

ПРИМЕНЕНИЕ АКУСТИЧЕСКИХ ПОГЛОТИТЕЛЕЙ ДЛЯ ПОДАВЛЕНИЯ НЕУСТОЙЧИВОГО ГОРЕНИЯ В МАЛОЭМИССИОННЫХ КАМЕРАХ СГОРАНИЯ ПРОМЫШЛЕННЫХ ГТУ

Дубовицкий А.Н., Свердлов Е.Д., Пьянков К.С.,
Валиев Х.Ф., Чепрасов С.А.

ФГУП «ЦИАМ им. П.И. Баранова», г. Москва, dubovitsky@ciam.ru

Ключевые слова: малоэмиссионная камера сгорания, эмиссия вредных веществ, неустойчивое горение, акустические поглотители, перфорация

Для снижения уровня эмиссии NO_x в малоэмиссионных камерах сгорания (МЭКС) газотурбинных установок (ГТУ) используют сжигание обедненных, предварительно перемешанных топливовоздушных смесей, что приводит к повышению вероятности возникновения режимов неустойчивого горения. Режимы неустойчивого горения в МЭКС сопровождаются увеличением механических нагрузок на конструкцию всей газотурбинной установки и тепловых нагрузок на стенки МЭКС. Это может привести к быстрому разрушению ГТУ даже при небольшой амплитуде колебаний давления газа в камере сгорания. Подавление режимов неустойчивого горения наиболее сложная проблема, ограничивающая внедрение технологии сжигания бедных заранее перемешанных смесей. Сложность этой проблемы в значительной степени определяется многообразием механизмов, вызывающих высокочастотные и низкочастотные режимы неустойчивого горения и отсутствия единых рекомендаций по подавлению этих режимов. Цель данной работы показать, что для подавления высокочастотных режимов неустойчивого горения могут успешно применяться акустические поглотители.

В ЦИАМ были проведены исследования МЭКС, отличающейся от большинства МЭКС промышленных ГТУ отсутствием закрутки потока. Для стабилизации горения используется зона обратных токов, размеры которой в 2-3 раза больше обычно реализуемых в промышленных МЭКС. Кроме того, для существенного снижения выбросов вредных веществ используется горелка с высокой степенью гомогенизации топливовоздушной смеси (ТВС).

Испытания проводились при натуральных условиях: давление на входе в МЭКС 29,5 бар, температура воздуха на входе 828 К, расход воздуха 4,5 кг/с, топливо – метан.

В процессе испытаний измерялось более 100 параметров технологических стендовых систем и объекта исследования – давление, перепад давления, колебания статического давления, температура воздуха и элементов МЭКС, расходы компонентов.

Основные результаты испытаний МЭКС приведены в Табл.1, где показан тип применяемых поглотителей пульсаций давления, граница возникновения режима неустойчивого горения в зависимости от PFR – доли вспомогательного (диффузионного) топлива, основные частоты колебаний давления на режиме неустойчивого горения, доля воздуха, идущего через поглотители ($G_{\text{перф}}$).

Табл.1 – Границы устойчивого горения для разных вариантов МЭКС

Поглотители	PFR, %	Частота, Гц	$G_{\text{перф}}$, %
Нет	~40	2700	0
Поглотители со слабой продувкой	7	400	3
Поглотители с сильной продувкой	3	345	10
Перфорация, 15% площади ЖТ	7	2000, 2700	10
Перфорация, 30% площади ЖТ	3	2000, 2700	20

Для исследованной МЭКС характерны режимы с частотами от 2 до 3 кГц. Для подавления высокочастотных режимов неустойчивого горения были применены резонансные поглотители типа резонаторов Гельмгольца. Поглотители представляли собой перфорированные участки стенки ЖТ, расположенные на её цилиндрической части, вблизи зоны горения, являющейся источником возбуждения пульсаций тепловыделения. Площадь перфорированного участка составляла от 15 до 30 % от общей площади ЖТ. Проницаемость перфорации ~2 %. При этом было реализовано два варианта резонансного объема: в первом случае создавался единый объем для каждых 2х рядов отверстий со слабой продувкой (3-4% от суммарного расхода воздуха через МЭКС) и с сильной продувкой (~10% от суммарного расхода воздуха); во втором случае в качестве такого объема выступала система охлаждения ЖТ, при этом в зону горения через перфорацию попадало от 10 до 20 % от общего расхода воздуха, в зависимости от площади перфорированного участка.

Для варианта МЭКС с диаметром ЖТ 180 мм применение поглотителей первого типа позволило сдвинуть границу возникновения высокочастотных режимов неустойчивого горения от $PFR \approx 40\%$ до $PFR \approx 3-7\%$ (в зависимости от интенсивности продувки), для поглотителей второго типа также до $PFR \approx 3-7\%$ (в зависимости от площади перфорированного участка).

Сложность определения характеристик поглотителей пульсаций давления связана с несколькими факторами. Зависимостью скорости звука от температуры газа, изменяющейся вдоль поглотителей в процессе развития горения и зависящей от расхода охлаждающего поглотителя воздуха, а также наличием перепада давления на перфорированном экране и наличием потока воздуха по обе стороны экрана. Расчет характеристик был проведен по оригинальной методике, разработанной в ЦИАМ. Методика позволяет рассчитывать коэффициент отражения акустических волн различной амплитуды и частоты, падающих на препятствие, например, перфорированный экран, отстоящий от внешней стенки корпуса КС. При этом выполняется моделирование нестационарного пространственного течения в приближении URANS с моделью турбулентности v_t -90. В расчёте учитывался поток в системе охлаждения с числом Маха $M \approx 0.2$, температура в потоке охлаждения $T = 700$ К, что близко к условиям проведения эксперимента. В ходе работы выполнена оценка влияния на коэффициент отражения скорости потока в тракте охлаждения и перепада давления на перфорированном экране. Также было определено влияние амплитуды падающей волны на поглощающие свойства. Показано, что для увеличения максимального значения коэффициента поглощения акустической энергии необходимо уменьшать скорость охлаждающего потока и перепад давления на отверстиях перфорации.

Исследование выполнено при финансовой поддержке РФФИ в рамках научного проекта №19-08-01045.

УДК 621.454.3+536.8+519.6

ИЗМЕНЕНИЕ ПРОФИЛЯ ТЕМПЕРАТУРЫ НА ВЫХОДЕ КАМЕРЫ СГОРАНИЯ ГТД ПРИ ЧИСЛЕННОМ МОДЕЛИРОВАНИИ РАБОЧИХ ПРОЦЕССОВ С УЧЕТОМ СОПРЯЖЕННОГО ТЕПЛООБМЕНА ЧЕРЕЗ СТЕНКУ

Тихонов О.А., Сабирзянов А.Н., Казанский национальный
исследовательский технический университет имени А.Н. Туполева – КАИ
(г. Казань), OLATikhonov@kai.ru

Бакланов А.В., Казанское моторостроительное производственное
объединение (г. Казань)

Ключевые слова: камера сгорания ГТД, конвективный сопряженный теплообмен, неадиабатная задача, моделирование