

## ИССЛЕДОВАНИЯ ДИНАМИЧЕСКОЙ НЕУСТОЙЧИВОСТИ ГОРЕНИЯ В КАМЕРЕ СГОРАНИЯ ГАЗОПЕРЕКАЧИВАЮЩЕГО АГРЕГАТА ГТК-10-4

Кашапов Р.С., Муслимов Р.Ш., Тухватуллин А.Р.

Уфимский государственный авиационный технический университет,  
Научно-производственная фирма "Теплофизика", г. Уфа

При модернизации камеры сгорания (КС) газоперекачивающего агрегата (ГПА) ГТК-10-4 с целью снижения выбросов оксидов азота  $\text{NO}_x$  и оксида углерода  $\text{CO}$  было использовано предварительное смешение топлива. Камера сгорания ГТК-10-4 имеет выносную противоточную многорелочную схему. Особенностью ГПА является наличие регенеративного подогрева воздуха. Модернизация КС заключается в следующем: в доработке фронтального устройства (установка защитного экрана – предохранение зоны горения от подачи воздуха, направленного на охлаждение стенок), смене горелок диффузионного типа на горелочные устройства (ГУ) с предварительным смешением топлива (ПСТ), изменении положения горелок относительно входного патрубка.

Разработка конструкции ГУ была осуществлена для среднестатистических параметров работы на номинальном режиме штатной камеры сгорания ГТК-10-4. Особенностью работы КС агрегатов с горелочными устройствами ПСТ является узкий диапазон работы с низким уровнем выброса  $\text{CO}$ . Так, снижение нагрузки до  $N_{\text{раг}} < 0,7 \cdot N_{\text{ном}}$  ( $T_r < 700^\circ\text{C}$ ) приводит, как правило, к выбросам  $\text{CO} > 300 \text{ мг/нм}^3$  (рис. 1). Расширение диапазона низкокомиссионной работы на режимы с пониженной мощностью сдерживается возникновением статической и динамической неустойчивости фронта пламени.

Однако, если учесть, что режим с пониженной нагрузкой будет относительно непродолжительным, то добиться устойчивой работы КС с выбросами  $\text{CO}$  не более  $300 \text{ мг/нм}^3$  можно за счет изменения гидравлического сопротивления горелок и оптимального распределения расхода воздуха через смеситель.

Следует отметить, что и на агрегатах со средними параметрами рабочего цикла при неправильном распределении расхода воздуха возможно возникновение динамической неустойчивости фронта пламени. Так, на переходных режимах работы агрегата (с момента переключения с режима диффузионного горения на режим горения предварительно подготовленной смеси) в случае подачи в камеру сгорания (КС) богатой топливо-воздушной смеси при  $\alpha < 1,65$  в КС возникают пульсации давления газа. Процесс запуска и прогрева характеризуется гулом, продолжающимся  $1 \div 30$  минут в зависимости от темпа запуска и условий работы регенератора.

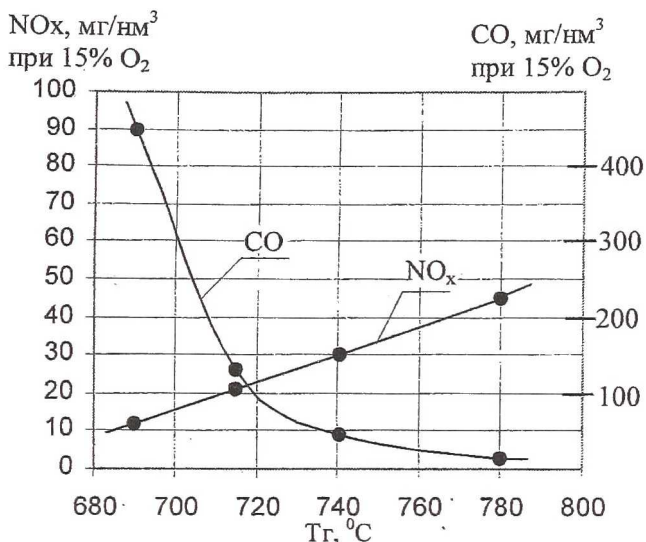


Рис. 1. Зависимость уровней  $\text{NO}_x$  и  $\text{CO}$  от температуры газов за КС

Результаты измерения пульсаций давления газа показывают, что амплитуды и частоты колебаний связаны с геометрическими размерами и акустическими характеристиками КС, а условия возбуждения определяются параметрами газозвукового потока (скорость, температура смеси и т.д.). Колебания давления, наблюдаемые в КС при горении заранее перемешанной смеси являются, как правило, моногармоническими, с определенной амплитудой и частотой. Данный вид колебаний определяется как автоколебания, амплитуда которых в широких пределах не зависит от начальных условий. Существование определенной частоты автоколебаний говорит о преобладании определенного механизма обратной связи, подводящего энергию в систему. В камере сгорания единственным источником является энергия химических связей, выделяющаяся при горении.

Существование таких колебаний возможно только при соблюдении баланса между акустической мощностью, генерируемой фронтом пламени, и мощностью акустических потерь, связанных с ускорением потока в зоне горения, диссипацией, а также при наличии определенных условий на границах системы, связанные с отражением и поглощением волн давления от системы подачи воздуха и соплового аппарата ТВД.

Многочисленные опытные исследования работы КС с горелками ПСТ позволяют утверждать, что пульсации давления в КС можно представить как стоячую волну, образованную двумя бегущими волнами. Колебания давления по тракту КС близки к гармоническим. Наличие стоячей волны и квазигармоничность колебаний связано между собой. Стоячая волна образуется двумя бегущими волнами, обладающими таким уровнем энер-

гии, что суммарный поток энергии равен нулю. Для существования квазигармонических колебаний необходимо, чтобы в каждой точке системы потери энергии за один период были малы по сравнению со всей накопленной энергией в системе либо чтобы баланс энергии выполнялся не только за цикл, но и за малую его долю. Таким образом, из квазигармоничности колебаний следует существование поля давления, близкого к полю давления стоячей волны.

Бегущие волны давления, многократно отражаясь от концов КС, усиливают энергию колебаний при проходе волны через фронт пламени. На основе предложенного в работе Раушенбаха [1] принципа возбуждения колебаний за счет переменного теплоподвода, полагаем, что развитие малых возмущений полей давления и скорости, их усиление и затухание происходит под воздействием колебания тепловыделения из-за пульсаций концентраций топлива на фронте пламени.

Мощность акустической энергии, генерируемой фронтом пламени, определяется как произведение функции разности пульсаций скорости до и после фронта пламени  $\left( \frac{k-1}{k\rho} z' \Delta H \right)$  и функции пульсаций давления на фронте пламени  $p'$ :

$$N_{\phi.n.} = \frac{k-1}{k\rho} z' \Delta H p' \quad (1)$$

Знак выражения (1) зависит от фазового угла между пульсациями концентрации топлива и пульсациями давления на фронте пламени. Можно сделать вывод, что фронт пламени вместе со смесителем ГУ может представлять собой как усилитель, так и глушитель колебаний давления в КС в зависимости от фазового соотношения между пульсациями давления и восстановленной концентрации топлива:

$$z = \frac{1}{1 + \alpha L_0} \quad (2)$$

Проблема подавления автоколебательных процессов в КС с предварительным смешением топлива актуальна и сейчас. От того, каким образом решается эта проблема (например, применением дорогих и ненадежных систем контроля фронта пламени или применением пассивных систем подавления), зависят производственные расходы, связанные с разработкой, эксплуатацией и ремонтом КС.

В данном случае авторы выбрали наиболее простой и надежный способ подавления автоколебаний — за счет изменения геометрии системы подвода воздуха и подбора оптимального времени запаздывания. Рассмотрим более подробно данный способ. Схема системы подвода воздуха представлена на рис. 2.



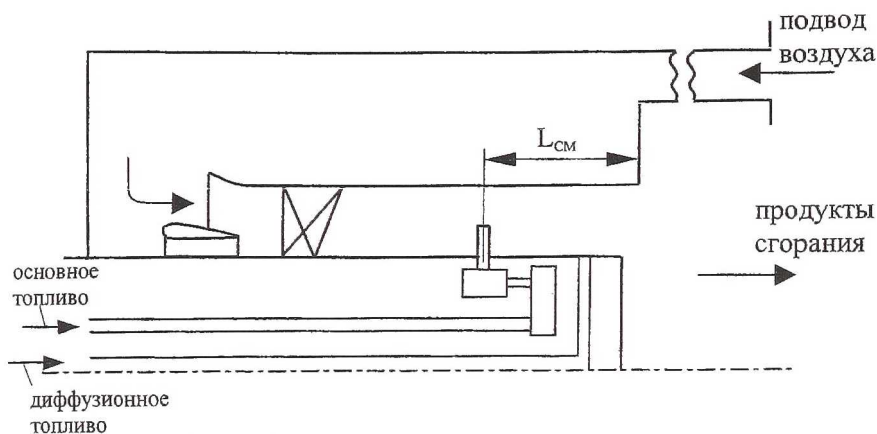


Рис. 2. Схема системы подвода воздуха

Изменение фазового сдвига между колебаниями давления на срезе ГУ и волнами давления, направленными от фронта пламени к смесителю возможно за счет подбора времени запаздывания. Время запаздывания, в рассматриваемой схеме, определяется как время от момента поступления топлива через пилон до его сгорания на фронте пламени, и зависит, главным образом, от длины смешения и скорости смеси. При увеличении времени запаздывания подачи смеси, что происходит при уменьшении расхода воздуха через горелочное устройство или уменьшении температуры воздуха перед КС, возможен фазовый сдвиг между моментами максимального тепловыделения и максимального уровня давления в сторону усиления автоколебательного процесса. Лабораторные испытания показали, что увеличение расхода воздуха через горелочные устройства (т.е. была увеличена скорость смеси в зоне смешения и соответственно уменьшено время запаздывания) приводит к снижению уровня колебаний давления и их продолжительности. Так же в работе проводилось варьирование временем запаздывания за счет изменения длины смешения и регулирования гидравлического сопротивления ГУ ПСТ. Таким образом, даже в случае низкой эффективности работы регенератора (пониженная температура на входе в КС) за счет подбора параметров горелок ПСТ и соответствующего распределения воздуха по контурам КС можно обеспечить устойчивую и безопасную работу агрегата ГТК-10-4.

Опыт эксплуатации агрегата с горелочными устройствами ПСТ показал, что и в случае работы горелки на расчетных режимах, возможно появление вибрационного горения на режиме запуска и прогрева, то есть в момент перехода с диффузионного режима на предварительное смешение топлива появляются колебания давления. Частота пульсаций давления при этом соответствует первой гармонике собственных частот горячей части камеры сгорания.

Применяя описанную выше методику, то есть: произведя распределение воздуха по контурам КС и оптимизацию гидравлического сопротивления проточной части смесителя ГУ, авторами был проведен ряд экспериментов с различными длинами смесителя на ГПА ГТК-10-4. Результаты исследований приведены в табл. 1, 2.

Таблица 1

Результаты испытаний ГУ ПСТ-100 на переходных режимах в условиях ГПА ГТК-10-4 №38 КС "Москово", ООО "Баштрансгаз"

Длина смесителя ГУ, мм	Геометрия диффузионного контура	Относительный расход дифф. топлива (начальный), %	Двойная амплитуда колебаний, мм. в. ст.	Частота колебаний, Гц	Длительность колебательно-го процесса, мин.
155	20 отв. Ø3,5	65	2200	120	25÷30
155	10 отв. Ø3,5	65	2200	120	25÷30
85	20 отв. Ø3,5	65	1500	120	10
60	20 отв. Ø3,5	65	2200	120	2,5
60	10 отв. Ø3,5	24	2000	120	2

Таблица 2

Результаты измерений выбросов на основных режимах работы при различных длинах зоны смешения ГУ в условиях ГПА ГТК-10-4 КС "Москово", ООО "Баштрансгаз"

Параметры на основном режиме работы ГПА ГТК-10-4 (режим ПСТ)				
Выбросы СО, мг/нм <sup>3</sup>	Выбросы		Т <sub>тнд</sub> , °С	Р <sub>ок</sub> , ати
	NO <sub>x</sub> , мг/нм <sup>3</sup>	СО, мг/нм <sup>3</sup>		
155	32,7	24,5	490	2,4
85	41,3	13,4	500	2,2
60	54,5	2,1	495	2,5

На основных режимах работы КС в условиях ГПА ГТК-10-4, после этапа прогрева, пульсации давления отсутствуют.

Несмотря на то, что используемая методика позволила снизить уровень и продолжительность пульсаций давления, авторам не удалось с помощью нее установить все существующие причины возникновения автоколебаний.

В настоящее время механизм (возможно даже механизмы) поддержания неустойчивости горения на переходных режимах в КС с предварительным смешением топлива в мировой практике не изучен достаточно глубоко. При этом объяснения многих решаемых проблем, связанных с подавлением неустойчивости горения, носят гипотетический характер.

Одна из гипотез, предложенная авторами, предполагает влияние пусковой диффузионной топливной магистрали ГУ ПСТ на процесс возникновения пульсаций давления. Так, исследование влияния топливной магистрали другой низкоэмиссионной КС (агрегата ГТК-10И) позволили установить, что определяющую роль в возникновении кратковременных пульсаций давления играют акустические параметры пусковой топливной магистрали ГУ ПСТ. Топливная магистраль для подачи пускового топлива после прекращения подачи через нее газа превращается в резонатор с избирательной частотой. Причем, если условия в горячей части КС (температура продуктов сгорания, состояние поверхности турбинных вставок) позволяют получить достаточно мощную акустическую волну, то она может инициировать автоколебательный процесс. Подпитка энергии этого процесса осуществляется за счет периодического выброса топлива из пусковой магистрали, и процесс будет происходить до тех пор, пока емкость пусковой магистрали полностью не заполнится воздухом или топливовоздушной смесью, неспособной существенно повлиять на уровень тепловыделения в зоне горения. Следует отметить, что прекращение автоколебательного процесса с течением времени происходит, возможно, и за счет вытеснения топлива и заполнения воздухом пусковой магистрали, прогрева ее части, в результате чего изменяются параметры среды, определяющие акустические характеристики этого объема. Пусковая магистраль при этом превращается из резонатора в обычную емкость и подпитка механизма автоколебаний давления прекращается.

Вопрос о механизмах возбуждения неустойчивости горения и методах подавления этой неустойчивости остается открытым, и авторами ведутся дальнейшие исследования по этой проблеме.

#### Список литературы

1. Раушенбах Б.В. Вибрационное горение. – М.: Физматгиз, 1961. –500 с.
2. Кашапов Р.С., Максимов Д.А., Тухбатуллин Ф.Г. Опыт создания горелочного устройства с предварительным смешением топлива для камеры сгорания газоперекачивающего агрегата ГТК-10-4 со "сверхнизким" уровнем эмиссии  $\text{NO}_x$  // Тезисы научно-технической конференции "Физико-химические проблемы экологии энергоустановок на углеродных топливах". –М.: ЦИАМ, 1995. –с.1.
3. Тухбатуллин Ф.Г., Кашапов Р.С. Малотоксичные горелочные устройства газотурбинных установок. –М.: Недра, 1997. –160 с.
4. Некоторые аспекты проблемы создания камеры сгорания с сверхнизким уровнем выбросов  $\text{NO}_x$  //Кашапов Р.С., Максимов Д.А., Скиба Д.В., Куликов С.В., Баштанников М.Н. // Тезисы Всероссийской научной конференции "Физико-химические проблемы сжигания углеводородных топлив". –М.: ЦИАМ, 1998. –с.9-10.