

ТЕХНОЛОГИЯ МАЛОЭМИССИОННОГО ГОРЕНИЯ RQQL КАК НАПРАВЛЕНИЕ В ДОСТИЖЕНИИ ВЫСОКОЙ НАДЕЖНОСТИ СТАЦИОНАРНОГО ГАЗОТУРБИННОГО ДВИГАТЕЛЯ

© 2002 А. А. Иноземцев, В. В. Токарев

ОАО «Авиадвигатель», г. Пермь

Рассматривается применение технологии малоэмиссионного горения «богатое» горение – резкое разбавление – «бедное» горение для решения функциональных проблем, свойственных двигателям с камерами с горением «бедных» предварительно перемешанных топливовоздушных смесей. Показано, что при $NO_x = 150 \dots 100$ мг/м³ технология RQQL предпочтительнее, чем технология горения «бедных» предварительно перемешанных смесей.

1. Введение

Современный газотурбинный двигатель (ГТД) является сложным и ответственным техническим продуктом, который должен соответствовать большому перечню требований, входящих в параметрические, ресурсные и эксплуатационные показатели.

Снижение норм на эмиссии NO_x и CO обусловило разработку и применение в стационарных ГТД принципиально новых технологий организации горения и, соответственно, конструкций камер сгорания, осуществляющих эти технологии, и систем автоматического управления (САУ) малоэмиссионным горением в системе «камера сгорания – двигатель».

Новые технологии организации горения уменьшили на порядок эмиссию наиболее токсичного загрязнителя окружающей среды – окислов азота. Такое радикальное уменьшение концентрации NO_x стало возможным в результате организации горения «бедных» предварительно перемешанных топливовоздушных смесей с температурой пламени 1 800...1 900 К (температура погасания пламени – 1 550 К).

Низкие уровни эмиссии NO_x и CO требуют поддержания однородного состава смеси в зоне горения и строгого его контроля. Это – новая технология для конструкторов камер сгорания, что требует большого объема НИОКР. Обеспечить в зоне горения условия, необходимые для предотвращения образования высоких концентраций NO_x и CO при одновременном сохранении рабочих харак-

теристик ГТД, можно, используя стадийную подачу воздуха в камерах с изменяемой геометрией, а также стадийную подачу топлива в продольном или радиальном направлениях. Конструкции камер сгорания и процесс горения в них стали чрезвычайно рискованными, что отрицательно сказывается на надежности ГТД. В работе [1] дается обширный перечень новых проблем, которые характерны для ГТД с малоэмиссионной камерой сгорания (МЭКС). С описанием проблем «бедного» горения в малоэмиссионных камерах сгорания различных конструкций на стадии опытной доводки можно ознакомиться в публикациях их разработчиков [2, 3]. О ресурсных и эксплуатационных проблемах ГТД с МЭКС сообщается в зарубежных публикациях. Однако отсутствуют публикации о характере работы ГТД с малоэмиссионными камерами сгорания в составе ГПА на трассах Газпрома ($t_n = -50 \dots +40$ °С). Эта информация позволила бы определить конструкцию камеры, которая в наилучшей форме организует горение «бедной» предварительно перемешанной топливовоздушной смеси.

2. Обзор проблем малоэмиссионных камер сгорания

Основными проблемами ГТД, согласно многочисленным публикациям, являются «проскок» пламени и вибрационное горение. Спектр частот пульсаций давления воздуха широк: $f = 200 \dots 500$ Гц и 4 000...7 000 Гц. Сложная система регулирования обуславливает сбой в работе автоматики на переходных режимах, т. е. во время включения (выключе-

чения) групп горелок. Проблемой эксплуатации является неустойчивая работа ГТД с МЭКС при низких температурах воздуха.

Новые проблемы малоэмиссионной камеры сгорания придают первостепенную значимость работам по обеспечению высокой надежности ГТД в течение всего ресурса, который определяется в 25 000 часов и более. Надежность функционирования системы «камера сгорания - двигатель» в условиях обеспечения экологической совместимости ГТД с окружающей природной средой является новым условием в организации процесса горения. Проблему обеспечения надежности системы «камера сгорания – двигатель» необходимо решать, согласовывая с общим планом обеспечения технического уровня ГТД, поскольку цели и средства получения высокой надежности вступают в противоречие с задачей повышения других показателей технического совершенства ГТД.

Основным источником информации об уровне надежности обычно является статистика отказов в условиях широкой эксплуатации. Однако для конструктора МЭКС подобная информация о камере сгорания будет слишком запоздалой, поскольку конструкция уже выбрана. Поэтому крайне важно еще в ходе проектирования и доводки новой камеры сгорания (МЭКС) разработать стратегию по обеспечению ее будущей надежности в эксплуатации. Высокая надежность ГТД с низкой эмиссией NO_x и CO должны сочетаться с низкой себестоимостью изготовления ГТД, низкими стоимостными и временными затратами на обслуживание ГТД в эксплуатации.

3. Выбор технологии малоэмиссионного горения для ГТД ОАО «Авиадвигатель»

Основным потребителем стационарных ГТД в России является РАО «Газпром», использующий их для привода газоперекачивающих агрегатов (ГПА). Основной парк ГТД имеет $\eta_e = 25...30\%$ и большие концентрации NO_x и CO . Снижение концентрации NO_x на всех ГПА до уровня 150 мг/нм^3 в сочетании с увеличением η_e ГТД до $34...38\%$, уменьшающим количество сжигаемого топ-

лива, значительно уменьшит валовый выброс NO_x .

В ОАО «Авиадвигатель» осуществляется концепция поэтапного уменьшения эмиссии NO_x по мере всесторонней проверки надежности работы ГТД с малоэмиссионной камерой сгорания. На первом этапе выполняется требование ГОСТ 28775-90 на эмиссию $NO_x \leq 150 \text{ мг/нм}^3$. Проведя эксплуатационную проверку двигателя с МЭКС ($NO_x = 150 \text{ мг/нм}^3$) и НИОКР по усовершенствованию камеры сгорания, приступают к поэтапному уменьшению эмиссии NO_x до 100 и 80 мг/нм^3 . Такая концепция усовершенствования (развития) малоэмиссионной камеры сгорания, базирующаяся на проверенных в ходе промышленной эксплуатации и НИОКР материалах, является основой построения работ по обеспечению высокой надежности ГТД с малоэмиссионной камерой сгорания. Поэтапное усовершенствование малоэмиссионного горения, когда концентрация NO_x этапами уменьшается с 150 до 100 и 80 мг/нм^3 , позволит избежать возникновения в эксплуатации критических ситуаций в работоспособности ГТД.

Концепции поэтапного усовершенствования камеры сгорания в наибольшей степени с позиций надежности ГТД соответствует технология малоэмиссионного горения: «богатое» горение – резкое разбавление – «бедное» горение ($RQQL$).

Технология малоэмиссионного горения $RQQL$ формирует в камере сгорания три последовательно расположенных зоны горения. В первой зоне формируется горение «богатой» топливовоздушной смеси ($\alpha = 0,6...0,8$). Во второй зоне горения продукты неполного сгорания топлива из «богатой» зоны интенсивно смешиваются с большим количеством воздуха (зона резкого разбавления). Смешение продуктов неполного сгорания из «богатой» зоны с «холодным» воздухом понижает температуру и увеличивает коэффициент избытка воздуха в смеси, поступающей в зону «бедного» горения. В третьей зоне камеры происходит горение «бедной» топливовоздушной смеси ($\alpha = 2,2...3,0$), образовавшейся на выходе из зоны резкого разбавления.

Концентрация окислов азота в «богатой» зоне ограничивается недостатком кислорода и низкой температурой горения. Наблюдается уменьшение NO_x в результате действия радикалов несгоревших углеводородов. В зоне «бедного» горения концентрация NO_x ограничивается температурой смеси и временем пребывания. Основным источником образования NO_x – зона резкого разбавления, в которой возможно образование стехиометрических зон горения. Управление процессом смешения струй воздуха с продуктами сгорания позволяет изменить концентрацию NO_x . На рис. 1 показано влияние способа подачи струй воздуха на концентрацию NO_x и CO .

Ключевыми процессами технологии $RQQL$, определяющими минимальный уровень эмиссии NO_x , являются внутрикамерная аэродинамика и химические процессы, протекающие в «богатой» и «бедной» зонах горения.

На рис. 2 показаны уровни эмиссий NO_x и CO , достигнутые в экспериментальной камере сгорания для ГТУ-12П и ГТУ-16П. Показанные на графике концентрации NO_x и CO получены в камере сгорания с одним топлив-

ным коллектором (дозатором САУ) и без перепуска воздуха из камеры сгорания для управления горением в ней. Ведутся работы по уменьшению эмиссии NO_x в диапазоне $\alpha = 3,4 \dots 2,8$ до значения 40 ppm.

4. Характеристики ПС-90ГП1 с технологией горения $RQQL$

В ГТД с $\pi_x \leq 20$ при условии гарантированного уровня $NO_x = 80$ или 100 мг/нм³, технология $RQQL$ является целесообразной альтернативой технологии горения «бедной» предварительно перемешанной топливно-воздушной смеси. Камеры сгорания $RQQL$ обладают превосходными эксплуатационными качествами, решая все проблемы камер сгорания с «бедным» горением [3]. Камера сгорания $RQQL$ не имеет проблем с «проскоком пламени» и самовоспламенением топлива в смесительном модуле, что возможно в камере с предварительным смешением. Конструкция камеры сгорания и система автоматического управления рабочим процессом в камере сгорания просты. В камере сгорания отсутствует сложный процесс регулирования геометрии. Число форсунок равно числу жаровых труб. Применяется один топливный

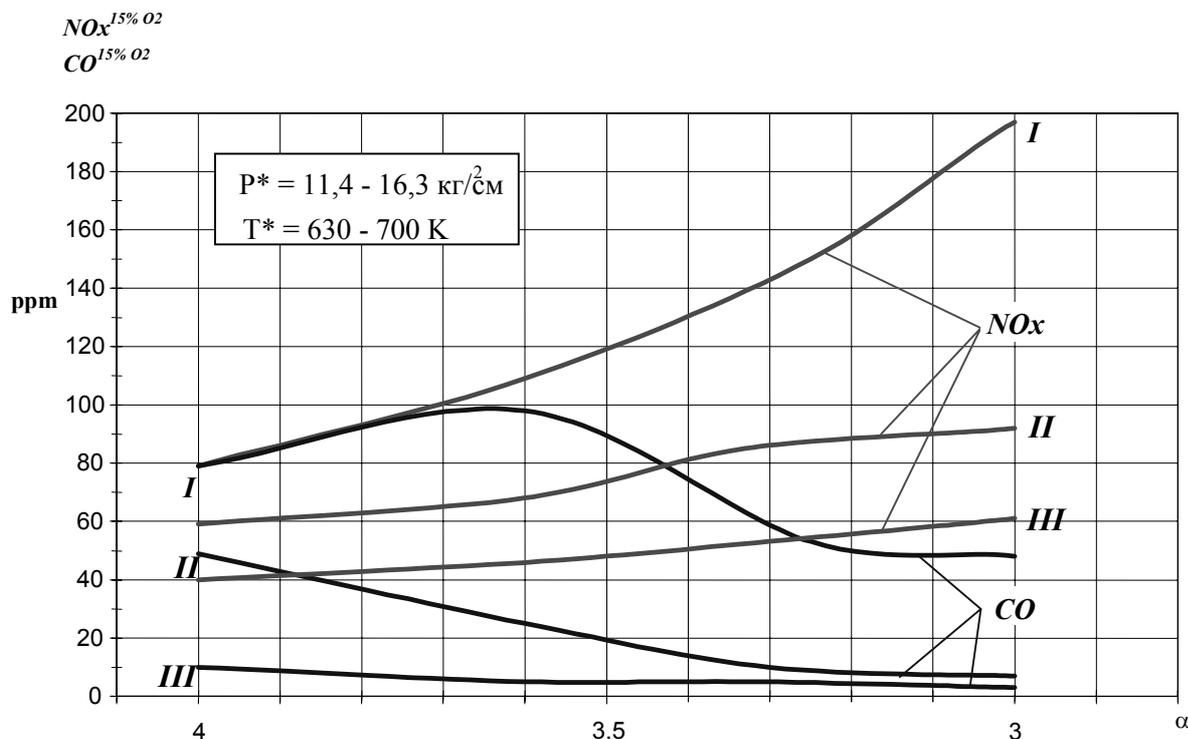


Рис. 1. Влияние смешения в зоне резкого разбавления на эмиссию NO_x

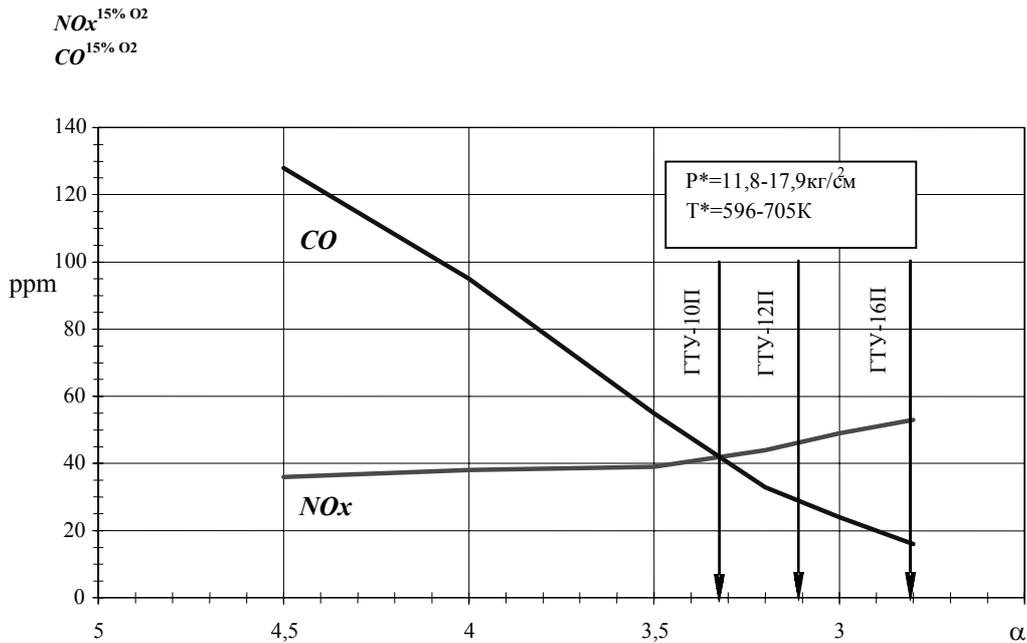


Рис. 2. Изменение концентрации NO_x и CO по коэффициенту избытка воздуха в камере

коллектор для подвода топлива к форсункам и один дозатор в САУ. Такая камера сгорания не требует настройки режима горения в эксплуатации. Для работы камеры сгорания на дроссельных режимах мощности не требуется перепуска воздуха из компрессора или камеры сгорания или регулирования компрессора, а это означает, что коэффициент полезного действия ГТД не ухудшается.

Камера сгорания *RQQL* не увеличивает стоимость производства ГТД, как это происходит в случае с камерами с горением «бедных» топливовоздушных смесей [3]. Простые конструкции камеры сгорания и САУ обеспечивают низкие затраты на техническое обслуживание ГТД в эксплуатации.

Первым промышленным ГТУ ОАО «Авиадвигатель» для Газпрома стал ПС-90ГП1 (ГТУ-12), прошедший МВИ в 1995 году. Его экологическая концепция была основана на умеренном использовании неапробированных технических решений для выполнения требований надежности за ресурс 25 000 часов и экологии при минимальных затратах на изготовление и эксплуатацию двигателя. Эмиссия NO_x и CO первых ГТУ-12П составила, соответственно, 125 мг/нм³ и 15 мг/нм³ (15 % O_2). Обеспечение надежности системы «камера сгорания – двигатель» с $NO_x = 150$ мг/нм³ в целях создания первых

камер сгорания ГТУ-12П стояло на первом месте перед требованиями экологии.

После получения информации о надежности ГТУ с первыми камерами сгорания *RQQL* приступили к поэтапному применению в камерах усовершенствований, уменьшающих эмиссию NO_x (рис. 3).

Экспериментальные стендовые испытания ГТУ-12П и их эксплуатация показали полную устойчивость горения во всем диапазоне изменения параметров двигателя. Не зафиксированы режимы вибрационного горения при стендовых испытаниях с измерением пульсаций давления газа в камере, а также работой камеры сгорания при эксплуатации в составе ГПА. На 30 апреля 2002 года в эксплуатации находятся 15 ГТУ 12П с наработкой от 2 500 до 27 500 часов с общей наработкой 140 000 часов. На деталях камеры сгорания отсутствуют повреждения, характерные для вибрационного горения. Тепловое состояние жаровых труб (сплав ВХ-4А) соответствует ресурсу двигателя. В жаровых трубах при температуре стенок не более 850 °С отсутствуют повреждения в виде короблений стенок, прогаров и т. д. Стабильное температурное поле на выходе из камеры сгорания с параметрами $\Theta_{pad} \leq 1,10$ и $\Theta_{max} = 1,35$ обеспечило ресурс лопаточной части турбины.

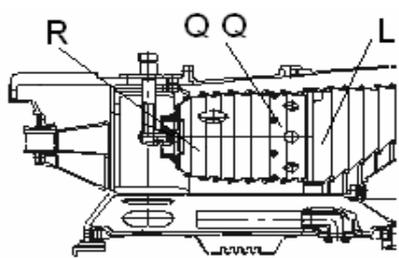
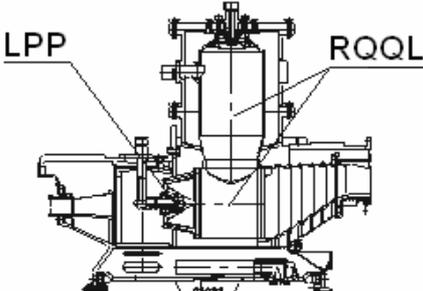
Эмиссия	Технология горения	Конфигурация камеры сгорания
$NO_x = 60 \dots 40 \text{ ppm}$ $CO < 30 \text{ ppm}$	Камера сгорания с трехстадийной технологией горения: «богатое» горение – резкое разбавление – «бедное» горение (RQQL)	
$NO_x < 40 \text{ ppm}$ $CO < 50 \text{ ppm}$	Комбинированное горение: «богатое» горение – резкое разбавление – «бедное» горение, переходящее в «бедное» горение предварительно перемешанной смеси (RQQL+LP)	

Рис. 3. Направления развития технологии малоэмиссионного горения для ГТД ОАО «Авиадвигатель»

Камера сгорания RQQL ГТУ-12П устойчиво разжигается в проверенном диапазоне атмосферных температур от -35 до $+30$ °С.

Проблемой камеры сгорания с технологией RQQL является возможность наличия большого количества углерода в выхлопных газах. В очень «богатых» смесях в процессе термического разложения природного газа в отсутствие окислителя образуется значительное количество углерода в твердой фазе.

В процессе доводочных работ в некоторых вариантах камер наблюдались значительные отложения углерода на стенках жаровой трубы в «богатой» зоне горения высотой до 10...12 мм. Надежность работы ГТД требует исключения отложений углерода на стенках камеры, а соответствие экологическим нормам – незначительную концентрацию его в выхлопных газах, обеспечивающую «прозрачность» выхлопной струи. Камеры сгорания, применяемые в ГТД ОАО «Авиадвигатель», не имеют отложений углерода на стенках жаровых труб. Выхлоп из двигателя – «прозрачный».

При конструировании камеры сгорания с технологией RQQL требуется обеспечить выполнение противоречивых требований на эмиссию NO_x , CO , углерода, радиальную и окружную неравномерности температуры газа на выходе из камеры и т. д. Компромисс

в удовлетворении перечисленным характеристикам достигается в значительной степени конструкцией смесительного модуля в зоне резкого разбавления. Проблема компромисса в характеристиках камеры сгорания успешно решена в камерах сгорания ГТД ОАО «Авиадвигатель».

Эксплуатация с 1995 года ГТУ-12П показала высокую надежность работы системы «Камера сгорания – Двигатель», которая обеспечила наработку 27 500 часов лидерного ГТУ-12П и 7 000...19 170 часов десяти двигателей.

Камера сгорания ГТУ-12П является унифицированной камерой сгорания для ГТУ-10П ($N_e = 10$ МВт) и ГТУ-16П ($N_e = 16$ МВт).

Технология RQQL применена в камере сгорания ГТУ-4П ($\pi_k = 7,3$, $T_T = 1124$ К), обеспечив устойчивые значения эмиссий $NO_x = 50$ мг/нм³ и $CO = 50$ мг/нм³ при 15 % O_2 , что зафиксировано экологическим сертификатом соответствия ГОСТу 29328-92.

Направления развития технологий малоэмиссионного горения для газотурбинных двигателей, создаваемых в ОАО «Авиадвигатель», показаны на рис. 3. Первое направление – это технология «богатое» горение – резкое разбавление – «бедное» горение – предназначается для достижения уровня

$NO_x = 60 \dots 40$ ppm в двигателях с $\pi_k \leq 20$. Для более низких уровней эмиссии NO_x и двигателей с $\pi_k > 20$ предназначено комбинированное горение, сочетающее в себе две технологии. Процесс горения в камере начинается в режиме *RQQL* с выходом на режим $0,85 N_e$. Далее по мощности режим горения переводится в горение предварительно перемешанной «бедной» топливовоздушной смеси (LP). «Богатая» зона *RQQL* используется для образования пилотного пламени. Комбинированная технология горения, состоящая из технологии *RQQL* и переходящей в горение «бедной» смеси (LP), позволяет снизить эмиссию NO_x до 35 ppm. Для управления процессом комбинированного горения требуется один топливный дозатор в САУ и распределительный кран для двух коллекторов камеры сгорания.

Комбинированное горение и конструкция камеры сгорания развивают концепцию поэтапного усовершенствования с позиций обеспечения высокой надежности стационарных ГТД, создаваемых в ОАО «Авиадвигатель».

Список литературы

1. Романов В. И., Равич А. В. и др. Совершенствование экологических характеристик ГТД НПП «Машпроект» // Известия Академии инженерных наук Украины. Вып. № 1, 1999.
2. Вестник СГАУ. Сер.: Процессы горения, теплообмена и экология тепловых двигателей. Вып. № 2, 3. Самара, 1999- 2000.
3. Фармер Р. Альтернативные решения по «сухой» малоэмиссионной камере сгорания с низким NO_x для ГТУ, разработанных на базе авиационных двигателей, и для малых ГТУ // «Gas Turbine World», июль-август 1994. С. 37.

RQQL LOW EMISSION COMBUSTION PROCESS AS A WAY OF ACHIEVING HIGH RELIABILITY OF STATIONARY GAS TURBINE ENGINE

© 2002 A. A. Inozemtsev, V. V. Tokarev

Corporation «Aircraft Engine», Perm

The article covers the process of low emission combustion “Rich Burn - Quick Quench - Lean Burn” that is applied to settle functional problems typical for engines equipped with combustors with lean premixed fuel/air mixtures. The article shows that *RQQL* process with $NO_x = 150 \dots 100$ mg/nm³ is more preferable compared to the process of lean premixed fuel/air mixtures burning.