Информация о выполнении третьего Этапа проекта «Исследование способов воздействия на образование оксидов азота с целью их подавления при сжигании природного газа в камерах сгорания перспективных газовых турбин», выполняемого в рамках работы с РНФ Соглашение № 17-19-01563 в 2017 году

1. **Проведена оценка рабочего диапазона малоэмиссионного сжигания для перспективных газотурбинных установок с высокой начальной температурой газов(>1500С) перед турбиной**

Область работы ГТУ лежит в диапазоне температуры наружного воздуха от -45°С до +45°С при этом характеристики на входе в камеру сгорания существенно изменяются.

Стабильное малоэмиссионное сжигание топлива возможно при сжигании хорошо перемешанной топливовоздушной смеси (ТВС) в узком диапазоне температуры пламени, ограниченной с одной стороны бедным срывом и неустойчивым горением, а с другой стороны ростом термических оксидов азота. Обе границы хорошо изучены и известны - нижняя из них варьируется в близи температуры ~ 1300°С, а верхняя ~ 1500°С, в зависимости от качества перемешивания ТВС и условий стабилизации пламени, связанных с конструкцией горелочного устройства КС, т.е. составляет ~ 200°С. Для удовлетворения требований по малоэмиссионной работе КС необходимо обеспечить температуру пламени, удовлетворяющую указанному температурному диапазону от 50 до 100% нагрузки при изменении температуры наружного воздуха от -45 до + 45°С. Даже поверхностный анализ характеристик камер сгорания показывает, что диапазон изменения температуры газов на выходе (косвенно температуры пламени) составляет ~ 500°С, а не допустимые 200°С. Таким образом, обеспечить малоэмиссионное сжигание топлива в указанном диапазоне нагрузок ГТУ и наружных температур при использовании одной зоны горения без сброса и перепуска воздуха в КС затруднительно. Потребуется до 30% воздуха сбросить или перепустить со входа камеры сгорания на некоторых режимах работы, что окажет существенное влияние на КПД ГТУ.

Для выполнения поставленной задачи без сброса и перепуска воздуха необходимо организовать несколько независимых зон сжигания топлива внутри КС в каждой из которых создать условия для устойчивого малоэмиссионного сжигания и подключать/отключать каждую из них к процессу горения по мере необходимости. Подобный подход используется в камерах сгорания крупных мировых производителей газовых турбин, таких как Митсубиси, Дженерал Электрик, Ансальдо.

Многозонная малоэмиссионная камера сгорания (МЭКС) для ГТУ в объеме жаровой трубы имеет 4-ри независимые зоны стабилизации пламени. Три из них (I, II, III) формируются горелочным устройством, расположенным в торце жаровой трубы и

являющимся первым (ГУ1) по ходу потока воздуха в МЭКС. Четвертая зона стабилизации пламени (IV) - это стабилизация на струях, поступающих в объем жаровой трубы ниже по потоку, ближе к газосборнику и выходу из камеры сгорания. Данные струи воздуха или ТВС формируются вторым горелочным устройством, расположенным ниже по потоку (ГУ2).

2. **Разработаны трехмерные модели вариантов отдельных узлов, проведена их оптимизация и выполнена полная сборка окончательного варианта камеры сгорания**

Для второй зоны были проведены выбор и оптимизация горелочного устройства второй зоны горения. Всего было рассмотрено 5 вариантов конструкций. После анализа результатов расчетных исследований всех вариантов, по эмиссиям NOx и CO, а так же температуре стенок жаровой трубы второй зоны был выбран лучший вариант. Для него была проведена дальнейшая оптимизация по подаче топлива через отверстия в лопатках завихрителя с целью улучшения качества перемешивания топливовоздушной смеси, формирующейся в ГУ2.

Снижение образования оксидов азота в схеме последовательного сжигания сильно зависит от равномерности ТВС2. При значениях неравномерности концентрации в выходном сечении ГУ2 около 0.007 последовательное сжигание приводит к снижению эмиссий на ~ 30% относительно одной зоны горения.

3. **Проведены расчетные исследования демонстратора двузонной камеры сгорания**

Для проведения многовариантных расчетных исследований демонстратора двузонной МЭКС с двумя ГУ: ГУ1 и ГУ2, в которых происходит предварительная подготовка ТВС перед подачей в КС.

Распределение воздуха между горелочными устройствами ГУ1 и ГУ2 для исследуемой конструкции составляет 72 и 28 %, соответственно.

Для проведения расчетов за основу взяты режимы газовой турбины, работающей в диапазоне температур от 700 до 1670ºС. Температура воздуха за компрессором (на входе в камеру сгорания) изменяется от 283 до 544ºС.

Исследованы возможности управления работой двузонной КС с температурой газов до 1670ºС за счет распределения топлива между зонами и определены оптимальные режимы ее работы, при которых обеспечиваются минимальные эмиссии оксидов азота NOx и равномерное поле температуры.

В результате расчетных исследований процессов течения и горения на максимально теплонапряженном режиме (Твых=1670ºС, αкс=1.8) при подаче топлива только в ГУ1, и при различных распределениях топлива между ОГ ГУ1 и ГУ2 было получено:

- Оптимальным для исследуемой камеры сгорания является 35% расхода топлива, при котором достигается двукратное снижение эмиссий оксидов относительно однозонного сжигания. В этом случае температура в первой зоне ~1570ºС, (α1=2,0) ниже границы резкого роста образования NOx и в ней образуется не более 25% от общей эмиссии NOx. Основной вклад вносит короткая (1/3 длины КС) вторая зона.

- Наименьшие значения температуры газа вблизи стенки, как и в объеме первой зоны в целом, достигаются при максимальной подаче топлива в ГУ2 (40% топлива), и обеднении вследствие этого топливовоздушной смеси первой зоны. При этом температура газов во второй зоне наиболее высока и превышает температуру газов первой зоны.

- Наиболее равномерное поле температуры на выходе из КС достигается при распределении топлива между зонами горения как 75/25%, что близко к равенству концентраций ТВС, поступающих из ГУ1 и ГУ2 ..

В результате расчетов получен оптимальный алгоритм управления подачей топлива в КС:

- изменение температуры газов на выходе из КС от 700ºС до 1275ºС осуществляется за счет регулирования расхода топлива через топливный канал ПГ;

- при достижении температуры газов на выходе из КС 1275ºС происходит перераспределение топлива между топливными каналами ПГ и основной горелки ГУ1 до полного прекращения подачи топлива в ПГ;

- изменение температуры газов на выходе из КС от 1275ºС до 1360ºС осуществляется за счет регулирования расхода топлива через канал основной горелки ГУ1;

- при достижении температуры газов на выходе из КС 1360ºС происходит перераспределения топлива между топливными каналами основной горелки ГУ1 и ГУ2;

- изменение температуры газов на выходе из КС от 1360ºС до 1670ºС происходит за счет регулирования расхода топлива через топливный канал ГУ2, таким образом, чтобы температура в первой зоне сгорания была в районе 1550ºС.

Такой способ управления топливом КС в зависимости от температуры газов на выходе из КС (нагрузки) ГТ обеспечивает минимальные выбросы вредных во всем малоэмиссионном диапазоне ее работы.

Таким образом, при организации второй зоны сжигания и выборе оптимального алгоритма управления расходами топлива в первую и вторую зоны можно получить удовлетворительные эмиссии NOx и CO в диапазоне температур на выходе из КС от 700ºС до 1670ºС.

Наименьшие значения выбросов NOx получены при температуре газов после первой зоны 1550ºС и дальнейшем повышении их температуры за счет второй зоны до 1670ºС.

Возможна дальнейшая оптимизация двузонной МЭКС по распределению воздуха между зонами горения согласно аналитическим данным, представленным в Главе 1 для которой требуется разработать завихрители второй зоны с большим проходным сечением.

4. Проведены экспериментальные исследования демонстратора двузонной камеры сгорания

Подробно схема испытательного стенда ОАО "ВТИ" и экспериментальной установки описаны в Отчете Этапа 2.

Испытания проведены для трех вариантов работы модельной двузонной МЭКС:

ВАР1 - одна длинная зона горения, ГУ2 полностью заглушено, весь воздух и топливо поступают только в ГУ1;

ВАР2 - одна зона горения, топливо поступает только в ГУ1, ГУ2 работает как отверстия разбавления;

ВАР3 - две последовательные зоны горения, воздух и топливо распределяются между ГУ1 и ГУ2 в оптимальных соотношениях для каждой нагрузки ГТУ.

Входные параметры для испытаний модельной двузонной МЭКС с повышением температуры перед турбиной до 1690°С: давление воздуха на входе 130 и 340 кПа; температура воздуха на входе в камеру сгорания изменялась от 283°С до 545°С. Температура газов на выходе из МЭКС изменялась от 700 до 1690°С, соответственно.

Сравнение результатов исследований МЭКС с одной и двумя последовательными зонами горения показали:

- в ВАР2 с одной зоной горения и ГУ2, работающем как смеситель (без подачи топлива), наблюдается наибольший рост NOx от температуры газов на выходе. Это объясняется наибольшей концентрацией ТВС в ГУ1 относительно двух других вариантов, поскольку только 75% воздуха от общего и все топливо поступают в первую зону горения.

- в ВАР1, в котором весь воздух и топливо поступают в ГУ1, резкий рост эмиссий NOx начинается с температуры газов на выходе ~ 1500°С. А в ВАР3, с двумя зонами горения при подаче ТВС равных концентраций в ГУ1 и в ГУ2, темп роста NOx от выходной температуры газов значительно ниже. Начиная с температуры газов на выходе ≥1550°С, разница в NOx увеличивается по мере роста температуры. Так, при 1550°С она составляет ≈5 мг/м3 (с 15 до 10), а при 1690°С уже ≈20 мг/м3 (с 38 до 18).

Для ВАР1 и ВАР3 экспериментальные исследования проведены при давлении воздуха 130 и 340 кПа.

Выводы по экспериментальным исследованиям:

Разработана и испытана на стенде двузонная модельная КС.

Обеспечена высокая полнота сгорания топлива во всем диапазоне моделируемых нагрузок.

Зажигание и работа до определенной температуры газов перед турбиной осуществляется с помощью ранее отработанного ГУ первой зоны сгорания.

Осуществлен устойчивый (без виброгорения, проскока пламени в зону перемешивания, снижения полноты сгорания топлива) переход на малоэмиссионный режим работы КС при температуре газов на выходе из камеры сгорания 1200°С.

Подача топлива во вторую зону горения производится после достижения в первой зоне температуры газов, обеспечивающей надежное самовоспламенение в их среде ТВС второй зоны. Оптимально, когда концентрации ТВС, поступающей в ГУ1 и ГУ2 равны. В обеих зонах производится кинетическое сжигание ТВС с высокими избытками воздуха.

В первую ступень сгорания поступает больше воздуха, чем во вторую (75/25%).

Дальнейшее повышение температуры газов производится путем нагружения первой и второй ступеней.

При температуре газов на выходе 1690°С двузонное сжигание топлива позволило снизить концентрацию NOx на выходе из модельной КС с 38 до 18 мг/нм3 при 15% O2 , при этом эмиссии CO сохранились на том же уровне (менее 10 млн -1).

Температура стенок ЖТ в случае однозонного горения выше на ~30-140°С относительно двузонного, а температура стенок газосборника, особенно в месте ввода ТВС через ГУ2, превышает температуру стенок газосборника при одной зоне горения на 130-160°С.

Неравномерность поля температур горячих газов на выходе из газосборника в случае двузонного сжигания топлива меньше, чем при однозонном горении.

Проведенные исследования свидетельствуют о возможности повышения температуры газов перед турбиной до 1700°С при допустимых выбросах NOx и CO и сохранении устойчивого горения.

Сравнение расчетных и экспериментальных результатов исследований показывают значительный эффект снижения эмиссий NOx при использовании второй зоны горения. Количественно доли снижения вредных выбросов, полученных расчетно и экспериментально отличаются. Расчетные исследования завышают разницу между NOx, получаемыми при одной зоне горения и двух последовательных зонах примерно на 30%, относительно экспериментальных данных. Данное расхождение связано с использованием упрощенных моделей горения (учет только термических NOx), стационарных расчетных исследований и упрощенной геометрии модели (сегмент).

5. **Разработан эскизная конструкторская документация демонстратора камеры сгорания с параметрами для перспективных ГТУ с технологией подавления оксидов азота.**

Разработана эскизная конструкторская документация демонстратора камеры сгорания с параметрами для перспективной ГТУ с технологией подавления оксидов азота на базе наилучшего из испытанных вариантов.

6. **Получены технические решения, применимые к реальным конструкциям камер сгорания с параметрами для перспективных ГТУ и разработаны рекомендации для проектирования камер сгорания**

1. Организация двух последовательных зон горения в общем объеме жаровой трубы.

2. Первое горелочное устройство - с предварительным перемешиванием топлива и воздуха, имеет три топливных канала один к пилотной горелке и два к основной горелке.

3. Рекомендуемая длина первого объема горения от 1.5 до 2 диаметров ЖТ.

4. Рекомендуемое распределение воздуха между первой и второй зонами горения должно лежать в диапазоне 70-60% в ГУ1 и 30-40% в ГУ2, соответственно.

5. К ГУ2 подходит один топливный канал, в нем организуется предварительное перемешивание топлива и воздуха.

6. Рекомендуемая длина второго объема горения от 0.5 до 1.0 диаметра ЖТ.

7. **Разработан проект Технического Задания на проектирование камеры сгорания для перспективной ГТУ с технологией подавления оксидов азота путем организации двух последовательных зон сжигания топлива**

Для внедрения результатов НИР в реальный сектор экономики разработан проект технического задания на проектирование камеры сгорания для перспективной ГТУ с технологией подавления оксидов азота путем организации двух последовательных зон сжигания топлива.

Разработанная камера сгорания с технологией малоэмиссионного сжигания топлива на природном газе будет предназначена для работы перспективных энергетических ГТУ, например, семейства двигателей ПД (ОАО «Авиадвигатель»), с высокой температурой газов за КС более 1500 °С, обеспечивающей низкие выбросы NOx при высокой полноте сгорания топлива.

КС должна иметь следующие технические характеристики (параметры):

1. Содержание оксидов азота в выхлопных газах при работе на газообразном топливе с нагрузкой от 0,5 до 1,0 номинальной не должно превышать 50 мг/нм3 в всем

диапазоне температур наружного воздуха от минус 45 до плюс 45 С, согласно ГОСТ 29328-92 «УСТАНОВКИ ГАЗОТУРБИННЫЕ ДЛЯ ПРИВОДА ТУРБОГЕНЕРАТОРОВ. Общие технические условия»

2. Коэффициент полноты сгорания топлива на номинальной нагрузке на газообразном топливе не менее 99,95 %, в диапазоне нагрузки от 0,5 до 1,0 номинальной не менее 99,7%

3. Коэффициент потерь полного давления в камере сгорания не более 6 %

4. Средняя температура газа на выходе из камеры сгорания более (номинальный режим) 1500 С

5. Радиальная эпюра температуры газа на выходе из камеры сгорания (малоэмиссионные режимы) не более 1,05

6. Температура стенки жаровой трубы и газосборника во всем диапазоне нагрузок не должна превышать tст = 900 °С

7. На всех режимах работы двигателя не допускаются пульсации давления в камере сгорания с амплитудой превышающей P' = 5 кПа

Для подтверждения соответствия разрабатываемой продукции требованиям настоящего технического задания и обоснования выбора технических решений должен быть испытан опытный образец МЭКС.

Требования к испытательному стенду.

Экспериментальные стенды должны быть оснащены приборами для измерения всех основных характеристик:

- расходы воздуха и топлива;
- давления воздуха и топлива;
- температура воздуха и топлива;
- температура металла элементов камеры сгорания;
- температурное поле на выходе из камеры сгорания;
- концентрации CO, CO2, NOx, CnHm, O2 в продуктах сгорания на выходе из камеры сгорания;
- пульсации давления в объёме отсека и жаровой трубы.

Информация от измерительных приборов должна поступать на автоматическую систему сбора, обработки и хранения информации.

Работы по ОКР должны выполняться в следующей последовательности:

Этап 1. Технические предложения.

Этап 2. Эскизный проект.

Этап 3. Технический проект.

Этап 4. Изготовление испытательных отсеков, элементов и узлов образцов МЭКС

Этап 5. Проведение испытаний опытного образца.

Этап 6. Корректировка по результатам испытаний Технического проекта.