУ.

На рис. 3 представлены расчётные зависимости концентраций NO_x и CO от режима работы установки без перепуска (25 и 26) и с перепуском (27 и 28) пара во вторичную зону КС. Расчёт выполнен из условия обеспечения на номинальном режиме работы ПГТУ ($\bar{N} = 1$) концентраций $NO_x = 50 \text{ мг/нм}^3$ и $CO = 50 \text{ мг/нм}^3$ с использованием результатов обобщения экологических характеристик ГТУ НК-36СТ и НК-37 в различных атмосферных условиях (t_H и P_H) на разных режимах работы ГТУ по температуре пламени в основной первичной зоне горения.

Из сравнения расчётных зависимостей NO_x , $CO = f(\bar{N})$ следует, что, например, на режиме $\bar{N} = 0,6$ концентрация CO при перепуске пара во вторичную зону уменьшается в 3 раза (с 150 до 50 мг/нм^3). Концентрация NO_x при этом возрастает с 20 до 50 мг/нм^3 , но не превышает допустимую норму, обеспечиваемую на номинальном режиме.

На рис.2 приведены расчётные зависимости температуры горения в первичной зоне камеры от режима работы установки по относительной мощности без перепуска 21 и с перепуском 22 пара во вторичную зону по зависимости 23. Из результатов расчёта следует, что, выбирая перепуск пара по зависимости типа 23 можно обеспечить постоянство оптимальной температуры пламени 22 в эксплуатационном диа-

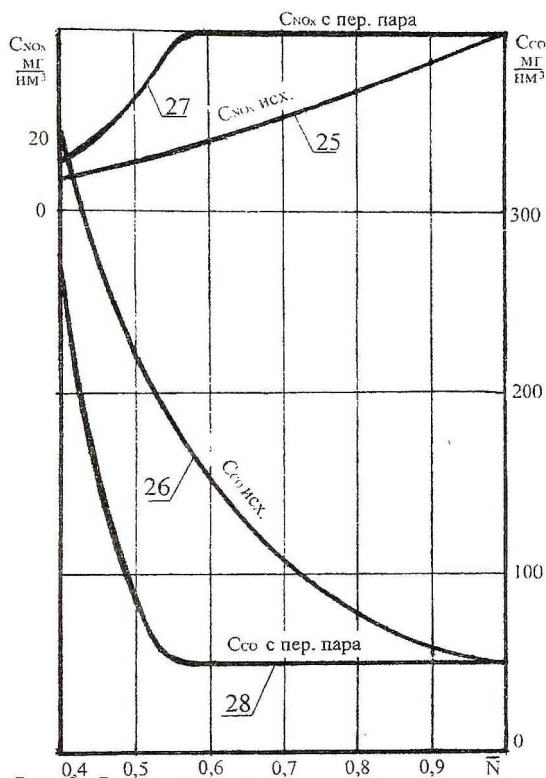


Рис. 3. Расчётные зависимости концентраций NO_x и CO от режима работы установки

сельским краном. При снижении режима работы установки такое соединение форсунок первичной и вторичной зон позволяет обеспечивать перепуск пара во вторичную зону и поддерживать оптимальную температуру пламени в первичной зоне, снизить тем самым концентрацию CO и повысить эффективность горения на дроссельных режимах.

Установка смесителя пара с топливом перед форсунками первичной зоны обеспечивает равномерное поле температур, исключая более горячие и более холодные участки в зоне горения, в которых могли бы генерироваться NO_x и CO соответственно. Для улучшения характеристик запуска камеры сгорания форсунки первичной зоны выполнены двухконтурными. В первый контур форсунок подаётся топливо без пара. Основной расход топлива, перемешенного с паром, подаётся во второй контур.

Для реализации указанного технического решения применительно к перспективной парогазотурбинной установке ПГТУ-135 ($N = 135 \text{ MВт}$, $\pi_k = 45$) разработана малоэмиссионная камера сгорания со специальным устройством и форсунками впрыска пара (рис.4).

В предложенной конструкции камеры сгорания паротопливные форсунки первичной зоны соединены по паровой магистрали до смесителя с паровыми форсунками вторичной зоны трубопроводом с управляемым дрос-

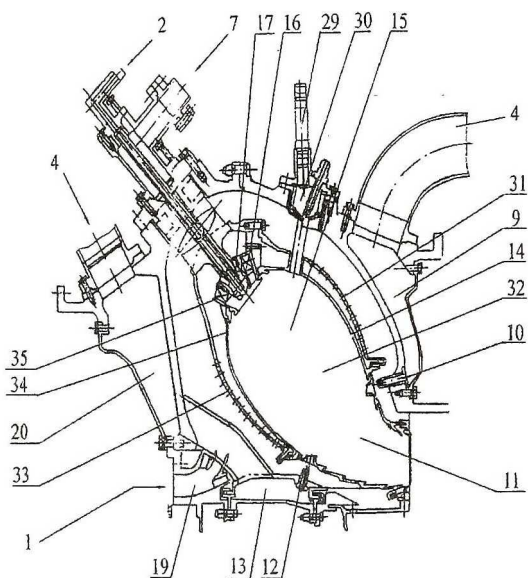


Рис. 4. Малоэмиссионная камера сгорания со специальным устройством и форсунками впрыска пара

13 и 20 коллекторы пара обеспечивают равномерную подачу пара по форсункам 10 и 12. Внутренний коллектор выполнен из двух частей 13 и 20, соединённых между собой полыми рёбрами 18, расположенными в воздушном тракте диффузора. В смесителе 6 пар 4 перемешивается с топливом 7, паротопливная смесь из смесителя 6 поступает в коллектор, отсюда распределяется по форсункам 17 основного (второго) контура. В первый (дежурный) контур форсунок 19 поступает топливо 2 без пара, обеспечивая розжиг камеры и запуск установки.

Таким образом, в предлагаемой камере сгорания предусмотрены устройства (коллектора, форсунки, дроссельные краны, смеситель пара с топливом), обеспечивающие регулирование расхода пара в первичную зону горения. Это обеспечивает оптимизацию температуры пламени и снижает тем самым выбросы CO на дроссельных режимах при сохранении минимальных выбросов NO_x , повышенной мощности и КПД в эксплуатационном диапазоне режимов и условий работы установки.

Камера сгорания (рис.1, 4) содержит жаровую трубу 14 с первичной зоной 15 горения и вторичную зону 11 смешения. В первичную зону 15 через диффузор 19 и через горелки 16 поступает воздух 1, топливо 2 и пар 4. Во вторичную зону 11 через наружные 10 и внутренние 12 форсунки впрыскивается пар.

Распределение расхода пара в первичную и вторичную зоны регулируется дроссельными кранами 3 и 5. Наружный 9 и внутренние

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ.

1. Способ регулирования топливоподачи в ГТД. Патент США № 53035542 F02G9/26 от 16.11.1992г.
2. Постников А.М., Ярославцев В.Г. Способ регулирования подачи топлива в ГТД. Патент Российской Федерации № 2162953, F02G9/26 от 10.02.2001г. с приоритетом от 12.03.1997г.
3. Постников А.М. Снижение оксидов азота в выхлопных газах ГТУ. - Самара: Издательство Самарского научного центра РАН. – 2002 – 286 с.
4. Колп Д.А, Мёллер Д.И. Ввод в эксплуатацию первой в мире газотурбинной установки полного цикла STIG на базе газогенератора LM-5000. Современное машиностроение. Серия А. 1989, №1.

УДК 621.452.3.034

ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ ЦЕНТРАЛЬНОГО И ПЕРИФЕРИЙНОГО ПОТОКОВ ВОЗДУХА НА РАБОТУ СТРУЙНОЙ ПНЕВМАТИЧЕСКОЙ ФОРСУНКИ

Васильев А.Ю., Свириденков А.А., Ягодкин В.И.

Центральный институт авиационного моторостроения, г. Москва

Увеличение давления воздуха в ГТД при ограничении давления подачи топлива привело к модификации систем распыливания для обеспечения требуемых эмиссионных характеристик на всех режимах работы двигателя. В низконапорных системах подачи топлива возросла роль аэродинамики распыливания. Эффективность комбинированных форсунок, как оказалось, в основном зависит от правильного сочетания характеристик потоков топлива и воздуха. Это показано в работах по улучшению различных типов форсунок как центробежных [1], так и струйных пневматических. Предложенные модификации систем распыливания в первую очередь имели целью обеспечение условий запуска и малого газа при малом перепаде давлений топлива и воздуха.

Задачей работы было исследование влияния центрального и периферийного потоков воздуха на работу струйной пневматической форсунки ЦИАМ с целью обеспечения высокого качества распыливания