

*В данной работе проведено экспериментальное определение расходов воздуха по топливным и воздушным трактам горелочного устройства. Выполнено определение полей полного давления воздуха и угла скаса потока на выходе из горелочного устройства и в контрольных сечениях проточной части жаровой трубы. Определена этюра концентрации имитатора топливного газа CO<sub>2</sub> в газозвудушном потоке на выходе из горелочного устройства*

*Ключевые слова: горелочное устройство, камера сгорания, топливовоздушная смесь, качество смешения*

*This article presents the experimental determination of air flow along fuel and air channels of a burner. The determination of the air total pressure distribution and the flow flop angle at the burner outlet and in testcross-section of the liner flow path was performed. The CO<sub>2</sub> gas simulator concentration distribution in air-and-gas flow at the burner outlet was determined as well*

*Keywords: combusted the device, the chamber of combustion, fuel-air mix, quality of mixture*

# ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ АЭРОДИНАМИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК И КАЧЕСТВА СМЕШЕНИЯ В НИЗКОЭМИСИОННОМ ГОРЕЛОЧНОМ УСТРОЙСТВЕ

**А. В. Котов**

Кандидат технических наук, начальник лаборатории  
Лаборатория научно - исследовательского отделения\*  
Контактный тел.: 8 (05 12) 49-79-48

**В. Г. Ванцовский**

Ведущий инженер-конструктор, начальник отдела  
Отдел камер сгорания\*  
Контактный тел.: 8 (05 12) 49-74-11

**В. В. Вилкул**

Инженер-конструктор I категории  
Отдел камер сгорания\*  
ГП НПКГ «Зоря»-«Машпроект»  
пр. Октябрьский, 42а, г. Николаев, Украина  
Контактный тел.: 8 (05 12) 49-74-11

## 1. Введение

При разработке перспективных ГТУ одной из главных проблем является создание малотоксичных камер сгорания (КС) [1], к конструкциям которых предъявляются все более жесткие требования по совершенству рабочего процесса. Особое внимание уделяется интенсификации выгорания топлива, уменьшению образования токсичных веществ в процессе сгорания топлива [2], формированию оптимального температурного поля на выходе из КС и охлаждению стенок жаровых труб и смесителей. В связи с этим в настоящее время существенно увеличился объем работ, направленных на создание новых конструкций КС и горелочных

устройств (ГУ), а также на совершенствование их рабочих характеристик [3].

Однако, отсутствие глубоких знаний рабочего процесса часто осложняет применение полученных экспериментальных данных в промышленных условиях, приводит к увеличению объемов и сроков доводочных работ ГТУ.

Одним из основных элементов КС является ГУ. Как правило, ГУ состоит из одного или нескольких плохообтекаемых тел. В качестве плохообтекаемых тел могут выступать уголкового стабилизаторы, завихрители, насадки Борда и др.[4,5]. Они необходимы для стабилизации потока, образования зоны обратных токов в объеме жаровой трубы и повышения тур-

булентности реагирующей массы топливоздушной смеси и продуктов сгорания. Это позволяет получить максимальную полноту сгорания при минимально необходимом объеме КС, правильно сориентировать и структурировать поток для обеспечения требуемых характеристик КС.

Современные тенденции сжигания в КС бедных предварительно перемешанных топливоздушных смесей, для получения низких уровней эмиссии вредных веществ ( $\text{NO}_x$ ,  $\text{CO}$ ,  $\text{C}_x\text{H}_y$ ) требует более глубокого исследования параметров потока на выходе из ГУ, использующего завихритель.

При неправильной организации рабочего процесса в камере сгорания и горелочном устройстве, вследствие мало изученности взаимного влияния тех или иных конструктивных факторов, возможно проявление эффекта проскока пламени вверх по потоку в канале предварительного смешения, проявление вибрационного горения вследствие срыва потока на выходе из ГУ. Перегрев элементов жаровой трубы и ГУ. Вследствие некачественного смешения топлива с воздухом возможен повышенный уровень эмиссии вредных выбросов ( $\text{NO}_x$ ,  $\text{CO}$ ,  $\text{C}_x\text{H}_y$ ) [6].

При разработке новых низкоэмиссионных КС, в ГП НПКГ «Зоря»-«Машпроект», особое внимание уделяется подготовке бедной предварительно перемешанной топливно-воздушной смеси.

#### Цели исследований

Целью исследований является экспериментальное определение полей полного давления воздуха и угла скоса потока на выходе из горелочного устройства и в сечениях проточной части жаровой трубы.

Также определение концентрации газа  $\text{CO}_2$  (в качестве имитатора топливного газа) в топливоздушной смеси на выходе из канала предварительного смешения ГУ и в сечениях проточной части жаровой трубы.

Чтобы достоверно определить концентрацию топливного газа необходимо знать параметры потока воздуха за горелочным устройством (ГУ). Данная задача решается как расчётным путём [7] (методом математического моделирования), так и экспериментальным [8].

Методы математического моделирования дают определенную погрешность. Их наиболее приемлемо использовать для качественной оценки спроектированной конструкции.

Эксперимент на модели дает более достоверные и качественные результаты. Поэтому было принято решение проведение экспериментальных исследований спроектированного горелочного устройства на модельном стенде.

## 2. Постановка эксперимента

Для экспериментального исследования течения воздуха за ГУ и определения концентрации топливного газа в газовой смеси (в качестве имитатора топливного газа использовался газ  $\text{CO}_2$ ) был спроектирован отсек для аэродинамических продувок ГУ.

Схема стенда и отсека представлена на рис. 1. Фотография отсека представлена на рис. 2.

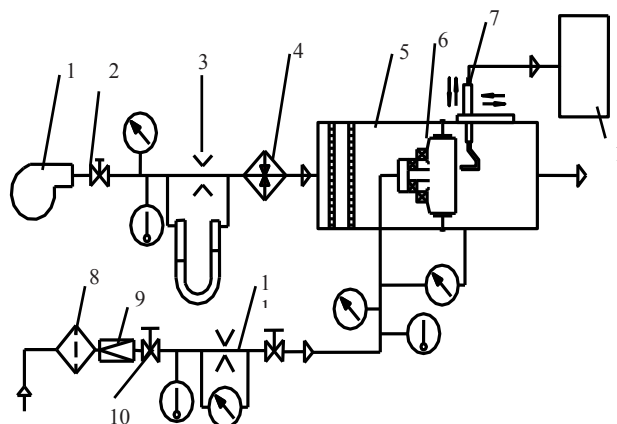


Рис. 1. Стенд для исследования аэродинамических характеристик горелочных устройств:  
1 – воздухоподогреватель; 2, 10 – регулятор расхода;  
3, 11 – измерительное устройство;  
4 - воздухоподогреватель; 5 – отсек; 6 – объект исследования; 7 – координируемый пневмонасадок с пробоотборником; 8 – фильтр газовый;  
9 – редуктор; 12 – газоанализатор



Рис. 2. Внешний вид аэродинамического отсека

В состав отсека входят: ГУ, цилиндр (имитатор проточной части жаровой трубы) имитатор патрубка смесителя.

Горелочное устройство, схема которого представлена на рис. 3, состоит из двух концентрично расположенных завихрителей. За каждым из завихрителей располагается канал предварительного смешения. Как видно из рисунка имеется два топливных канала, для каждого из завихрителей. Топливный газ разделяется в межлопаточные каналы через отверстия выполненные в теле лопатки завихрителя. На каждой из лопаток имеется по три газораздающих отверстия диаметром 0,6мм.

Имитатор жаровой трубы имеет внутренний диаметр 165мм и длину 210мм.

В процессе исследований ГУ в составе отсека определялись следующие характеристики:

- расходные характеристики топливных и воздушных каналов ГУ:

$$V_{\text{в}} = f\left(\frac{P^*}{B}\right),$$

$$V_{\tau} = f\left(\frac{P_p^*}{B}\right),$$

где  $V_{в(т)}$  - объёмный расход воздуха (газа  $CO_2$ ),  $m^3/c$ ;

$P_p^*$  - абсолютное полное давление воздуха в ресивере (на входе в ГУ),  $кгс/м^2$ ;

$B$  - атмосферное давление,  $кгс/м^2$ ;

- поля избыточного полного давления  $\Delta P_i^*$  в радиальном направлении за ГУ в контрольных сечениях:

$$\Delta P_i^* = f(H_i);$$

- поля угла скоса потока  $\Delta\alpha$  в радиальном направлении за ГУ в тех же сечениях что и  $\Delta P_i^*$ :

$$\Delta\alpha = f(H_i);$$

- поля концентрации газа  $CO_2$   $\varphi_{CO_2}$  в радиальном направлении за ГУ:

$$\varphi_{CO_2} = f(H_i).$$

- температура воздуха в ресивере  $t_{в}$ ,  $^{\circ}C$ ;

- температура  $CO_2$  на входе в ГУ  $t_{м}$ ,  $^{\circ}C$ ;

- концентрации двуокси углерода (объёмная доля)  $\varphi_{CO_2}$ , %;

- концентрация (объёмная доля) кислорода  $\varphi_{O_2}$ , %.

Для измерения параметров потока, использовались следующие средства измерительной техники:

- для определения избыточного полного давления и угла скоса потока за ГУ - трехточечный пневмонасадок (ПН), содержащий приемник полного давления с дефлектором и два приемника аэродинамического угламера;

- для перемещения ПН в радиальном и окружном направлениях - координатное устройство (КУ);

- для определения избыточного статического давления воздуха за ГУ - приемник статического давления, расположенный в горизонтальной плоскости имитатора трубы жаровой;

- для определения концентрации газов  $CO_2$  и  $O_2$  - приемник полного давления, ПН и газоанализатор «Testo-360»;

- для определения расхода воздуха и газа  $CO_2$  - расходоизмерительные установки со стандартной диафрагмой и стандартным соплом;

- для определения температуры воздуха и газа  $CO_2$  - термопреобразователи градуировки хромель-копель с модулем аналогового ввода.

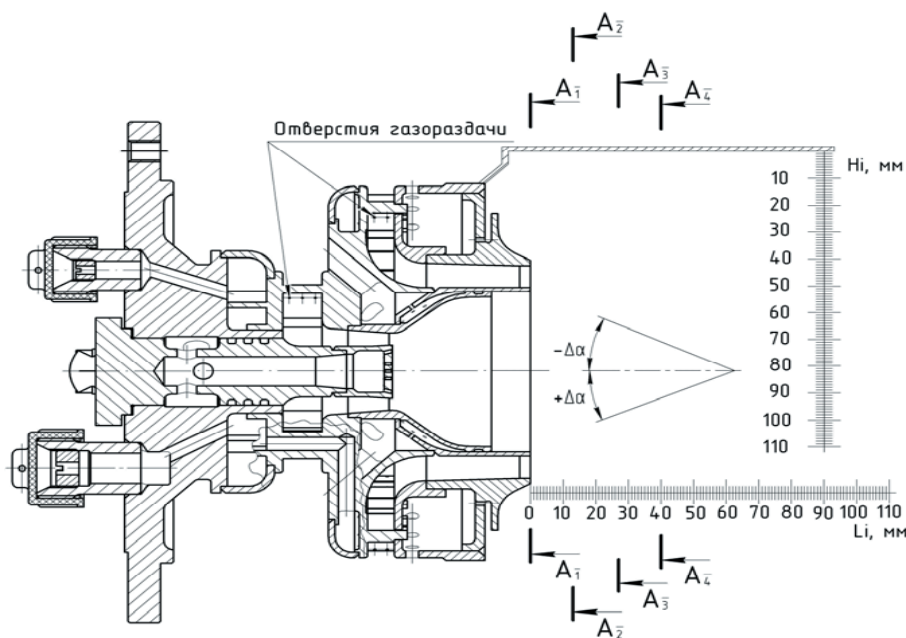


Рис. 3. Конструктивная схема низкоэмиссионного горелочного устройства и координаты расположения сечений

При проведении испытаний проводились измерения следующих параметров:

- атмосферного давления  $B$ ,  $кгс/м^2$ ;

- избыточного полного давления воздуха в ресивере  $\Delta P_p^*$ ,  $кгс/м^2$ ;

- избыточного полного давления воздуха в контрольном сечении  $\Delta P_i^*$ ,  $кгс/м^2$ ;

- избыточного полного давления газа  $CO_2$  на входе в ГУ  $\Delta P_i^*$ ,  $кгс/м^2$ ;

- избыточного статического давления воздуха в сечениях  $A_1-A_4$  за ГУ  $\Delta P_i^*$ ,  $кгс/м^2$ ;

- параметров мерных участков, необходимые для расчёта расхода воздуха и  $CO_2$ ;

- угол скоса потока относительно оси ГУ  $\Delta\alpha_i$ , град.;

топливные каналы не подавался.

На втором этапе в топливные каналы подавался углекислый газ  $CO_2$ , объёмный расход которого составлял  $0,0044 m^3/c$  (из общего коллектора, в оба топливных канала, распределялся пропорционально площадям газораздающих отверстий).

Для полученных ранее значений угла скоса потока  $\Delta\alpha_i$  и полных давлений воздуха  $\Delta P_i^*$  в каждом сечении определялась концентрация газа  $CO_2$  по высоте проточной части.

Концентрация газа  $CO_2$  в газозудной смеси определялась в соответствии с методикой разработанной в научно-исследовательском отделении ЦНИОКР «Машпроект».

### 3. Результаты исследований

Испытания ГУ проводились в два этапа. На первом этапе определялись расходные характеристики через воздушный и топливный тракты ГУ. Затем для режима работы КС с параметрами соответствующими  $\bar{N}=1,0$ , для которого объёмный расход воздуха  $V_{в}$  составлял  $0,18 m^3/c$ . Траверсирование потока проводилось в четырех сечениях имитатора жаровой трубы, где определялись полные избыточные давления и углы скоса потока. При этом газ  $CO_2$  в то-

Испытания проводились при выходе потока из имитатора патрубка смесителя в атмосферу.

Полученные зависимости позволяют подбирать объемные расходы  $V_v$  и  $V_t$  при изменении отношений давлений  $P_p^*/V$  для различных режимов. В дальнейшем испытания ГУ в составе отсека проводились при объемном расходе воздуха  $V_v=0,18 \text{ м}^3/\text{с}$ , при этом отношение давлений составляло  $P_p^*/P_1=1,117$ .

Для качественной оценки картины поля избыточного давления в сечении  $A_1-A_1$  (первое сечение за ГУ) аэродинамический угломер устанавливался в двух положениях: навстречу потоку  $\Delta\alpha_i=0^\circ$  и по потоку  $\Delta\alpha_i=180^\circ$ . Из рис. 4. видно, что эпюра избыточного полного давления при  $\Delta\alpha_i=0^\circ$  имеет ярко выраженный максимум на высоте проточной части имитатора жаровой трубы  $H_i$  от 40мм до 52мм (отсчёт здесь и далее ведётся от стенки отсека).

Подобные максимумы характерны и для эпюр полного избыточного давления в других сечениях, определённых с учётом скоса потока.

На рис. 4, приведены поля избыточных полных давлений потока в четырех сечениях проточной части имитатора жаровой трубы.

Максимальное избыточное давление  $\Delta P_i^*$  в сечении  $A_1-A_1$  имеет место при  $H_i=46\text{мм}$  и составляет 820 мм вод.ст. ( $820 \text{ кгс}/\text{м}^2$ ).

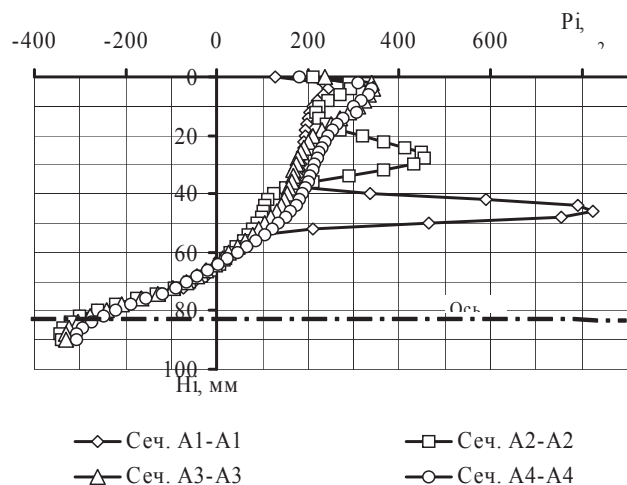


Рис. 4. Поля избыточного полного давления за ГУ в сечениях  $A_1-A_1$ ,  $A_2-A_2$ ,  $A_3-A_3$ ,  $A_4-A_4$  на режиме  $V_v \approx 0,18 \text{ м}^3/\text{с}$ ;  $V^m=0$

В последующих сечениях происходит выравнивание полного давления потока: максимальное значение полного избыточного давления уменьшается до 460 мм вод.ст. (сечение  $A_2-A_2$ ) и  $340 \text{ кгс}/\text{м}^2$  (сечения  $A_3-A_3$  и  $A_4-A_4$ ).

Максимумы давлений вследствие закрутки потока смещаются по сечениям к периферии. Во всех сечениях при  $H_i=65 \text{ мм}$  эпюры избыточных давлений проходят через ноль, на оси ГУ имеет место разрежение: (250-300) мм вод.ст.

Поле угла скоса потока в сечении  $A_1-A_1$  имеет следующий характер: при  $H_i=46 \text{ мм}$  (максимум избыточного полного давления) угол скоса потока составляет  $\Delta\alpha_i=50^\circ$  что соответствует углу закрутки потока в лопаточных аппаратах ГУ.

Чем ближе к стенке имитатора жаровой трубы угол  $\Delta\alpha_i$  увеличивается и достигает  $145^\circ$ . Угол скоса потока увеличивается к центру проточной части и составляет  $110^\circ$  на оси ГУ.

В сечении  $A_2-A_2$  угол скоса потока  $\Delta\alpha_i \approx 50^\circ$  имеет место на высоте проточной части  $H_i$  от 30 мм до 35 мм, а к периферии увеличивается до  $145^\circ$ . На оси ГУ в этом сечении  $\Delta\alpha_i \approx 95^\circ$ .

Такая же величина  $\Delta\alpha_i$  и в сечениях  $A_3-A_3$  и  $A_4-A_4$  на оси ГУ. В этих же сечениях  $H_i$  от 40 мм до 45 мм  $\Delta\alpha_i$  составляет  $(100-108)^\circ$ , а далее к периферии уменьшается до  $(45-50)^\circ$ .

Выполнено траверсирование потока в ГУ на выходе из периферийного и центрального завихрителей. Целью траверсирования было: установить есть ли зона разрежения в районе выходного сечения канала предварительного смешения и в самом канала предварительного смешения.

Траверсирование периферийного завихрителя выполнялось специальным пневмонасадком в двух сечениях: на срезе завихрителя и на расстоянии 1,5 мм от среза в глубину проточной части. Эпюра избыточного полного давления определялась для положений пневмонасадка: навстречу потоку  $\Delta\alpha_i=0^\circ$  и по потоку  $\Delta\alpha_i \approx 50^\circ$ .

Разрежения по высоте проточной части периферийного завихрителя не наблюдается, т.е. подсос пламени вовнутрь завихрителей в натуральных условиях будет отсутствовать.

Определение объемной концентрации углекислого газа  $\text{CO}_2$  в газовой смеси производилось в тех же сечениях, что и полей полных давлений и угла скоса потока. Результаты определения концентрации  $\text{CO}_2$  представлены на рис. 5,

Угол установки ПН для каждого значения  $H_i$  соответствует положению ПН при траверсировании потока без подачи  $\text{CO}_2$  в топливные каналы.

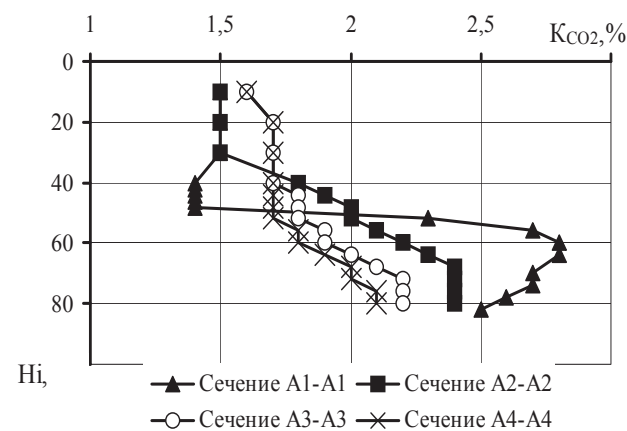


Рис. 5. Изменение концентрации  $\text{CO}_2$  по высоте проточной части отсека в сечениях  $A_1-A_1$ ,  $A_2-A_2$ ,  $A_3-A_3$ ,  $A_4-A_4$

Эпюры объемной концентрации  $\text{CO}_2$  в сечениях  $A_1-A_1$  и  $A_2-A_2$  имеют такой же характер, что и эпюры полных давлений в этих же сечениях.

Максимальная концентрация  $\text{CO}_2$  в сечении  $A_1-A_1$  определена при  $H_i=45-50 \text{ мм}$  и составляет 2,9 % объёмных.

Максимальная концентрация  $\text{CO}_2$  в сечении  $A_2-A_2$  получена при  $H_1=36-38$  мм и составляет 2,8 % объёмных.

По высоте выходного сечения концентрация равномерна. Нет ярко выраженных резких переходов от максимальных концентраций к минимальным. Объёмная концентрация в горизонтальной плоскости показала такие же результаты.

Это дает предполагать, что смесь готовится качественной и равномерно перемешанной.

В последующих сечениях в смеси среднеобъёмная концентрация  $\text{CO}_2$  уменьшается в связи с разбавлением воздухом из системы охлаждения.

---

#### 4. Выводы

---

Проведены экспериментальные исследования низкочемиссионного горелочного устройства.

Получены эпюры полного давления, угла скоса потока и концентрации  $\text{CO}_2$ , которые подтверждают правильность принятых технических и конструктивных решений, заложенных на этапе проектирования.

Траверсирование потока на выходе из канала предварительного смешения периферийного и центрального завихрителей не обнаружило наличие зон разрежения и отрыва потока в данных местах.

Разработана методика исследования аэродинамических и концентрационных характеристик низкочемиссионных горелочных устройств которая в сжатые сроки позволяет получить достоверные результаты.

---

#### Литература

1. Воронин В.Г. Улучшение энергетических и экологических параметров однофазных гтд. - Двигателестроение, 1990. – № 6. – С.43–47.
2. Лефевр А. Процессы в камерах сгорания ГТД / Пер. с англ. – М.: Мир, 1986. – 566 с.
3. Ольховский Г.Г. Совершенствование ГТУ для электростанций. - Теплоэнергетика, 1991. – № 6. – С.66.
4. Романовський Г.Ф., Сербін С.І. Екологічно чисті камери згоряння газотурбінних установок: Навчальний посібник. – Миколаїв: УДМТУ, 2002. – 84 с.
5. Романов В.И., Жирицкий О.Г., Коваленко А.В., и др. Совершенствование экологических характеристик ГТД НПП "Машпроект" / Известия Академии инженерных наук Украины. – Николаев: НПП "Машпроект", 1999. – № 1. – С.98–102.
6. Христич В.А., Тумановский А.Г. Газотурбинные двигатели и защита окружающей среды. – Киев: Техника, 1983. – 144 с.
7. Caruggi, M., Canepa, E., Di Martino, P., Nilberto, A., Ubaldi, M., and Zunino, P., 2005, "Experimental Analysis of the Two-Phase Unsteady Flow in an Aero-Engine LPP Burner", ASME paper no. GT2005-68949, ASME Turbo-Expo, Reno-Tahoe, Nevada, USA.
8. Midgley, K., Spencer, A., and McGuirk, J. 2004, "Unsteady Flow Structure in Radial Swirler Fed Fuel Injectors", ASME paper no. GT2004-53608, ASME Turbo-Expo, Vienna, Austria.