

Д. А. Максимов, Д. В. Скиба

МЕТОДОЛОГИЯ РАЗРАБОТКИ МАЛОЭМИССИОННОЙ КАМЕРЫ СГОРАНИЯ ДЛЯ НАЗЕМНОЙ УСТАНОВКИ ГПА ГТК-25ИР

Ограничение на время смешения топлива с воздухом сверху из условия предотвращения автоколебаний в малоэмиссионной камере сгорания не всегда согласуется с ограничением на время смешения снизу исходя из эмиссии оксидов азота. Рассматривается метод преодоления данного противоречия при проектировании малоэмиссионной камеры сгорания ГПА ГТК-25ИР. Камера сгорания; пульсации давления; крупномасштабные вихревые структуры; время смешения; эмиссия оксидов азота

НПФ «Теплофизика» совместно с Уфимским государственным авиационным техническим университетом разработали и внедрили в промышленную эксплуатацию малоэмиссионные камеры сгорания для наземных газоперекачивающих агрегатов (ГПА) ГТК-10И и ГПА ГТК-10ИР производства General Electric. Разработка камер сгорания для данных ГПА показала, что проектирование камер сгорания требует разрешения многоугольника противоречий, связанных с особенностью организации рабочего процесса в камере сгорания, направленной на снижение эмиссии оксидов азота (NO_x).

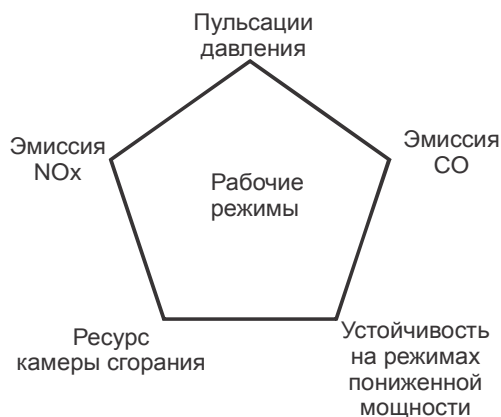


Рис. 1. Многоугольник противоречий возникающих при проектировании малоэмиссионной камеры сгорания

Ранее в ходе разработки и внедрения в промышленную эксплуатацию ГТК-10И и ГТК-10ИР была решена проблема согласования противоречий между требованиями, предъявляемыми к камере сгорания. На базе данного опыта была разработана методология создания малоэмиссионной камеры сгорания для ГПА, рабо-

тающих на газообразном топливе [1]. Рассмотрим применение данной методологии при проектировании малоэмиссионной камеры сгорания для ГПА ГТК-25ИР.

Наиболее существенным противоречием при создании малоэмиссионной камеры сгорания является согласование требований к эмиссии NO_x и к амплитуде пульсаций давления в камере сгорания. Уменьшение эмиссии NO_x на режиме максимальной мощности требует высокого качества смешения топливовоздушной смеси. Требование высокого качества смешения наиболее важно для ГПА, работающих в регенеративном цикле, у которых высокая температура воздуха на входе в камеру сгорания на максимальном режиме. При этом на режимах запуска и прогрева температура воздуха на входе в камеру сгорания не существенно отличается от величин, характерных для ГПА, работающих в безрегенеративном цикле.

Требование высокого качества смешения топливовоздушной смеси может быть обеспечено только большим временем смешения, поскольку интенсивная турбулизация потока при коэффициентах гидравлического сопротивления выше единицы не дает пропорционального роста коэффициента турбулентной диффузии, а увеличение количества точек подачи требует уменьшения диаметров отверстий, что в свою очередь потребует существенного улучшения системы очистки топлива.

С другой стороны, увеличение времени смешения приводит к увеличению времени запаздывания между подачей топлива в горелочное устройство и его сгоранием на фронте пламени. Наличие времени запаздывания приводит к возможности согласования по фазе тепловыделения с пульсациями давления в камере сгорания. Согласование по времени между сгоранием топлива на фронте пламени и пульсацией

давления согласно критерию Релея при недостаточных потерях акустической энергии приводит к возбуждению автоколебаний в камере сгорания. Следует подчеркнуть, что в камере сгорания может возбуждаться несколько мод автоколебаний, поэтому при достаточно большом времени запаздывания отстройка от одной моды колебаний приводит к возбуждению другой моды. Данный механизм возбуждения возможен только в неполностью перемешанной смеси, поскольку при высоком качестве смешения генерация акустической энергии на фронте пламени от пульсаций концентрации топлива не в состоянии превысить ее диссипацию.

Однако, когда смесь полностью перемешана на выходе из горелочного устройства, что позволяет подавить автоколебания, вызванные пульсациями концентрации топлива, возбуждение автоколебаний происходит по другому механизму. Другой механизм возбуждения автоколебаний связан с низкой температурой пламени (температура пламени менее 1800 К), выбор такой температуры пламени также связан с предотвращением образования сверхнормативных концентраций NO_x . Низкая температура пламени означает существенное уменьшение скорости распространения пламени, или, иными словами, усиление влияния скорости вовлечения свежей топливовоздушной смеси в зону горения на полноту сгорания топлива, при превышении предельно допустимой нагрузки на фронт пламени возможно локальное погасание фронта пламени. Наиболее мощным механизмом, способным увеличить скорость вовлечения свежей топливовоздушной смеси в фронт пламени, является образование крупномасштабных вихревых структур. Крупномасштабные вихревые структуры на срезе горелочного устройства способны захватывать свежую топливовоздушную смесь и переносить ее через фронт пламени без горения. После распада крупномасштабных вихревых структур происходит быстрое выгорание топливовоздушного пакета с тепловыделением. Совпадение этого тепловыделения по фазе с пульсациями давления приводит к возбуждению автоколебаний. Синхронизация отрыва крупномасштабных вихревых структур с кромки горелки с пульсациями давления происходит через поле акустических колебаний скорости, синхронизированных с пульсациями давления.

В случаях, когда часть расхода топлива подается непосредственно в зону горения для поддержания факела предварительно подготовлен-

ной топливовоздушной смеси, такая подача топлива также может провоцировать возбуждение автоколебаний из-за малого объемного расхода диффузионного топлива. Низкая скорость струи диффузионного топлива облегчает захват очень богатой топливовоздушной смеси крупномасштабными вихревыми структурами и трансляцию их через фронт пламени и зону обратных токов до места распада, где и происходит в основном сгорание богатого топливовоздушного пакета.

Механизмы обратной связи, вызванные крупномасштабными вихревыми структурами, обычно плохо поддаются управлению, поэтому основными методами подавления автоколебаний в малоэмиссионных камерах сгорания являются создание пассивных резонансных контуров, поглощающих акустическую энергию, и уменьшение времени смешения топлива с воздухом.

В целом автоколебания в малоэмиссионной камере сгорания связаны с появлением упорядоченных структур в поле пульсаций температуры, как показано на рис. 2. Для управления такими структурами необходимо знать скорость в горелочном устройстве в зависимости от режима работы ГПА и коэффициента избытка воздуха в камере сгорания. При неизменяемой геометрии камеры сгорания время смешения изменяется вместе с изменением среднемаховой скорости в горелочном устройстве.

Наилучшие характеристики камеры сгорания можно получить при законе регулирования – скорость в камере сгорания постоянная, коэффициент избытка воздуха в камере сгорания постоянный.

Для детального анализа возможных технических решений необходимо изучить линию рабочих режимов камеры сгорания в составе двигателя.

Линия рабочих режимов камер сгорания представляет собой зависимость следующих параметров как функции переменной, однозначно определяющей рабочий режим ГТД, в качестве такой переменной может выступать мощность, снимаемая с ГТД, или температура на выходе из силовой турбины (для случая регулирования по закону постоянства оборотов ТВД): расход воздуха, расход топлива, температура в камере сгорания, давление в камере сгорания.

Наибольшие проблемы вызывает экспериментальное определение расхода воздуха, поступающего в камеру сгорания.



Рис. 2. Механизмы возбуждения автоколебаний в малоэмиссионной камере сгорания

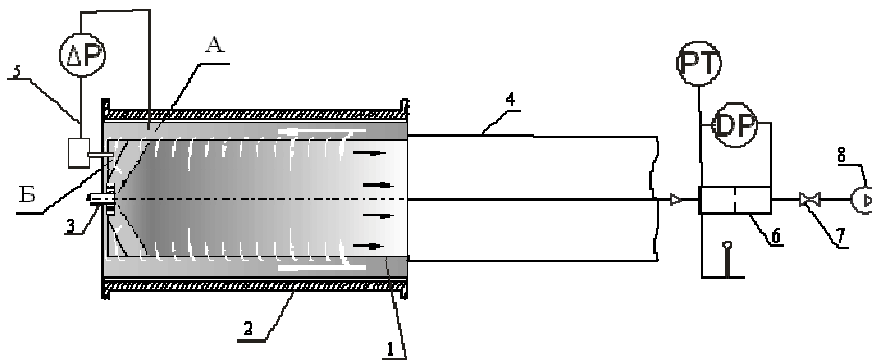


Рис. 3. Принципиальная схема стенда для измерения зависимости перепада давления между точками А и Б и расходом воздуха: 1 – жаровая труба, 2 – корпус камеры сгорания, 3 – форсунка, 4 – мерный участок, 5 – отбор перепада давления, 6 – расходомер, 7 – дроссельная заслонка, 8 – вакуум-насос

В данной работе предлагается следующая методика определения расхода воздуха:

- в качестве устройства, по падению давления на котором определяется расход воздуха, выбрана жаровая труба.
- в лабораторных условиях, как показано на рис. 3, определяется зависимость перепада на стенке жаровой трубы от расхода воздуха через камеру сгорания.

Условный коэффициент гидравлического сопротивления жаровой трубы рассчитывается по формуле:

$$\xi = \frac{(\Delta P) 2\rho F_{\text{кс}}^2}{G_{\text{в0}}^2},$$

где $G_{\text{в0}}$ – массовый расход воздуха, ΔP – перепад давления между точками А и Б, $F_{\text{кс}}$ – площадь на выходе из жаровой трубы; ρ – плотность воздуха на входе в камеру сгорания в лабораторных условиях.

В дальнейшем по данному коэффициенту определяется расход воздуха через камеру сгорания по результатам измерения перепада давления на стенке жаровой трубы.

$$G_{\text{в}} = \frac{F_{\text{кс}}}{\sqrt{\xi}} \sqrt{\frac{2\Delta P_{\text{кс}} P_{\text{кс}}}{RT_{\text{кс}}}}.$$

Положительной особенностью предлагаемого метода является возможность непосредственно определить расход воздуха в камере сго-

рания, не задаваясь процентом расхода воздуха в системе охлаждения турбины, что повышает надежность системы подавления пульсаций давления.

Особенностью системы управления ГПА ГТК-25ИР является наличие входного направляющего аппарата (ВНА) и поворотного направляющего аппарата (ПНА). На пусковых режимах работы ГПА ВНА используется для уменьшения расхода воздуха, что позволяет уменьшить коэффициент избытка воздуха в камере сгорания. На основных режимах работы ПНА используется для обеспечения постоянных оборотов турбины высокого давления. На режиме порядка 70 % мощности начинается регулирование расхода воздуха изменением проходного сечения на входе в компрессор с помощью ВНА. Подробно режимы запуска и прогрева ГПА показаны на рис. 6. Особенности системы управления ГПА приводят к малым изменениям

скорости в горелочном устройстве при изменении нагрузки ГПА с холостого хода до максимального режима работы (как показано на рис. 7).

Для определения необходимых времен смешения топливоздушной смеси в горелочном устройстве, необходимо определить собственные частоты тракта камеры сгорания. На рис. 8 представлены собственные моды продольных колебаний в камере сгорания ГТК-25ИР, более высокочастотные моды продольных колебаний гасятся возрастающим с частотой колебаний поглощением на сопловом аппарате турбины высокого давления.

Полученные моды колебаний хорошо согласуются с замеренными на экспериментальном стенде для одnogорелочного отсека камеры сгорания (экспериментальные значения $300 \pm \pm 30$ Гц, 600 ± 30 Гц).

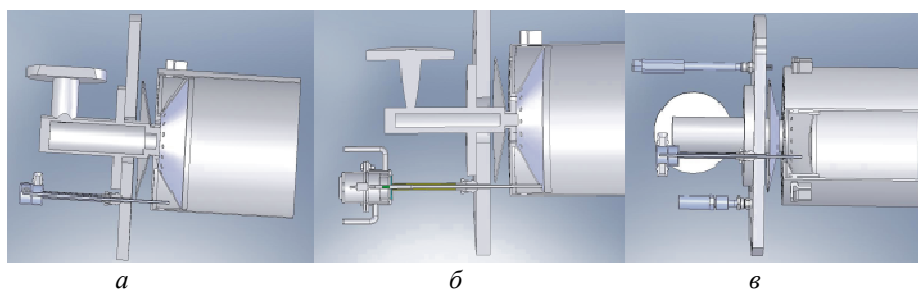


Рис. 4. Схема измерительного комплекса установленного на ГПА ГТК-25ИР при проведении испытаний: *а* – размещение зонда перепада давления в камерах сгорания № 1..12, *б* – размещение зонда пульсаций давления в камере № 8, *в* – размещение зонда полного давления в камере

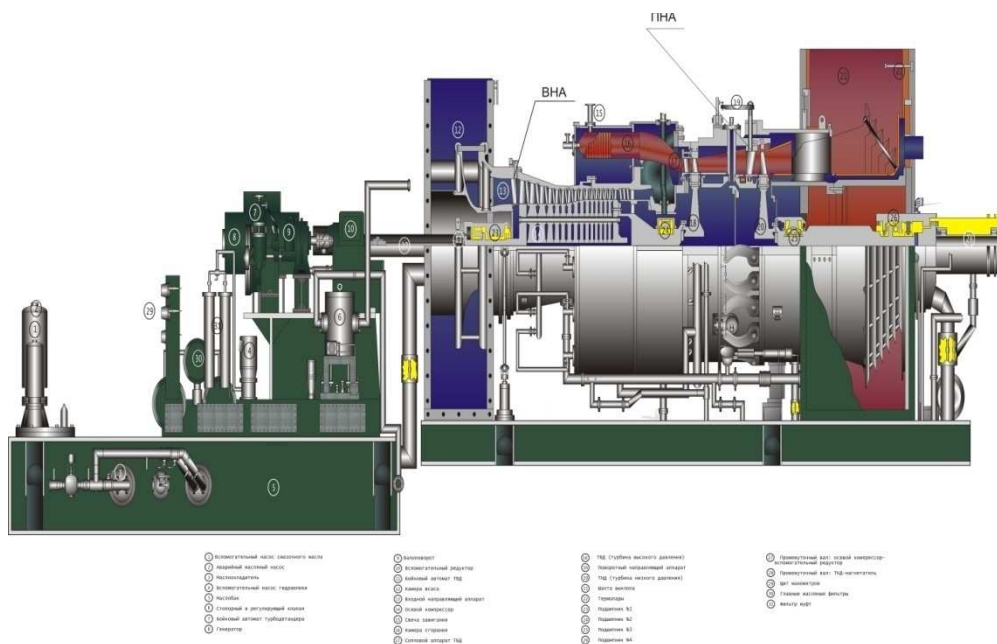


Рис. 5. Схема аппарата ГПА ГТК-25ИР

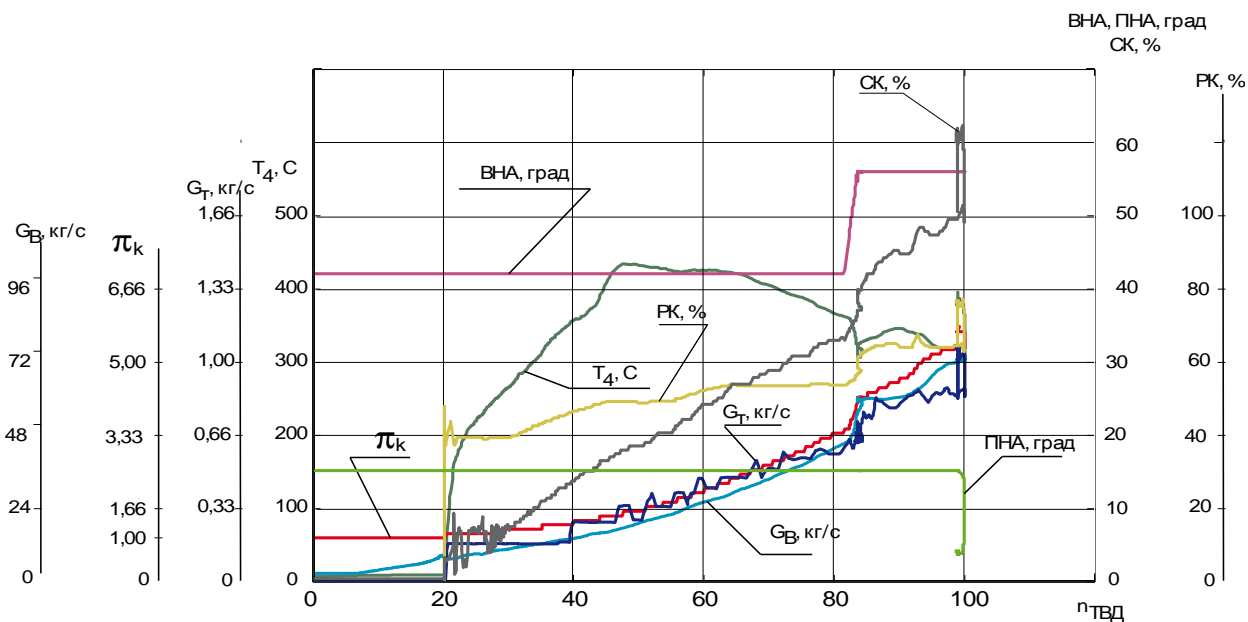


Рис. 6. Результаты измерений параметров ГПА ГТК-25ИР на режимах запуска и прогрева

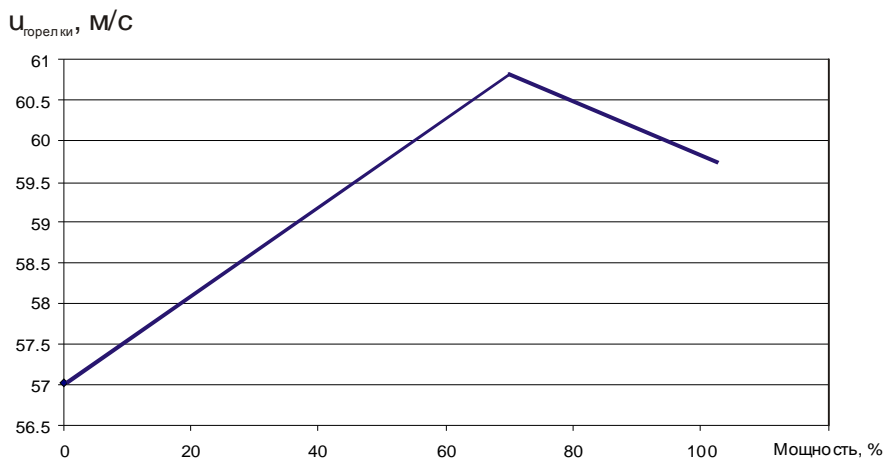


Рис. 7. Зависимость среднемассовой скорости в горелочном устройстве ($u_{горелки}$) от мощности вырабатываемой ГПА

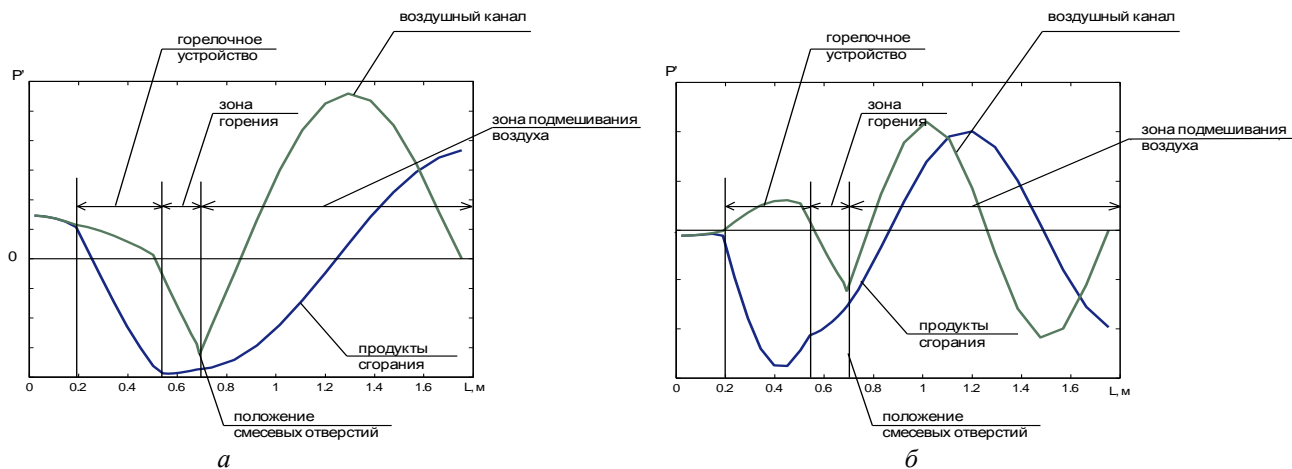


Рис. 8. Собственные моды колебаний давления в камере сгорания ГТК-25ИР:
 а – частота 315Гц, б – частота 568Гц

Проектирование малоэмиссионной камеры сгорания осложняется тем, что собственные частоты камеры сгорания достаточно высокие для подавления уменьшением времени смешения, поскольку это приводит к временам смешения меньше предельно допустимых из условия снижения эмиссии NO_x , и в тоже время собственные частоты недостаточно высокие для подавления автоколебаний с помощью четверть волновых трубок и профилирования горелочного устройства из-за большой длины волны на данных частотах колебаний. Действительно, для подавления автоколебаний необходимо время смешения не превышающее $1/4f \approx 0,8$ мс, где f – собственная частота колебаний. Из опыта создания малоэмиссионной камеры сгорания для ГТК-10ИР с примерно похожими давлениями и температурами на входе в камеру сгорания, требуемое время смешения для обеспечения заданной эмиссии оксидов азота не должно быть меньше 1мс, при этом длина шумопоглощающих элементов должна быть не менее 400 мм, что усложняет компоновку камеры сгорания.

Выявленное противоречие потребовало изменить конструкцию горелочного устройства по сравнению с применяемым на ГТК-10ИР. Предложенная конструкция горелочного устройства представлена на рис. 9.

В действительности, пульсации концентрации топлива и времена смешения неоднородны по сечению горелки, наибольшее значение с точки зрения устойчивости к возбуждению автоколебаний играет привтулочная зона горелочного устройства, в которой возбуждаемые колебаниями давления пульсации концентрации топлива не успевают сгладиться турбулентной диффузией до попадания на фронт пламени, в то время как в периферийной зоне горелочного устройства пульсации концентрации топлива не в состоянии создать ни положительной ни отрицательной обратной связи из-за большого времени смешения. Поэтому было разработано горелочное устройство с сильно утопленным центральным телом.

Другая проблема создания низкоэмиссионного горелочного устройства заключается в необходимости подавления автоколебаний, связанных с крупномасштабными вихревыми структурами. Ранее было показано, что распад вихревых структур происходит в месте столк-

новения закрученной струи выходящей из горелочного устройства со стенкой жаровой трубы [3]. В данной конструкции горелочного устройства для подавления эффекта воздействия крупномасштабных вихревых структур применяется эффект интерференции вихрей срывающихся с центрального тела горелочного устройства и с периферийной обечайки. Создание интерференционного эффекта обеспечивается за счет разницы путей вихревых структур.

На рис. 10 представлены экспериментальные измерения эмиссионных характеристик предлагаемой конструкции камеры сгорания в лабораторных условиях на одnogорелочном отсеке. Результаты экспериментальных исследований показывают, что разработанное горелочное устройство удовлетворяет требованиям, предъявленным к нему на основе анализа линии рабочих режимов камеры сгорания в составе ГПА.

Предлагаемая методология создания малоэмиссионной камеры сгорания для наземных ГПА состоит из следующих этапов:

1. Построение линии рабочих режимов камеры сгорания в составе ГПА
2. Определение собственных частот колебаний в камере сгорания
3. Определение потребных времен смешения исходя из ограничения на эмиссию NO_x и из ограничения на возбуждение автоколебаний в камере сгорания. Определение потребной длины акустических резонаторов.
4. В случае, если данные параметры вступают в противоречие, осуществляется совместная оптимизация расположения центрального тела и обечайки горелки относительно места удара закрученной струи об стенку жаровой трубы для создания интерференции между точками схода крупных вихрей.
5. Отработка горелочного устройства в лабораторных условиях при сохранении натурального давления в камере сгорания и среднемассовой скорости в горелочном устройстве
6. Испытание камеры сгорания в составе ГПА в натурных условиях.

Предлагаемая методология позволяет обеспечить требуемый уровень эмиссии оксидов азота при соблюдении ограничений на амплитуду пульсаций давления в камере сгорания.

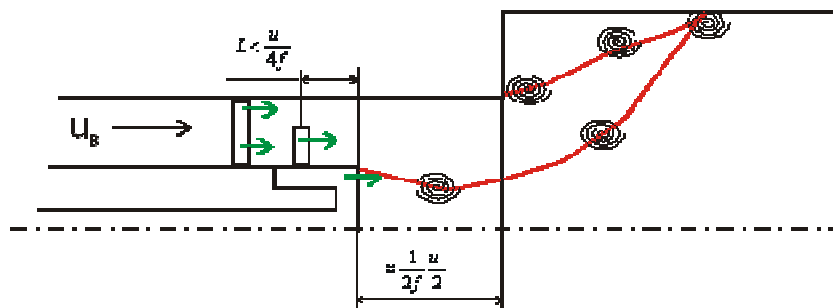


Рис. 9. Предложенная концепция малоэмиссионного горелочного устройства для ГТК-25ИР

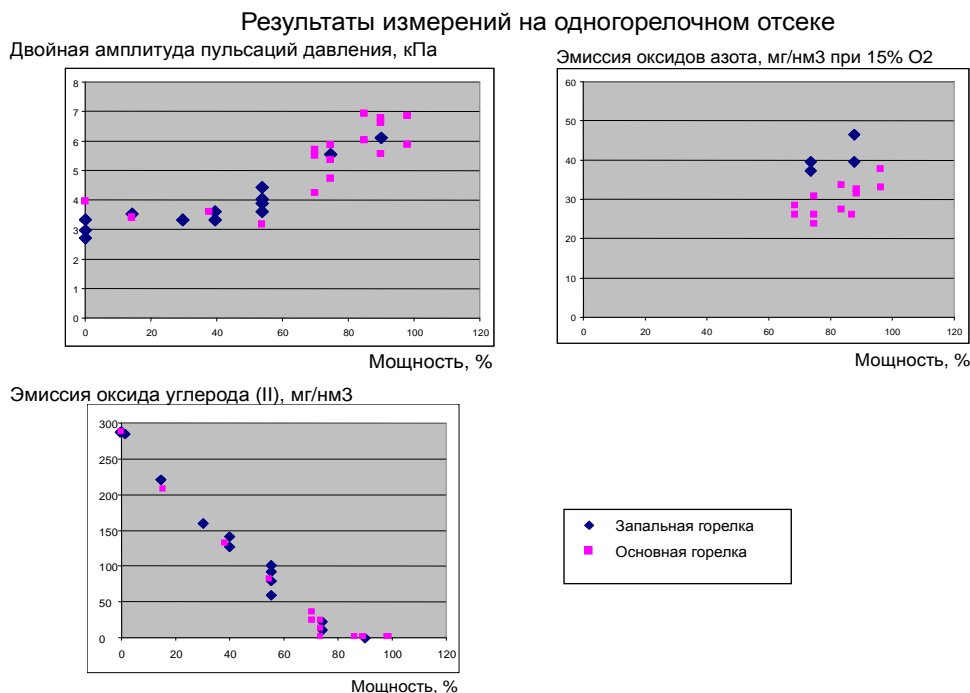


Рис. 10. Эмиссионные характеристики разработанного горелочного устройства в условиях ГПА ГТК-25ИР

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Разработка динамической модели камеры сгорания с предварительным смешением топлива / Р. С. Кашапов [и др.] // Вестник Самарск. гос. аэрокосмическ. ун-та им. акад. С. П. Королева. 2002. № 2 (2). С. 52–60.
2. Физические основы рабочего процесса камер сгорания воздушно-реактивных двигателей / Б. П. Раушенбах [и др.]. М.: Машиностроение, 1964.
3. Максимов Д. А., Скиба Д. В. Подавление автоколебаний в процессе горения предварительно подготовленной топливовоздушной смеси с большим временем смешения // Газотурбинные технологии. 2008. № 10.

ОБ АВТОРАХ

Максимов Дмитрий Александрович, дир. ООО НПФ «Теплофизика». Канд. техн. наук (УГАТУ, 1998). Иссл. в обл. образования и выгорания сажи, эмиссии оксидов азота, теории малоэмиссионных камер сгорания с предварительным смешением топлива, динамическ. неустойчивости камер сгорания с предварительным смешением топлива.

Скиба Дмитрий Владимирович, ст. науч. сотр. лаб. теплофизики горения каф. авиац. теплотехники и теплоэнергетики. Канд. техн. наук (УГАТУ, 2002). Иссл. в обл. эмиссии оксидов азота, теории малоэмиссионных камер сгорания с предварительным смешением топлива, динамическ. неустойчивости камер сгорания с предварительным смешением топлива, числ. моделирования камер сгорания с предварительным смешением топлива.