

КОНСТРУКТИВНЫЕ СХЕМЫ ОРГАНИЗАЦИИ ПИЛОТНОГО ГОРЕНИЯ В МАЛОЭМИССИОННЫХ КАМЕРАХ СГОРАНИЯ С ПРЕДВАРИТЕЛЬНЫМ СМЕШЕНИЕМ ТОПЛИВА И ОПЫТ ИХ ЭКСПЛУАТАЦИИ

Скиба Д.В.¹, Максимов Д.А.¹, Кашапов Р.С.¹, Харисов Т.С.²

¹ООО НПФ «Теплофизика», г. Уфа, d.skiba@teplophysics.ru

²ФГБОУ ВО «Уфимский университет науки и технологий», г. Уфа

Ключевые слова: газовая турбина, камера сгорания, выбросы вредных веществ, предварительное смешение газообразного топлива, пилотное пламя, запальное устройство, пульсации давления, нагарообразование

В настоящее время сжигание обедненной смеси является единственной технологией, гарантирующей низкие выбросы NOx для всего спектра промышленных электростанций и газоперекачивающих установок, но при этом основные проблемы эксплуатации малоэмиссионных газотурбинных установок заключаются в обеспечении надежной и устойчивой работы на режимах пуска, разгона и режимах пониженной мощности до перехода на режим малоэмиссионного горения.

Особенности организации рабочего процесса, обеспечивающие низкие уровни выбросов на режимах номинальной нагрузки, препятствуют надежной работе на режимах пуска, разгона, пониженной мощности и нормального останова. К этим особенностям относятся высокий массовый расход в первичной зоне камеры сгорания, большие зоны рециркуляции и высокая однородность топливовоздушной смеси. Часть этих проблем может быть решена путем организации горения дежурного факела в диффузионном (пилотном) режиме, но это приводит к новым проблемам.

Проблема с зажиганием. Для достижения максимальной концентрации топлива в зоне рециркуляции эта зона должна располагаться в центре горелки, в связи с чем воспламенение от свечи на стенке камеры сгорания становится невозможным. Это можно решить с помощью подвижных свечей зажигания, но это решение не очень надежно.

Регулировка расхода пилотного топлива и его выключение. Пилотное пламя, используемое в режимах пуска, должно прерываться на режиме с низким уровнем выбросов, чтобы предотвратить избыточное образование NOx. Но малые расходы пилотного топлива приводят к неустойчивости из-за работы в переходных режимах по числам Рейнольдса.

Более того, отключение пилотного топлива из-за различных гидравлических потерь в горелках может привести к небольшому перетоку между горелками, и этот небольшой расход при подаче пилотного топлива непосредственно в зону горения будет потоком продуктов сгорания. Поток продуктов сгорания имеет два недостатка: нагрев топливного коллектора и конденсация водяных паров. Нагрев топливного коллектора приводит к снижению надежности конструкции. Конденсация воды приводит к погасанию пламени при подаче пилотного топлива на режимах малой нагрузки.

Подача пилотного топлива по центру горелочного устройства может приводить к нагарообразованию на втулке горелочного устройства. Это связано с тем, что топливная струя, выдуваемая со втулки горелочного устройства, теряет устойчивость и приобретает форму прецессирующей струи. Периодическое касание этой струи стенки втулки горелочного устройства приводит к отложению нагара и образованию графитовых трубок. При перетоке между горелками продуктов сгорания образование нагара также возможно внутри топливопроводов пилотного топлива.

Кроме того, пилотная стабилизация горения может привести к динамической нестабильности горения. Эта нестабильность имеет двойной характер. В режимах с низкой нагрузкой для малых расходов пилотного топлива имеет место неустойчивость низкой частоты, но для режимов высокой нагрузки, когда средняя температура горения достаточно высока, неустойчивость горения имеет место при высоких расходах пилотного топлива. Такая

зависимость между расходом пилотного топлива и возбуждением пульсаций давления так же описывается в работе [1]. В процессе разгона двигателя, когда ротор турбины разгоняется за счет увеличения общего расхода топлива выше равновесного значения, на некоторых режимах достигается высокая температура горения, что приводит к ситуации, когда расход пилотного топлива провоцирует динамическую неустойчивость горения.

Особенностью работы пилотных трубопроводов и коллекторов от места дозированной подачи топлива регулирующим клапаном до его выхода в горелочном устройстве является то, что в них реализуются малые перепады давления и течение происходит с малыми скоростями на границе между ламинарным и турбулентным режимами. При этом температуры стенок трубопроводов и температура протекающей среды могут существенно отличаться как между собой, так и по длине трубопроводов. Данные особенности рабочего процесса в этих устройствах позволяют использовать для их расчета методы, применяемые для расчета акустических характеристик зондов пульсаций давления [2]. При этом амплитуды пульсаций давления внутри каналов подвода пилотного топлива могут в несколько раз превышать амплитуды пульсаций давления в рабочем объеме камеры сгорания. Данным пульсациям давления соответствуют пульсации скорости среды на выходе из системы подачи пилотного топлива. Эти скорости могут в несколько раз превышать среднюю скорость потока.

В работе представлены методы, используемые научно-исследовательской фирмой «Теплофизика» для преодоления этих проблем на основе лабораторных экспериментов и численного анализа, а также результаты испытаний камеры сгорания с низким уровнем выбросов на компрессорных станциях ПАО «Газпром».

Список литературы

1. Булысова Л.А., Горбань В.Н. Влияние перемешивания топлива и воздуха на процесс горения в малоэмиссионной камере сгорания // Теплоэнергетика. 2013. № 9. С. 15–20.

2. Радин Д.В., Макарьянц Г.М., Быстров Н.Д., Тарасов Д.С., Фокин Н.И., Ивановский А.А., Матвеев С.С., Гураков Н.И. Разработка математической модели акустического зонда волноводного типа для измерений пульсаций давления в камере сгорания газотурбинного двигателя // Вестник Московского авиационного института. 2022. Т. 29. № 2. С.135-143. DOI: 10.34759/vst-2022-2-135-143

Сведения об авторах

Скиба Дмитрий Владимирович, Кандидат технических наук, Заместитель начальника по НИОКР ООО «НПФ «Теплофизика», Малоэмиссионные камеры сгорания для ГТУ;

Максимов Дмитрий Александрович, Кандидат технических наук, Первый заместитель директора ООО «НПФ «Теплофизика», Малоэмиссионные камеры сгорания для ГТУ;

Кашапов Рафаэль Салихзянович, Кандидат технических наук, Директор ООО «НПФ «Теплофизика», Малоэмиссионные камеры сгорания для ГТУ;

Харисов Тимур Салаватович, аспирант ФГБОУ ВО УУНиТ, ведущий инженер по тех.развитию ООО «НПФ «Теплофизика», Малоэмиссионные камеры сгорания для ГТУ.

LEAN PREMIXED COMBUSTOR'S PILOT FLAME SYSTEM'S DESIGN AND OPERATIONAL EXPERIENCE

Skiba D.V.¹, Maximov D.A., Kashapov. R.S., Kharisov T.S.

¹Teplofizika LCC d.skiba@teplophysics.ru

² Ufa University of Science and Technology

Keywords: gas turbine, natural gas lean premixed combustion, pilot flame, pollutant emission, ignitor, pressure oscillations, combustion instability, soot deposition

The problems of pilot flame operation performance such as: soot deposition, water condensation, fuel supply system overheating, pressure oscillations provocation, unreliable performance at start-up sequence are discussed. The designs of pilot fuel system designs were elaborated by LCC Teplofizika and now are in production. There operational experience in laboratory and in field on different types of gas turbine engines presented.