

ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ НЕУСТОЙЧИВОСТИ ФРОНТА ПЛАМЕНИ ЗАРАНЕЕ СМЕШАННЫХ ГАЗОВ НА ЭМИССИЮ ОКСИДОВ АЗОТА

Кашапов Р.С., Максимов Д.А., Скиба Д.В.,
Куликов С.В., Баштанников М.Н.

Уфимский государственный авиационный технический университет

В последние годы наиболее распространенным методом снижения эмиссии оксидов азота стало внедрение концепции предварительной подготовки топливо-воздушной смеси при организации рабочего процесса в камерах сгорания наземных газотурбинных установок и, в частности, газоперекачивающих агрегатов. Эта тенденция в будущем может только усиливаться по мере все большего ужесточения нормативных ограничений на эмиссию вредных веществ [1].

Наличие реакционно-способной предварительно подготовленной топливо-воздушной смеси в турбулентных следах за топливными пилонами, лопатками завихрителя, в зонах предотрывного течения, в пограничных слоях на элементах конструкции камеры сгорания с локально повышенным уровнем температуры может служить дополнительным источником воспламенения и зоной стабилизации фронта пламени. Может иметь место так же стехиометрическое горение на топливных струях. Наличие таких аномальных, нерасчетных источников воспламенения и стабилизации приводит к существенным отклонениям в работе горелочного устройства. Известно, что уменьшение времени смешения и увеличение времени пребывания приводит к росту эмиссии оксидов азота и уменьшению эмиссии оксида углерода CO , в то время как увеличение времени смешения и уменьшение времени пребывания приводит к противоположному результату. Следует отметить, что несмотря на значительное количество работ посвященных исследованию влияния на эмиссию оксидов азота различных параметров горелочных устройств при нормальной стабилизации фронта пламени за горелочным устройством, влиянию аномальной стабилизации внутри горелочного устройства и в камере сгорания на эмиссионные характеристики камеры сгорания

посвящены единичные публикации и обычно не уделяется достаточного внимания при проектировании низкоэмиссионных камер сгорания.

Для анализа на этапе проектирования и доводки камеры сгорания, а также при создании систем регулирования состава в первичной зоне камеры сгорания необходимо знание о границах допустимых режимов работы камеры сгорания. Одной из таких границ являются концентрационные пределы аномальной стабилизации фронта пламени предварительно подготовленной смеси в горелочном устройстве. Прямой численный расчет концентрационных пределов стабилизации фронта пламени в горелочном устройстве требует решения нестационарных уравнений газовой динамики реагирующих течений, однако в настоящее время не существует модели фронта пламени для таких расчетов удовлетворяющей одновременно критериями адекватности, точности и не требующей больших вычислительных ресурсов. С другой стороны существуют эмпирические зависимости рассчитываемые по среднemasсовым параметрам на входе в камеру сгорания, которые однако не применимы при существенном изменении проточной части горелочного устройства и камеры сгорания. В качестве золотой середины этих двух крайних вариантов решения, рассматриваемой в данной работе проблемы, в НПФ “Теплофизика” были разработаны методы определения данных концентрационных пределов на основе изучения течения в камере сгорания без горения (модель “холодного” потока).

На начальной стадии модельных исследований была выдвинута гипотеза о том, что концентрационный предел аномальной стабилизации фронта пламени предварительно подготовленной смеси в горелочном устройстве в определяется равенством нормальной к фронту пламени компоненты скорости потока свежей предварительно подготовленной смеси нормальной турбулентной скоростью распространения фронта пламени, которая в свою очередь зависит от температуры, концентрации топлива, интенсивности и масштаба турбулентности в потоке. В случае превышения нормальной скорости распространения фронта пламени над скоростью потока происходит стабилизация фронта пламени в горелочном устройстве. Вблизи концентрационной границы между стабилизацией в горелочном устройстве и за его срезом возникают неустойчивые режимы работы камеры сгорания, обусловленные равновероятностью двух положений фронта пламени, которые могут быть определены на

основе исследования зависимости стационарного решения от начальных данных задачи Коши [2]. Переход из одного состояния в другое происходит из-за возмущений полей скорости и давления при движении фронта пламени. Исходя из выдвинутой гипотезы, методика расчета концентрационных пределов стабилизации фронта пламени в горелочном устройстве заключается в определении в зависимости от коэффициента избытка воздуха полей скорости потока и скорости распространения фронта пламени при заданных режимных параметрах (температуре и давлении на входе в камеру сгорания и расходе воздуха) и определении границы по коэффициенту избытка воздуха из условия равенства этих двух скоростей на срезе горелочного устройства.

Поэтому центральная роль в исследовании влияния геометрии проточной части камеры сгорания на концентрационные пределы стабилизации фронта пламени в горелочном устройстве отводилась параметрическому исследованию структуры течения в камере сгорания от входа в горелочное устройство до зоны разбавления продуктов сгорания смешанным воздухом.

Данное параметрическое исследование проводилось для горелочного устройства ПСТ, разработанного НПФ "Теплофизика" для модернизируемых камер сгорания газоперекачивающих агрегатов ГТК-10И, ГТК-10ИР, ГТК-25. Принципиальная схема горелочного устройства с предварительной подготовкой топливовоздушной смеси и выбранные варьируемые параметры проточной части камеры сгорания представлены на рис. 1. Данное горелочное устройство имеет две зоны стабилизации фронта пламени: центральную и периферийную.

Параметрическое исследование поля скорости в камере сгорания и горелочном устройстве осуществлялось расчетными и экспериментальными методами. Расчет системы уравнений осуществлялся многосеточным методом на неортогональной сетке. Выбор модели турбулентного течения при течении закрученных потоков в каналах с низкими числами Рейнольдса основывался на компромиссе между точностью и временем расчета. Тестовый расчет по модели Риварда, Батлера, Фармера состоящей из уравнения для кинетической энергии в виде и алгебраической модели для длины перемешивания дает результаты качественно и количественно согласующиеся с экспериментальными данными для течения в канале с внезапным расширением. Проверка результатов расчетов ка-

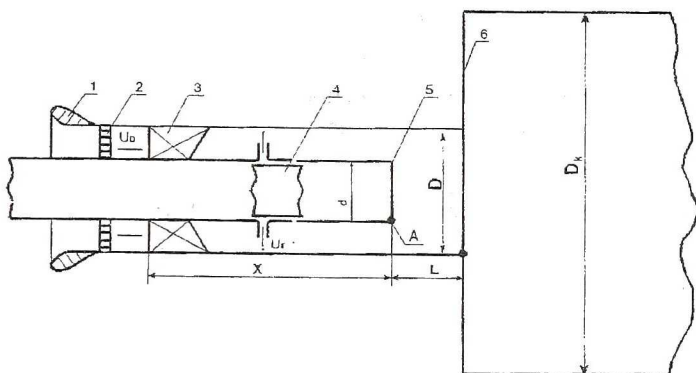


Рис. 1. Геометрия проточной части первичной зоны камеры сгорания выбранная для параметрического исследования. 1- входное устройство для выравнивания поля скорости на входе в горелочное устройство; 2 – турбулизатор; 3 - аксиальный лопаточный завихритель; 4 - смеситель для приготовления топливо-воздушной смеси в виде пилонов с отверстиями; 5 - центральное тело; 6 - фронтное устройство жаровой трубы камеры сгорания в виде диффузора с внезапным расширением.

Варьируемые параметры: $\bar{L} = \frac{L}{D}$, $\bar{D} = \frac{D_k}{D}$, $\bar{x} = \frac{x}{D}$

A- определенная в результате исследования поля осевой скорости критическая точка на поверхности горелочного устройства

меры сгорания с горелочным устройством с аксиальным завихрителем с экспериментальными данными осуществлялось на основе сопоставления рассчитанных и измеренных полей осевой скорости на выходе из входного устройства, на выходе из аксиального завихрителя, на срезе горелочного устройства и в четырех сечениях в камере сгорания.

Представленные на рис. 2. результаты измерений и расчетов показали, что существует критическая точка на поверхности горелочного устройства в окрестности которой соотношение между скоростью распространения фронта пламени и полем скорости определяет критерий проскока в горелочное устройство.

Поскольку проскок фронта пламени в горелочное устройство происходит в турбулентном пограничном слое подчиняющемся логарифмическому закону стенки, критерий проскока был представлен в виде [3]:

$$u_T \ln\left(\frac{Eu_T a}{\nu u_n}\right) = u_T(\alpha, T),$$

где u_T — турбулентная скорость распространения фронта пламени, u_n — динамическая скорость, E — постоянная Кармана.

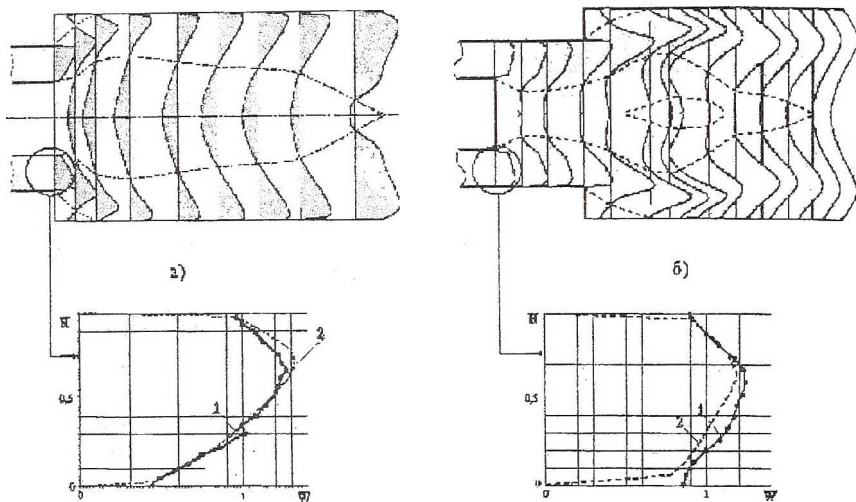


Рис. 2. Результаты расчетов и измерений поля осевой скорости в камере сгорания с предварительной подготовкой топливо-воздушной смеси:

а) при $L=0$, б) при $L=0,5$;

1 - результаты измерений, 2 - результаты расчетов

Зависимость локального коэффициента избытка воздуха от среднemasсового значения определялась расчетными методами и проверялась экспериментально (см. рис. 3)

Экспериментальное подтверждение методики расчета было получено в диапазоне режимных параметров давление в камере сгорания $P = 0,1$ МПа, температура воздуха на входе в камеру сгорания $T = 300 \dots 543$ К, среднemasсовый коэффициент избытка воздуха на выходе из горелочного устройства $\alpha = 1,3 \dots 1,8$. Для диагностики стабилизации в горелочном устройстве применялись датчики положения фронта пламени фирмы "Хонейвелл" регистрирующие ультрафиолетовые волны с длиной волны 314 нм, соответствующей линии спектра радикала OH и синхронизированные с пульсациями давления генератором импульсов с частотой 20

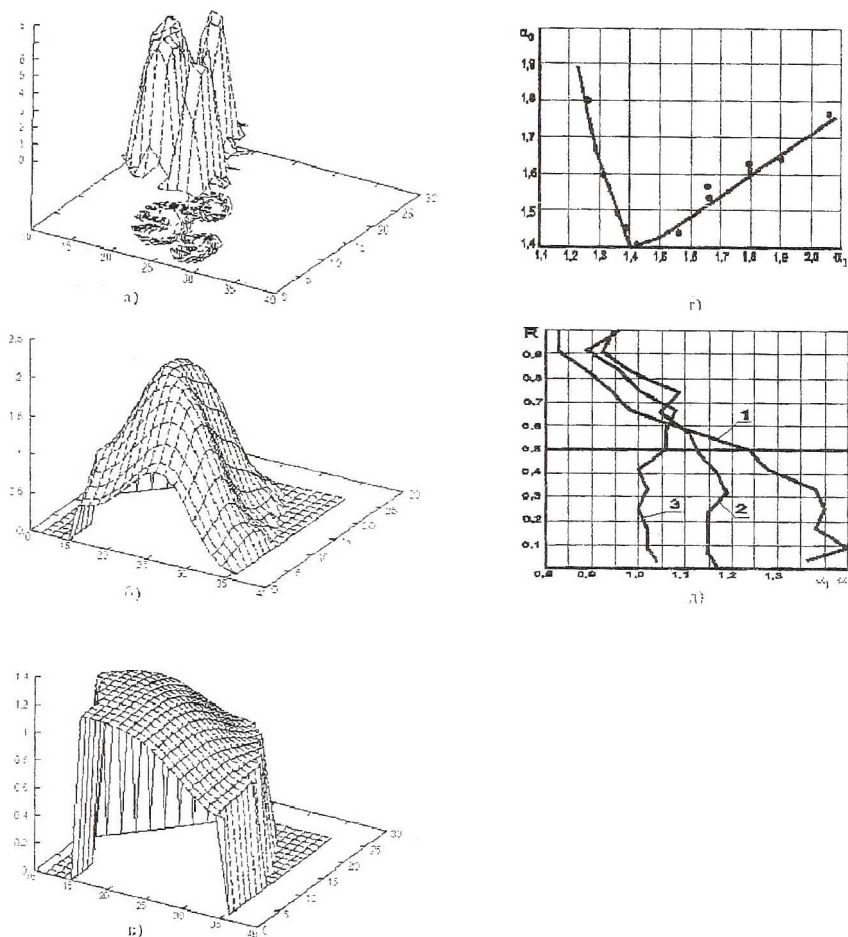


Рис. 3. Зависимость локального коэффициента избытка воздуха от ее среднемассового значения: а), б), в) изменение поля концентрации по длине горелочного устройства по данным расчетов, г) - зависимость локального коэффициента избытка воздуха на втулке горелочного устройства α_0 от среднемассового значения α_1 , д) - результаты экспериментальных измерений: 1 - $\alpha_1=2.4$, 2 - $\alpha_1=1.9$, 3 - $\alpha_1=1.5$

кГц. Для дополнительной проверки результатов измерения применялся стробоскоп. Датчики располагались в оптическом окне на расстоянии 10 мм от среза горелочного устройства. Применение для диагностики систем динамической регистрации объясняется наличием неустойчивости на границе между стабилизацией в горелочном устройстве и вне его. На

этих переходных режимах были зафиксированы колебания давления с амплитудой до 10% от статического давления в камере сгорания и частотой $80 \div 250$ Гц прямо пропорциональной среднemasсовой скорости на выходе из завихрителя. Результаты синхронизированных измерений пульсаций давления и тепловыделения показали, что они согласуются по частоте и по фазе.

Границы стабилизации фронта пламени на срезе горелочного устройства представлены на рис. 4. Результаты расчетов и экспериментов показывают, что граница области возникновения пульсаций давления высокой амплитуды зависит от коэффициента избытка воздуха и относительной длины цилиндрического участка в горелочном устройстве.

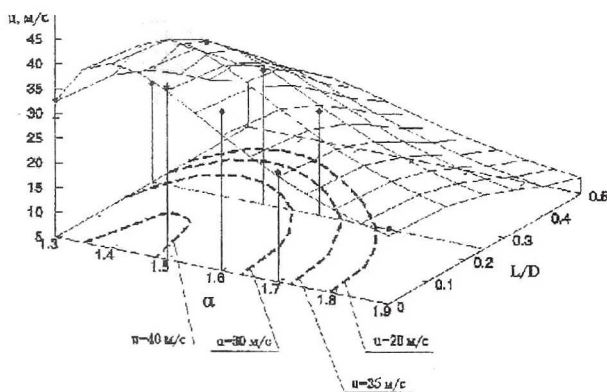


Рис. 4. Результаты расчетов и измерений границы устойчивой работы камеры сгорания при давлении $P=0,1$ МПа и температуре воздуха на входе $T_0=544$ К, точками обозначены экспериментальные данные, трехмерная поверхность - результаты расчетов

Разработанная методика управления амплитудой и частотой пульсаций давления в камере сгорания позволила изучить влияние пульсаций давления на эмиссионные характеристики камеры сгорания. На рис. 5. представлена зависимость эмиссии оксида азота от варьируемого геометрического параметра. Таким образом результаты экспериментальных исследований показывают что существует взаимосвязь между пульсациями давления и эмиссией оксидов азота. Одной из причин существования этой взаимосвязи может являться образование пакетов обогащен-

ной топливо-воздушной смеси, создаваемых колебаниями расхода воздуха через горелочное устройство.

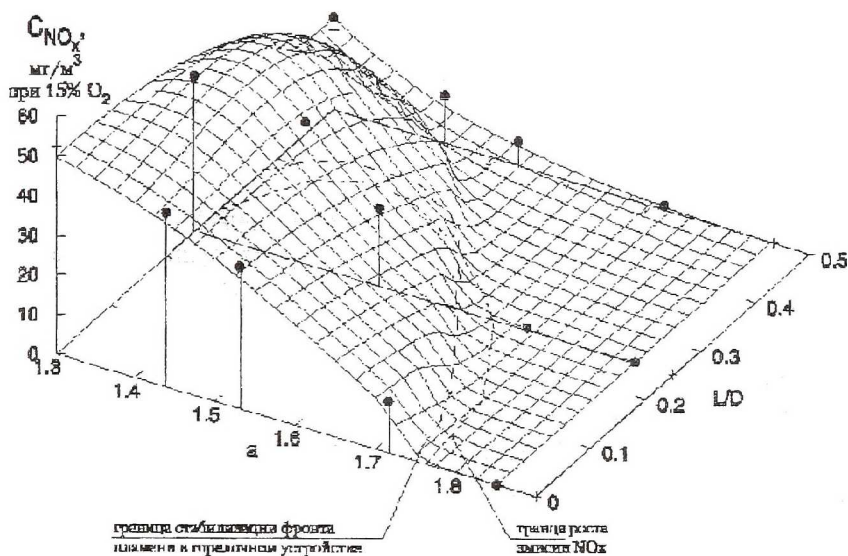


Рис. 5. Зависимость эмиссии оксидов азота от коэффициента избытка воздуха и геометрии устья горелочного устройства при давлении $P = 0,1$ МПа и температуре воздуха на входе $T_e = 544K$: точками обозначены экспериментальные данные, трехмерная поверхность получена в результате интерполяции методом наименьших квадратов

Полученные данные позволяют утверждать, что эмиссионные характеристики камер сгорания с предварительной подготовкой топливо-воздушной смеси зависят не только от качества смешения в смесителе горелочного устройства, определенного по результатам модельных экспериментов, но и от уровня пульсаций давления в камере сгорания.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Тухбатуллин Ф.Г., Кашапов Р.С. Малотоксичные горелочные устройства газотурбинных установок.-М.: Недра, 1997. 160 с.
2. Bradley D., Gaskell P.H. Premixed turbulent flame instability and NO formation in a lean-burn swirl burner. Combustion and Flame 115:515-538(1998)
3. Щетинков Е.С. Физика горения газов.-М.: Наука, 1965. - 704 с.