

МОДЕЛЬ ПЕРСПЕКТИВНОЙ ВЫСОКОТЕМПЕРАТУРНОЙ ГТУ С НИЗКОЙ ЭМИССИЕЙ ВРЕДНЫХ ВЫБРОСОВ

Касымов М.К.¹, Савченко М.С.¹, Резниченко А.В.¹

¹Открытое акционерное общество Промышленная группа «Новик» (ОАО ПГ «Новик»), Москва, Россия (123182, Россия, г. Москва, пл. Академика Курчатова, д. 1), e-mail: mail@pg-novik.ru

В настоящей статье обращено внимание на то, что основное направление, по которому развивается наземное газотурбостроение - это увеличение энергоэффективности и экономичности газотурбинных установок (ГТУ) промышленного применения. При этом при их создании особое внимание уделяется охране окружающей среды, а именно обеспечению низких уровней выбросов вредных веществ, в том числе оксидов азота. Приведены основные результаты анализа существующих технических решений (патентов) и нормативной документации в области создания ГТУ. Приведен перечень необходимых исходных данных для расчета камеры сгорания с оптимальной степенью сжатия компрессора на основе имитационного моделирования ГТУ. Показан вариант адаптации общепринятого алгоритма проекционного расчета кольцевых камер сгорания для разработки камеры сгорания с температурой 1700 °С в зоне горения. Данный алгоритм послужил основой для создания методики расчета кольцевых камер сгорания. Приведены результаты проекционного расчета трех вариантов высокотемпературных камер сгорания по авторской методике.

Ключевые слова: камера сгорания, алгоритм расчета, методика расчета, имитационное моделирование, ГТУ.

MODEL OF PERSPECTIVE HIGH-TEMPERATURE GAS TURBINE PLANT WITH LOW EMISSION OF HAZARDOUS EMISSIONS

Kasymov M.K.¹, Savchenko M.S.¹, Reznichenko A.V.¹

¹Joint-stock company industrial group "Novik" (JSC "Novik"), Moscow, Russia (123182, Russia, Moscow, Akademika Kurchatova pl.,1), e-mail: mail@pg-novik.ru

The article describes the fact that gas turbine construction is developing mainly by increasing energy efficiency and effectiveness of gas turbine plants. Special emphasis is placed on environment protection, mainly on low repugnant substances emissions (particularly, nitrogen oxides). Authors show analysis results of current technical solutions (patents) and normative documents in producing gas turbine plants. The article contains a list of necessary initial data for combustor calculations with optimal compression index on the base of gas turbine plant simulation modeling. Authors introduce adaptation of generally accepted scheme of projecting calculation of annular combustion chamber with temperature 1700°C in combustion zone. Given scheme serves as a basis for calculation procedure of annular combustion chambers. Authors give results of projecting calculation of three different high-temperature combustors according to their personal approach.

Keywords: combustor, computation algorithm, calculation procedure, service simulating test, gas turbine plant.

В настоящее время газотурбинные двигатели в составе ГТУ находят всё более широкое применение в качестве силовых установок в различных отраслях промышленности. Одним из вариантов применения ГТУ является конвертирование существующих авиационных газотурбинных двигателей в газотурбинные установки наземного применения, однако при конвертации авиационных двигателей их энергетические характеристики в лучшем случае остаются неизменными, а зачастую даже снижаются. Одновременно с этим весьма активно ведутся работы по созданию ГТУ нового поколения, для которых требуется разработка новых технических решений, обеспечивающих как повышение эффективности, за счет увеличения степени повышения давления, при котором производится сжигание топлива и

повышения температуры сгорания, так и экологичности. Анализ современных публикаций показал, что в настоящее время отсутствуют достоверные методики расчёта основных характеристик низкоэмиссионных камер сгорания, таких как уровень эмиссии NO_x и CO, границ вибрационного горения, что не позволяет прогнозировать характеристики камеры сгорания при начале её разработки. Создание методик расчета высокоэффективных энергетических установок, обеспечивающих наряду с экономией топлива улучшение экологических показателей, уменьшение стоимости всего жизненного цикла, является одной из самых актуальных задач.

На основе проведенного имитационного моделирования ГТУ авторами получены необходимые исходные данные для расчета камеры сгорания с оптимальной степенью сжатия компрессора. Алгоритм проектировочного расчета кольцевых камер сгорания, разработанный и апробированный на примерах в [1], послужил основой для создания методики расчета высокотемпературных кольцевых камер сгорания с температурой 1700 °С в зоне горения. По данному алгоритму в ходе выполнения научно-исследовательской работы «Проведение теоретических и имитационных экспериментальных исследований, разработка технических решений и моделей, направленных на снижение вредных выбросов продуктов горения топлива в перспективных ГТУ при высокой температуре сгорания (1700 °С и выше)» в ОАО ПГ «Новик» были спроектированы несколько вариантов высокотемпературных камер сгорания и произведена для них оценка выбросов оксидов азота в выхлопных газах.

Уровень объемных выбросов наиболее качественно позволяет оценить расчетная методика образования оксидов азота в КС ГТД, на основе термического механизма Я.Б. Зельдовича и одномерной модели спроектированного варианта камеры сгорания.

Основное уравнение для инженерных расчетов эмиссии NO_x:

$$\text{NO}_x = 3,7 \times 10^{11} \times e^{-65000/T_r} \times (P_k/T_r)^{1/2} \times \tau$$

где P_к - давление воздуха на входе в КС;

T_г - температура газа в зоне горения;

τ - время пребывания газов в зоне высоких температур.

Результаты расчетов приведены в таблице 1.

Таблица 1 – Теоретические расчеты эмиссии оксидов азота КС

Параметр	Вариант 1	Вариант 2	Вариант 3
Температура в КС, К	1976	1979	1967
Длина активной части КС, м	0,333	0,255	0,497
Скорость воздуха, м/с	129,77	92,69	184,92
Давление на входе в КС, Мпа	2,405	3,368	2,5
Время пребывания газов в КС, мс	2,57	2,75	2,69
Объемная концентрация NO_x , мг/м ³	171,45	228,47	157,86

В результате проведенных исследований подтверждена закономерность, при которой с увеличением температуры сжигания топлива существенно возрастает концентрация оксидов азота в выхлопных газах. Как отмечалось ранее, любой из существующих методов снижения выбросов оксидов азота ведет к снижению температуры сжигания топлива и, как следствие, к снижению КПД установки. Единственно возможным методом был бы каталитический метод снижения оксидов азота, однако в настоящее время катализаторы, работающие в условиях воздействия рассматриваемых температур, отсутствуют. В связи с этим наиболее реализуемый вариант высокотемпературных ГТУ в ближайшее время - применение многовального ГТУ простого цикла со свободной турбиной и двумя камерами сгорания.

Рабочая температура продуктов сгорания в первой (высокотемпературной) КС составляет 1700 °С и развивает выходную мощность на ТВД, а снижение оксидов азота в отработанных газах до допустимого уровня осуществляется с помощью каталитического дожигания по приведенной выше схеме ГТУ с многовальным ГТД, т.е. на выходе газовой (первой) турбины высокого давления установить каталитическую низкотемпературную, продукты сгорания которой направить во вторую турбину низкого давления. В качестве низкотемпературной каталитической камеры сгорания можно использовать доработанную существующую КС с катализатором. Кроме того, в такой системе ГТУ воздух, отобранный за какой-либо ступенью компрессора, после охлаждения элементов ТВД не надо возвращать в проточную часть компрессора для утилизации теплоты и повышения КПД ГТУ, тем самым можно уменьшить работу, затрачиваемую на сжатие воздуха в компрессоре. Основной отбор мощности от ГТУ происходит на валу ТВД, оставшаяся часть мощности снимается с вала ТНД. Для повышения общего КПД ГТУ необходимо использовать тепло отходящих газов от ТНД в соответствующих теплообменниках-когенераторах. В результате проведенного анализа выбрана окончательная схема высокотемпературной ГТУ с дожигом рабочих газов в низкотемпературной камере сгорания с катализатором, а в качестве высокотемпературной камеры сгорания определен расчетный вариант № 3.

Выбранный способ сжигания топлива во вторичной низкотемпературной камере в соответствии с патентом RU 2372556 заключается в пропуске топливовоздушной смеси через несколько каталитических зон с использованием каталитического пакета, включающего два катализатора: Pd-содержащий катализатор для инициирования процесса горения топливовоздушной смеси и катализатор для устойчивого горения топливовоздушной смеси. Сжигание осуществляют в двух каталитических зонах, которые различаются составами катализаторов и их каталитической активностью в реакциях окисления углеводородов. Так, в 1-й зоне используется катализатор, содержащий PdO или Pd, нанесенный на оксид алюминия, модифицированный оксидами редкоземельных элементов, в частности церия или лантана, с содержанием палладия.

Во 2-й зоне можно использовать катализатор, содержащий в качестве активного компонента оксиды марганца или гексаалюминат марганца.

Инициирование процесса горения топливовоздушной смеси осуществляется на катализаторе 1-й зоны при температуре 250-530 °С; устойчивое горение топливовоздушной смеси осуществляют на катализаторе во 2-й зоне при входной температуре 450-800 °С, при этом температура отработанных газов на выходе из каталитического пакета составляет 700-950 °С.

В соответствии с выбранной схемой многовального ГТУ простого цикла со свободной турбиной и двумя камерами сгорания, а также расчета термогазодинамического цикла такого ГТУ был проведен предварительный теоретический расчет низкотемпературной каталитической камеры сгорания. Результаты расчета приведены в таблице 2.

Таблица 2 – Теоретические параметры низкотемпературного варианта КС

Параметр	Значение
Исходные данные	
Расход воздуха через зону горения, кг/с	55,35
Расход топлива, кг/с	0,761
Полный коэффициент избытка воздуха	1,78
Коэффициент избытка воздуха через зону горения	1,068
Результаты проектировочного расчета	
Средний диаметр компрессора, м	0,798
Средний диаметр турбины, м	0,798
Высота канала на входе в диффузор, м	0,015
Площадь входа в диффузор, м ²	0,046
Объемный расход воздуха, м ³ /с	14,0

Параметр	Значение
Скорость воздуха на входе в диффузор, м/с	119,5
Длина диффузора, м	0,104
Гидравлические потери в диффузоре, МПа	9841
Расстояние от выхода диффузора до плоскости фронтального устройства, м	0,091
Средний диаметр фронтальной плиты	0,0841
Высота фронтальной плиты, м	0,112
Диаметр горелки, м	0,032
Число горелок	72
Диаметр внешнего яруса, м	0,894
Диаметр внутреннего яруса, м	0,798
Расстояние между ярусами горелок, м	0,051
Шаг горелок верхнего яруса, м	0,078
Шаг горелок внутреннего яруса, м	0,069
Объем жаровой трубы, м ³	0,221
Высота жаровой трубы, м	0,272
Расстояние от фронтальной плиты до сечения ЖТ, м	0,136
Длина зоны горения жаровой трубы, м	0,354
Температура в зоне горения, °С	1185
Относительный расход воздуха для охлаждения турбины	0,16
Относительный расход воздуха для охлаждения газосборника	0,15
Относительный расход воздуха в зоне горения	0,562
Относительный расход воздуха в зоне смешения	0,128
Длина газосборника, м	0,272
Длина камеры сгорания, м	0,821
Гидравлический расчет	
Коэффициент гидравлических потерь в жаровой трубе	0,7
Коэффициент тепловых потерь в КС	0,167
Потери давления в камере	0,037
Коэффициент восстановления полного давления в КС	0,963

Для расчетного варианта низкотемпературной каталитической камеры сгорания теоретический расчет выбросов оксидов азота, который позволяет оценить возможность снижения объемной концентрации вредных выбросов в выхлопных газах, также выполнен с

помощью формулы Я.Б. Зельдовича для одномерной модели. Результаты расчета приведены в таблице 3.

Таблица 3 – Теоретические расчеты эмиссии оксидов азота для двух КС

Параметр	Высокотемпературная КС	Низкотемпературная КС
Температура в КС, К	1967	1185
Длина активной части КС, м	0,497	0,626
Скорость воздуха, м/с	184,92	119,5
Время пребывания газов в КС, мс	2,69	5,24
Объемная концентрация NO_x , мг/м ³	157,86	0,0035

Таким образом, проведённые расчеты на основе сделанных допущений и принятых упрощений показывают, что представленная модель перспективной высокотемпературной ГТУ обеспечивает востребованный уровень технических и экологических параметров, практическую достоверность которых необходимо проверить экспериментально.

Приведенные выше расчеты и соответствующие выводы являются частными результатами исследований, проведенных в рамках выполнения научно-исследовательской работы по теме: «Проведение теоретических и имитационных экспериментальных исследований, разработка технических решений и моделей, направленных на снижение вредных выбросов продуктов горения топлива в перспективных ГТУ при высокой температуре сгорания (1700 °С и выше)».

Данная научно-исследовательская работа проводилась при финансовой поддержке Министерства образования и науки Российской Федерации в рамках Государственного контракта 14.516.11.0040 от 29.03.2013 г.

Список литературы

1. Исмагилов З.Р. и др. Способ сжигания углеводородных топлив (варианты) и катализаторы для его осуществления : патент РФ № 2372556. - класс F23C13/00.
2. Крюков В.Г., Наумов В.И., Демин А.В., Абдуллин А.Л., Тринос Т.В. Горение и течение в агрегатах энергоустановок. - М. : Янус-К, 1997.
3. Пармон В.Н. и др. Применение каталитических камер сгорания в газотурбинных установках децентрализованного энергоснабжения // Вестник РАН. – 2007. – Т. 77, № 9. - С. 819-830.

4. Резник В.Б., Данильченко В.П., Болотин Н.Б., Ковылов Ю.Л., Лукачев С.В. Проектный расчет камеры сгорания авиационного ГТД : учебное пособие. – Куйбышев : КуАИ, 1982, 84 с.
5. Рыбалко В.В., Часовских А.А. Методика теплового расчета газотурбинных энергетических установок : учебное пособие. – СПб. : СПбГТУ, 2002. - 120 с.

Рецензенты:

Зайченко Виктор Михайлович, д.т.н., заведующий лабораторией Федерального государственного бюджетного учреждения науки «Объединенный институт высоких температур» Российской академии наук (ОИВТ РАН), г. Москва.

Геча Владимир Яковлевич, д.т.н., профессор, заместитель генерального директора ОАО «Корпорация «ВНИИЭМ» (Российское космическое агентство), г. Москва.