

РЕЗУЛЬТАТЫ ИСПЫТАНИЙ КАМЕРЫ СГОРАНИЯ ГТД ДГ80 С НИЗКО- ЭМИССИОННЫМ ГОРЕЛОЧНЫМ УСТРОЙСТВОМ НА БАЗЕ ТРУБЧАТЫХ МОДУЛЕЙ

Виконано огляд напрямків створення низькоемісійних камер згорання з урахуванням сучасних тенденцій розвитку газотурбінних технологій. Обґрунтовано й показано перспективність реалізації при створенні малотоксичних камер згорання на основі використання унікальних конструктивних й аеродинамічних особливостей “насадка Борда” (трубчастий модуль). Досліджено характеристики камери згорання з палинковим пристроєм на базі трубчастих модулів

Ключові слова: камера згорання, палинковий пристрій, трубчасті модулі

Выполнен обзор направлений создания низкоэмиссионных камер сгорания с учетом современных тенденций развития газотурбинных технологий. Обоснована и показана перспективность реализации при создании малотоксичных камер сгорания на основе использования уникальных конструктивных и аэродинамических особенностей «насадка Борда» (трубчатый модуль). Исследованы характеристики камеры сгорания с горелочным устройством на базе трубчатых модулей

Ключевые слова: камера сгорания, горелочное устройство, трубчатые модули

The present article gives the survey of the main streams in designing of low-emission combustion chambers with taking into account the modern trends of the gas turbine technologies development. Perspectives of the low-emission combustion chambers development based on application of unique design and aerodynamic mains lice “Bord nozzle” (tube module) are describes and justified. Characteristics of combustion chamber with burner on the basis of pipe modules were investigated

Key words: combustion chamber, burner of pipe modules, tube module

Г.Н. Любчик

Доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой
Кафедра промышленных ГТУ*
Контактный тел.: 8 (044) 241-75-94

Г.Б. Варламов

Доктор технических наук, профессор, проректор*
Контактный тел. 8 (044) 236-42-52
*Национальный технический университет «Киевский политехнический институт»
пр. Победы 37, г. Киев, Украина, 030307

В.В. Романов

Кандидат технических наук, технический директор**

В.Г. Ванцовский

Ведущий инженер-конструктор, начальник отдела
Отдел камер сгорания**

В.В. Вилкул

Инженер-конструктор I категории
Отдел камер сгорания**
**ГП НПКГ «Зоря»-«Машпроект»
пр. Октябрьский, 42а, г. Николаев, Украина 54018
Контактный тел.: 8 (0512) 49-74-11

Рост КПД ГТД простой схемы предопределяет повышение давления и температуры компрессорного воздуха с одновременным возрастанием «адиабатичности» камеры сгорания, что, как следствие, приводит к увеличению эффективной температуры в зоне горения.

Вместе с существенным снижением общего коэффициента избытка воздуха и ограничением подачи воздуха в зону горения возникают проблемы, связанные с ростом эмиссии NOX и охлаждением элементов конструкции камер сгорания высокотемпературных ГТД.

У ГТУ с регенеративным циклом, проблемы, связанные с повышением давления воздуха и низким стехиометрическим соотношением в камеры сгорания отпадает, но остается проблема существенного регенеративного повышения температуры компрессорного воздуха, что также может быть причиной роста эмиссии NO_x и повышения температуры элементов конструкции камеры сгорания.

Наиболее распространенным направлением в разработке низкоэмиссионных камер сгорания ГТУ является технология сухого подавления эмиссии NO_x , которая получила название DLN-технологии (от Dry Low NO_x). Она предполагает организацию горения во фронтном устройстве камер сгорания предварительно подготовленной бедной топливно-воздушной смеси. Применение повышенных избытков воздуха на фронтных устройствах газотурбинных камер сгорания является существенным фактором снижения эмиссии NO_x не только при предварительном, но и при диффузионном смесеобразовании.

Для высокотемпературных ГТУ неизбежность снижения общего избытка воздуха и необходимость увеличения доли его подачи на охлаждение жаровой трубы и лопаточный аппарат турбины вступает в противоречие с требованиями повышения доли воздуха, подаваемого на горение (независимо от способа смесеобразования). Это противоречие может быть преодолено за счет отказа от традиционных смесителей и ввода основного количества воздуха через фронт, в результате чего еще более возрастает роль горелочно-го устройства в организации рабочего процесса камер сгорания ГТУ.

Перспективность использования технологии бедного горения в сочетании с предварительным смесеобразованием для существенного снижения эмиссии NO_x была теоретически и экспериментально обоснована циклом исследований, выполненных сотрудниками Йельского университета (США) под руководством S.M. Correa [1, 2]. При этом было доказано, что в низкотемпературном пламени ($T < 1800 \text{ K}$) основным механизмом NO_x является механизм эмиссии «быстрых» NO , а в высокотемпературном преобладает механизм образования термических NO . Для последних имеет место сильная зависимость эмиссии от температуры и давления ($\text{NO} \sim p^{1/2}$) и практически отсутствует влияние давления на эмиссию «быстрых» NO_x . Этот факт является определяющим в условиях работы высокотемпературных камер сгорания ГТУ, где давление может достигать 3 МПа.

Накопленный практический опыт использования DLN-технологии снижения эмиссии оксидов азота в камерах сгорания ГТУ указывает на широкие возможности данной технологии и многовариантность ее реализации [3].

Одной из разновидностей DLN-технологии является организация горения по технологии SOLO- NO_x (рис.1) которая используется фирмами Solar, Rolls-Rouse, Siemens [4] реализуется распределенный по радиусу (после регистра горелки) подвод топлива при повышенных избытках воздуха, что обеспечивает достаточно высокий уровень гомогенизации горючей топливно-воздушной смеси (при высокой неоднородности состава в окружном направлении) и снижение среднего уровня температур в первичной зоне.

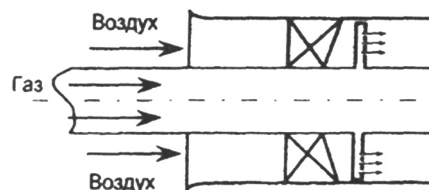


Рис. 1. Схема горелки по (SOLO – NO_x) – технологии [4]

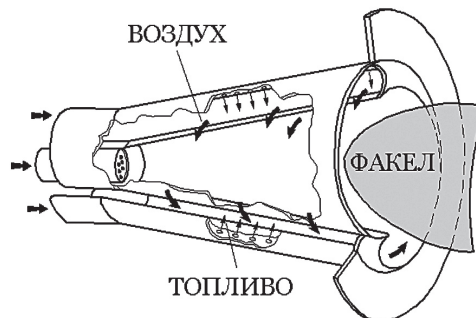


Рис. 2. Схема EV-горелки [5]

Следствием этого является понижение уровня эмиссии NO_x в узком диапазоне режимов работы по коэффициенту избытка воздуха. Эмиссия NO_x при $\text{O}_2 = 15\%$ и ($\alpha \sim 1,7$) составляет 20 мг/м^3 . Результаты испытаний горелочного устройства фирмы Solar, показали, что при увеличении избытка воздуха выше приведенного уровня резко возрастает эмиссия CO .

При $\alpha > 2,0$ концентрация CO в продуктах сгорания, приведенная к $\text{O}_2 = 15\%$, достигает 100 мг/м^3 , что может быть причиной повышенного химического недожога топлива, а при уменьшении избытка воздуха ниже приведенного уровня не только существенно возрастает эмиссия NO_x , но и проявляются проблемы, связанные с появлением вибрационного горения, срывом и проскоком пламени. Фирмы Solar, Rolls-Royce, Siemens и др. устраняют указанные проблемы с помощью сложных систем регулирования состава смеси в зоне горения, систем активного и пассивного подавления акустических колебаний, применения изменяемой геометрии камер сгорания и проточной части компрессора. Недостатки данной технологии определяют необходимость поиска других направлений минимизации токсичности горелочных устройств для камер сгорания ГТУ.

В этом отношении показательным является эволюционный путь разработок ГТУ (в том числе и камер сгорания к ним), пройденный фирмой АВВ [5] за 1973-1993 г.г. За указанный период фирма АВВ достигла повышения начальной температуры перед турбинами от 820 до 1370 К и увеличения КПД ГТУ (простого цикла) от 28 до 35,7 %. При этом особое внимание уделялось модернизации и реконструкции камер сгорания ГТУ. В этом направлении фирма прошла путь от использования камер сгорания с традиционными горелками диффузионного типа (первое поколение ГТУ) до применения горелок по SOLO- NO_x -технологии (на одном из промежуточных этапов) и перехода на DLN-технологии в результате разработки EV-горелок. При этом было достигнуто 10-кратное снижение уровня эмиссии NO_x (от 500 до 50 мг/м^3).

EV-горелка фирмы АВВ представляет собой конусное топливосжигающее устройство, работающее на газообразном и жидком топливе (рис. 2). При сжигании газообразного топлива осуществляется многоструйная подача его во внутреннюю (между образующими конуса щелевой канал) полость и последующий вихревой (тангенциальный) подвод горючей смеси в зону горения.

Рассматриваемая технология организации рабочего процесса не лишена недостатков. Так, если в кольцевой камере сгорания газотурбинной установки GT10 мощностью 22 МВт установлено 18 основных EV-горелок и одна пусковая [5], то в такой камере установки GT13 E 2 (мощностью 164 МВт) необходимо установить 72 EV-горелки. Это приводит к существенному усложнению конструкции камер сгорания и увеличению габаритов.

Одним из возможных направлений минимизации токсичности камер сгорания является трубчатая технология сжигания газа, разработанная НТУУ «КПИ» совместно с Институтом газа НАН Украины, ОАО «Укргазпроект» и ГП НПКГ «Зоря»-«Машпроект», которая основана на использовании принципов унификации, универсальности и упрощения конструктивной схемы горелочных устройств. Особенностью этой технологии является рациональное использование конструктивных особенностей и особых аэродинамических эффектов насадка Борда (трубчатого модуля) [6. 7. 8].

Выбор насадка Борда как базового элемента этой технологии обусловлен тем, что его аэродинамические характеристики способствуют реализации канонических принципов минимизации токсичности горелок (возможность применения диффузионного, предварительного и комбинированного смесеобразования с одновременной организацией стадийного горения, прямооточность аэродинамической схемы и др.).

Особенностью использования трубчатых модулей является их универсальность с точки зрения возможных компоновочных решений и различных схем смесеобразования.

Апробация возможности использования трубчатой технологии сжигания газа в камерах сгорания ГТУ осуществлена при модернизации камеры сгорания ГТК-10 НЗЛ и в результате проведения стендовых испытаний модели камеры сгорания (оснащенной трубчатой горелкой) двигателя ДГ-80 производства ГП НПКГ «Зоря-Машпроект».

В первом случае работа, связанная с модернизацией камеры сгорания ГТК-10 НЗЛ, была выполнена в системе УМГ Киевтрансгаз на Бердичевской компрессорной станции.

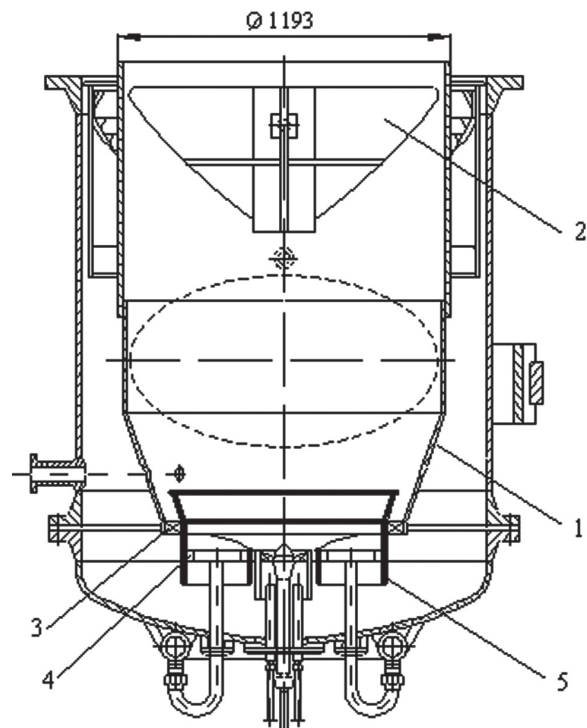
Модернизации подлежала камера сгорания регенеративного газоперекачивающего агрегата (ГПА), уровень эмиссии оксидов азота в которой, является наивысшим среди всех ГПА, находящихся в состоянии эксплуатации на компрессорных станциях России, Казахстана, Узбекистана, Таджикистана и Украины. Эмиссия токсичных выбросов оксидов азота NO_x (при $\alpha = 3,5$) достигает $700...800 \text{ мг/м}^3$.

Повышенная эмиссия NO_x определяется как износом оборудования, так и существующими конструктивными недостатками отдельных его элементов, в том числе и камеры сгорания, проточная схема зоны

горения и смесеобразования которой представлена на рис. 3-а.

Особенностями конструкции камеры сгорания ГПА ГТК-10, являются возникающие три четко выраженные вихревые аэродинамические структуры:

- система из семи локальных закрученных факелов в первичной зоне горения, формируемая центральной и шестью периферийными регистровыми горелками;
- закрученный поток в пристенной зоне жаровой трубы, образованный кольцевым регистром - интенсификатором ее охлаждения;
- трехмерное вихревое течение, образованное лопаточным аппаратом смесителя и системой плоских, соударяющихся струй в зоне вихревого аэродинамического смесителя.



а)



б)



в)

Рис. 3. Продольный разрез камеры сгорания ГПА ГТК-10 (а) и общие виды регистра центральной дежурной горелки (б) и одной из шести основных периферийных горелок трубчатого типа (в): 1 - коническая обойма фронтного устройства; 2 - вихревой аэродинамический смеситель; 3 - кольцевой лопаточный регистр 4 - трубчатая горелка; 5 - обечайка

Явно выраженная «вихревая» концепция камеры сгорания является причиной повышенного ее аэродинамического сопротивления, а неоднородность термической структуры потока является причиной повышенного ее термического сопротивления, а локальные высокотемпературные зоны в первичной зоне смесеобразования и горения являются источниками повышенной эмиссии оксидов азота.

Дополнительными факторами, определяющими высокий уровень эмиссии NOx в камере сгорания ГТК-10, являются: большое время пребывания продуктов реакции в зоне горения в результате ее вихревой структуры и низкой тепловой форсировки ее объема ($q^V \approx 70 \text{ Вт/м}^3\cdot\text{Па}$), а также низкий уровень избытка воздуха в первичной зоне горения ($\alpha_1 \rightarrow 1,15$).

В основу технического предложения по модернизации камеры сгорания ГТК-10 НЗЛ было принято преобразование вихревой структуры первичной зоны горения в прямооточную на основе применения трубчатой технологии сжигания газа.

В данном случае (рис. 3-в), трубчатые горелки состоят из прямооточных модулей (насадок Борда), совокупность которых позволяет реализовать все известные канонические методы минимизации эмиссии оксидов азота в сочетании с высокой эффективностью выгорания топлива.

Зона горения, создаваемая такой горелкой, представляет собой микрофакельную систему, обеспечивающую высокую эффективность смесеобразования и выгорания топлива, высокую аэродинамическую и термическую однородность структуры потока при минимальном уровне потерь давления в камере сгорания.

По результатам проведенных сравнительных эксплуатационных испытаний ГПА ГТК-10 НЗЛ (ст. №1) с двумя вариантами фронтного устройства, оснащенного штатными регистровыми горелками и оптимизированными трубчатыми, установлена возможность одновременного улучшения показателей надежности эксплуатации, повышения экологической и энергетической эффективности.

Зафиксирована безотказность и «мягкость» запуска модернизированной камеры сгорания, высокая эффективность работы ГПА во всем диапазоне режимов эксплуатации без переоснастки системы регулирования.

Кроме того, установлено снижение среднего уровня температур газов перед турбиной высокого давления (ТВД) и за турбиной низкого давления (ТНД), а также уровня неравномерности температурного поля перед ТВД при одинаковой эффективной мощности.

Результат опытной промышленной эксплуатации положителен, что подтверждает правильность принятых технических и конструктивных решений. Дает хорошую научно-техническую основу для внедрения данной технологии как для модернизации существующих камер сгорания ГТД, так и для вновь проектируемых.

В рамках научно-исследовательских работ проведенных в НТУ «КПИ» совместно с ГП НПКГ «Зоря»-«Машпроект» было разработано и изготовлено трубчатое горелочное устройство (рис. 4) для камеры сгорания газотурбинного двигателя четвертого поколения простой схемы ДГ80.

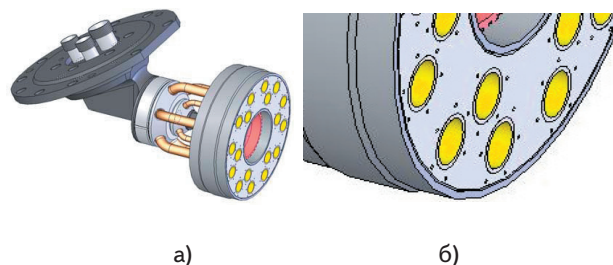


Рис.4 Общий вид (а) прямооточной трубчатой горелки и фрагмент (б) ее фронтной части

При разработке данного варианта предусматривалась полная взаимозаменяемость трубчатой прямооточной горелки и штатной регистровой горелки как по воздушному, так и по топливному трактам. Для обеспечения работоспособности топливорегулирующей аппаратуры во всем диапазоне рабочих режимов камеры сгорания, суммарная проходная площадь отверстий газораздачи соответствует существующей конструкции.

Поэтому расходные характеристики по топливному тракту остались адекватными штатному варианту горелки. В связи с увеличением проходного сечения по воздуху у трубчатой горелки достигнуто повышение достигнуто увеличение подачи воздуха в первичную зону горения, в результате чего первичный коэффициент избытка воздуха (α_1) на фронте (при номинальных условиях) возрос до уровня $\alpha_1 \approx 1,9$ в сравнении с уровнем $\alpha_1 \approx 1,75$ для регистровой штатной горелки.

В основу конструкции трубчатой горелки положен комбинированный принцип образования топливовоздушной смеси. Горелочное устройство комплектуется из 18 трубчатых модулей. В каждом трубчатом модуле подача топлива осуществляется посредством тремя газовых отверстиями, расположенными в стенках канала воздушной трубки, где осуществляется предварительное смесеобразование, и пятью отверстиями, расположенными в затененной части фронта горелки (рис. 10-б), с помощью которых обеспечивается диффузионная подача топлива в зоне горения.

Испытания проводились на полноразмерном одногорелочном отсеке камеры сгорания двигателя ДГ80 при модельных параметрах.

В результате стендовых испытаний горелочного устройства, отработан алгоритм работы камеры сгорания, который характеризуется следующими особенностями:

- на режиме запуска, выхода на холостой ход и до относительной мощности $N_e \leq 0,25 N_{ном}$ работает только первый диффузионный канал подачи топлива. При этом обеспечивается стабильный мягкий розжиг без высоких забросов температуры.

- На режимах $N_e \geq 0,25 N_{ном}$ подключается к работе кинетический канал, обеспечивая поступление предварительно перемешанной топливовоздушной смеси в зону горения.

Диффузионный канал работает в режиме дежурного факела. На режимах нагрузки $N_e = (0,25...1,0) N_{ном}$ доля топлива в первый канал составляет 5-7% от его расхода через второй кинетический канал, что обеспечивает минимальный уровень выбросов и стабильный процесс горения.

Прямоточность модернизированной горелки и некоторое перераспределение воздуха по трактам

камеры сгорания способствуют соответствующему уменьшению аэродинамических потерь полного давления (Δp_0). По результатам стендовых испытаний установлена зависимость коэффициента аэродинамического сопротивления камеры сгорания ($\zeta = \Delta p_0 / (\rho W^2 / 2)$, где $\rho W^2 / 2$ - динамического напора воздуха на входе в камеру сгорания) от подогрева ($\Delta T = T_{03} - T_{02}$, где T_{03} и T_{02} , соответственно, средняя температура продуктов сгорания и температура компрессорного воздуха) продуктов сгорания в виде известного соотношения $\zeta = \zeta_0 + b \cdot \Delta T$, где $\zeta_0 \approx 1,7$ - изотермический коэффициент аэродинамического сопротивления при отсутствии горения, $b \approx 1,65 \cdot 10^{-3}$, град - коэффициент, учитывающий дополнительное увеличение Δp_0 в результате тепловыделения в первичной зоне и в зоне дожигания камеры сгорания.

В результате огневых испытаний КС установлены следующие особенности пусковых режимов работы:

- запуск на первом (диффузионном) канале возможен в диапазоне объемных расходов $V_2 = (0,07... 0,23) \text{ м}^3/\text{с}$ и при этом КС работает устойчиво с высокой полнотой сгорания;

- розжиг КС на втором (кинетическом) канале удалось получить только при объемном расходе $V_2 = 0,165 \text{ м}^3/\text{с}$; При увеличении или уменьшении расхода воздуха от указанной величины воспламенения топлива не происходило;

- первый канал горелки обеспечивает работу КС на всех режимах, в том числе и на номинальном при подогреве $\Delta T = 800$ град.

Результаты экологической диагностики камеры сгорания с прямоточным трубчатым горелочным устройством приведены на рис. 5.

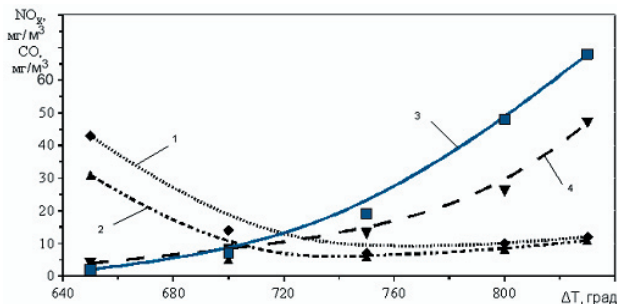


Рис. 5. Характер воздействия подогрева продуктов сгорания (ΔT) на текущую концентрацию NO_x и CO :

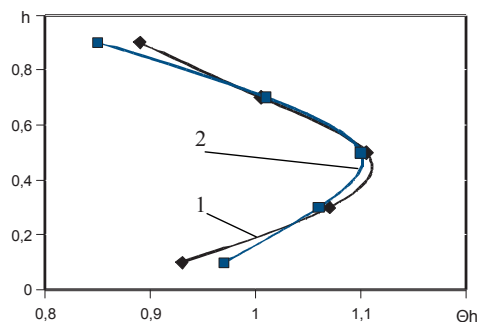
- 1 - $\text{CO} = f(\Delta T)$ при кинетическом горении;
- 2 - $\text{CO} = f(\Delta T)$ при комбинированном горении;
- 3 - $\text{NO}_x = f(\Delta T)$ при кинетическом горении;
- 4 - $\text{NO}_x = f(\Delta T)$ при комбинированном горении

Из приведенных на рис. 5 данных видно, что воздействие подогрева в камере сгорания (ΔT) на текущую концентрацию NO_x и CO имеет противоположный характер, причем, при возрастании подогрева эмиссия оксидов азота возрастает, а оксида углерода падает, что совпадает с общепринятыми представлениями воздействия ΔT (или коэффициента избытка воздуха ($\alpha \sim 1/\Delta T$)) на рассматриваемые показатели токсичности продуктов сгорания. Кроме того, имеет место расслоение характеристик эмиссии $\text{NO}_x = f(\Delta T)$

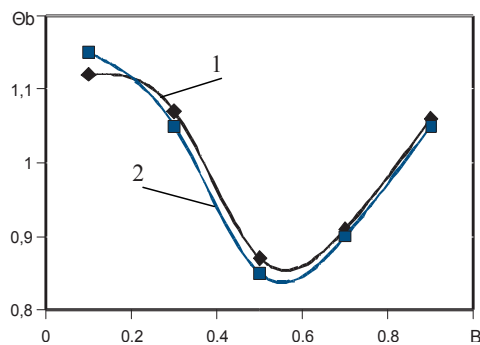
и $\text{CO} = f(\Delta T)$ при полностью кинетическом и комбинированном горении.

Из двух рассматриваемых вариантов организации сжигания топлива комбинированное горение является предпочтительным, так как в данном случае достигается одновременная минимизация эмиссии NO_x и CO . При этом, на номинальном режиме работы (при величине подогрева $\Delta T = 800$ град) уровень выбросов оксидов азота $\text{NO}_x = 45 \text{ мг}/\text{м}^3$, а при комбинированном сжигании составляет величину порядка $32 \text{ мг}/\text{м}^3$, а уровень выбросов CO - порядка $(10...15) \text{ мг}/\text{м}^3$.

При выполнении стендовых испытаний фиксировались характеристики, определяющие показатели надежности работы камеры сгорания с прямоточной горелкой трубчатого типа, на основании диагностики характера температурного поля в газосборнике (рис. 6) и распределения температуры металла стенок в различных сечениях жаровой трубы (рис. 7).



a)



b)

Рис. 6. Эпюры распределения относительной температуры продуктов сгорания (a) радиальная (b) окружная

Распределение температуры продуктов сгорания по высоте выходного сечения смесителя жаровой трубы фиксировалось с помощью 5-ти гребенок, каждая из которых была оснащена пятью платиновыми термопарами. Характеристика распределения $h = f(\theta_h)$, где $h = h_i/h_n$ - относительная координата пояса термопар, $\theta_h = (T_{icp} - T_{02}) / \Delta T$, где T_{icp} - средняя температура в i-том поясе гребенок термопар. Как видно, эпюра распределения температуры имеет характер, близкий к оптимальному при наличии перспектив его последующей доводки до оптимального

за счет соответствующего перераспределения топлива по сечению фронта горелки.

Максимальная относительная неравномерность поля температур продуктов сгорания ($\theta_{\max} = (T_{\max} - T_{02}) / \Delta T$, где T_{\max} – максимальная температура продуктов сгорания) составляла величину порядка $\theta_{\max} = (1,20 \dots 1,16)$ и практически оставалась постоянной на всех режимах работы КС при условии постоянной относительной подачи топлива на диффузионное смесеобразование.

Результаты диагностики распределения температур металла по длине жаровой трубы представлены на рис. 7.

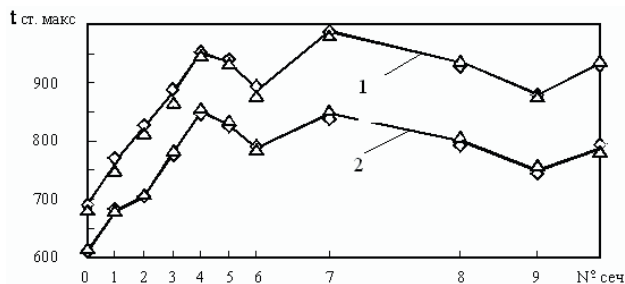


Рис. 7. Распределение максимальной температуры стенок по длине жаровой трубы:
1 – при подогреве $\Delta T = 800$ град;
2 – при подогреве $\Delta T = 650$ град

Самыми «горячими» являются сечения 4 и 7, максимальная температура в которых на режиме $\Delta T = 650$ град составляет $t_{\max} \approx 850^{\circ}\text{C}$, а на режиме $\Delta T = 800$ град: $t_{\max} \approx 960^{\circ}\text{C}$ для сечения 4 и $t_{\max} \approx 980^{\circ}\text{C}$ для сечения 7.

Визуальный осмотр трубчатого ГУ после цикла испытаний показал, отсутствие пожогов и мест с высокой температурой. Однако для более качественной оценки температурного состояния не обходимо проведение термометрирования торцевой стенки ГУ.

Выводы

1. Многообразие известных методов и средств подавления эмиссии оксидов азота в камерах сгорания газотурбинных двигателей определяются целым рядом факторов, среди которых следует отметить:

- наличие различных механизмов образования оксидов азота (термические, топливные, быстрые и каталитические);

- недостаточную изученность указанных механизмов (за исключением термического механизма образования оксида азота);

- противоречивость направлений воздействия односторонних факторов на эмиссию NOx и CO.

2. Большинство из известных методов подавления эмиссии оксидов азота характеризуются высокой сложностью их реализации, а так же специфичностью используемых приемов и методов, что делает невозможным использование накопленного опыта по подавлению эмиссии NOx. Кроме того, в большинстве случаев реализация методов подавления эмиссии NOx сопровождается нежелательными негативными эффектами, которые приводят к ухудшению условий

надежности ГТД. Это, прежде всего, относится к появлению режимов «пульсационного» горения.

3. Трубчатая технология сжигания может быть использована как при модернизации существующих, так и при проектировании перспективных камер сгорания перспективных ГТУ. В качестве положительных моментов использования трубчатой технологии можно выделить: простоту доводочных работ, возможность значительного снижения эмиссии NOx; низкий уровень CO во всем диапазоне рабочих режимов; автоматичность структуры температурного поля продуктов сгорания в широком диапазоне режимов работы КС и достаточно низкий уровень достигаемой неравномерности; отсутствие пульсационного горения; возможность снижения потерь полного давления, что способствует повышению КПД ГТУ.

Реальное применение трубчатой технологии в камерах сгорания ГТД определяется необходимостью совершенствования технологии изготовления трубчатых горелок, проведения вариантных проработок конструктивных решений горелок с последующим их энерго-экологическим диагностированием в стендовых условиях с целью оптимизации характеристик рабочего процесса и, прежде всего, усовершенствования системы охлаждения жаровой трубы.

Литература

1. Correa S.M. NOx formation in Lean Premixed Methane Flames / Report Engineering Systems Laboratory N 89CRD-001, January 1989. – 26p.
2. Leonard G., Correa S.M. NOx formation in premixed high – pressure lean methane flame // ASME/ PD Vol. 30, Sing, S.N. ED., 1990. – P. 69 – 74.
3. Г.Н. Любчик и др. Когенерационно-утилизационные технологии на базе ГТУ/Под ред. Г.Н. Любчика и Л.Б. Чабановича.- К.: Варта. - 2008.- 188 с.
4. Кашапов Р.С. Концепция создания маллоэмиссионной камеры сгорания// Газотурбинные технологии. – 2000. – №4. – с. 16-19.
5. Любчик Г.Н., Микулин Г.А., Варламов Г.Б. и др. Использование конструктивных особенностей и аэродинамических эффектов насадка Борда при создании малотоксичных топливосжигающих модулей // Технол. системы. – 2002. – Вып. 1, № 2 (13). - С. 130-133.
6. Любчик Г.М., Варламов Г.Б., Говдяк Г.Б. и др. Новая технология створення камер згорання ГТУ на базі трубчатих модулів // Праці VII Між-нар. наук.-практ. конф. «Нафта і газ України 2002», Київ, 2002 р. - К. , 2002. - С. - 27-29.
7. Сударев А.В., Маев В.А., Веселовский В.А. Газотурбинные камеры сгорания конструкции НЗЛ // Турбо- и компрессоростроение / Под ред. В.А.Елисева. – Л. : Машиностроение, 1970. –
8. Любчик Г.Н. и др. Экологический аудит газогорелочных устройств на основе применения базовых характеристик эмиссии NOx и CO// Экологические и ресурсосбережение.- 2007.- № 4. – С. 64-70.