

А. М. Достияров¹, Ж. А. Айдымбаева¹, Ж.Ф. Ожикенова²,
Г.С. Катранова¹, А.М. Достиярова³

¹Алматинский университет энергетики и связи имени Г.Даукеева, Алматы, Казахстан

²Yessenov University, Актау, Казахстан

³Академия логистики и транспорта, Алматы, Казахстан

E-mail: diararu@mail.ru

РЕЗУЛЬТАТЫ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОГО ИССЛЕДОВАНИЯ ДВУХЪЯРУСНОЙ ГОРЕЛКИ КАМЕРЫ СГОРАНИЯ ГАЗОТУРБИННОЙ УСТАНОВКИ

Аннотация. В статье представлены результаты экспериментального исследования двухъярусной горелки камеры сгорания газотурбинной установки, а именно исследовано микрофакельное сжигание в двухъярусной горелке. Эксперименты проводились в лаборатории Казкотлосервиса на стенде АУЭС по испытанию горелочных устройств при сжигании природного газа и пропана. Дано краткое описание экспериментального стенда, методики обработки результатов исследований. В эксперименте исследовалось влияние расположения углов лопаточного аппарата наружного и внутреннего ярусов на выбросы в окружающую среду, в особенности, изучалось концентрация оксидов азота в уходящих газах, срыв пламени отдельно в каждом ярусе. В таблицах и рисунках приведены материалы исследований.

Ключевые слова. Камера сгорания ГТУ, двухъярусная горелка, фронтное устройство камеры сгорания ГТУ, микрофакельное сжигание, ступенчатое сжигание, оксид азота (NO_x).

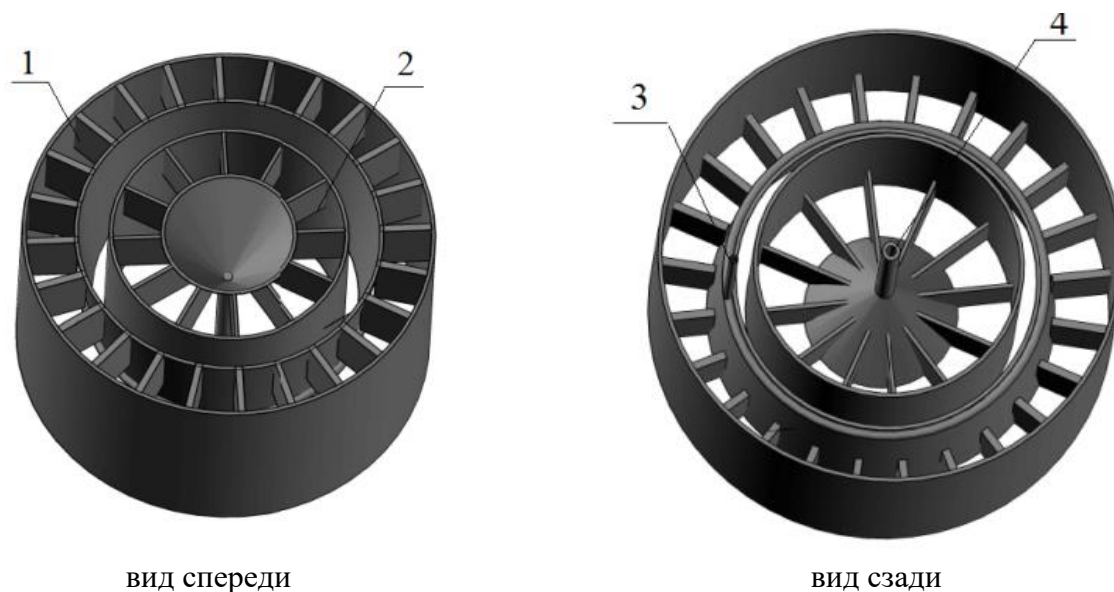
Введение.

Проведенный обзор различных способов сжигания жидкого и газообразного топлива, а также исследования вредных выбросов, в особенности, образования NO_x в различных устройствах [1-8] показали, что традиционные способы сжигания топлив не обеспечивает требуемых норм на эмиссии NO_x для фронтных устройств и камер сгорания ГТУ. Повышения эффективности сжигания топлива можно получить при использовании микрофакельного принцип сжигания топлива [4-6]. В современных ГТД и ГТУ исследовались разные фронтные устройства КС: с угловыми стабилизаторами, с встречно-закручивающимися потоками, с микромодульными форсунками, с воздушными форсунками-стабилизаторами, которые в той или иной мере отражали микрофакельный принцип сжигания [9]. К ним можно отнести и решения схем КС, использующих зонное горение [10], которые показали их эффективность в частичных режимах работы ГТД. Зонное или ступенчатое сжигание газового топлива особенно удобно реализовать как в окружном, осевом, так и в радиальном направлении. Реализация в радиальном направлении и есть двухъярусная горелка или двухъярусное фронтное устройство КС ГТУ. Возможности эффективного сжигания природного газа ярусно повышает интерес к таким горелкам. Двухъярусное сжигание топлива — это новые возможности по совершенствованию рабочего процесса с пониженным образованием вредных выбросов. Этот способ может также использоваться в режиме запуска ГТУ с перераспределением топлива между зонами в процессе пуска, что особенно важно, так как расходы топлива и воздуха изменяются от нуля до максимума. Так ярусное сжигания топлив в ГТД [11]

могут обеспечить сокращение длины камеры сгорания на 30%. Поэтому перспектива и актуальность исследований двухъярусной горелки очень высока.

Материалы и методы.

Объектом исследования является двухъярусная горелка, которая состоит из внутреннего и наружного ярусов, каждый ярус содержит завихрители из лопаток и топливоподающие трубки. Горелка работает на газообразном и жидком топливах. В связи с нагрузкой горелки, топливо может подаваться на два яруса вместе и на каждый ярус отдельно. Общий вид горелки представлена на рисунке 1.

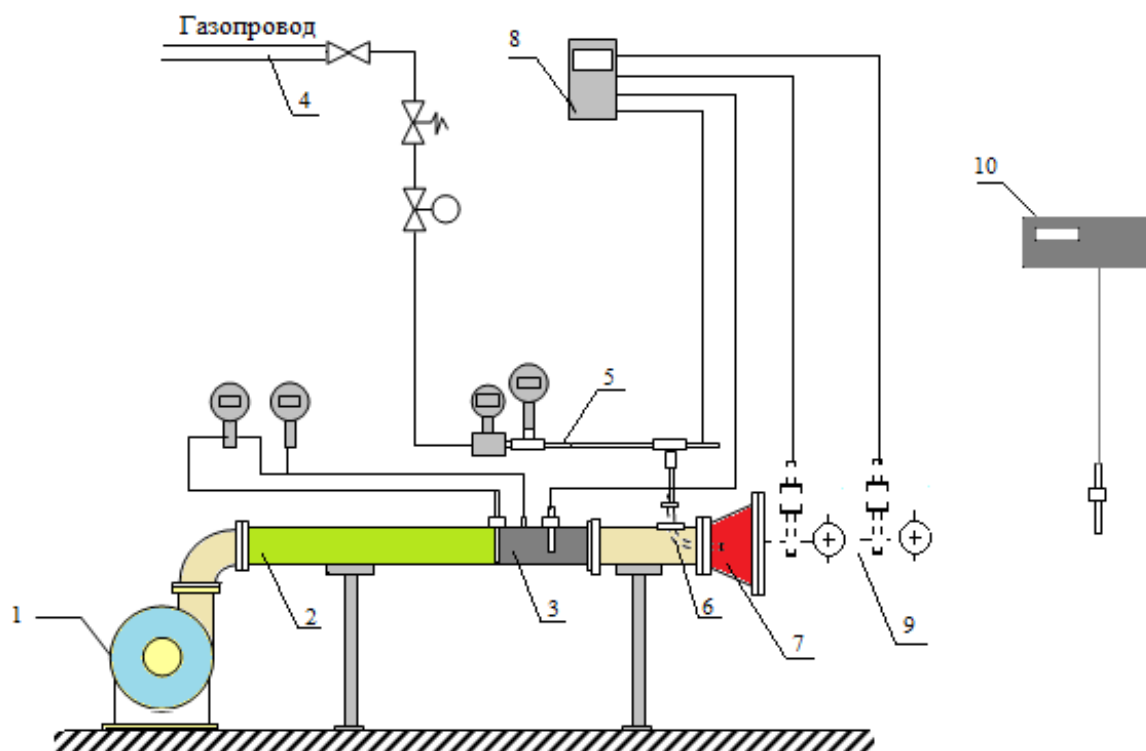


1 – наружный ярус; 2 – внутренний ярус; 3 – топливная трубка в нар. яр.; 4 – топливная трубка в вн. яр.

Рисунок 1 - Физическая модель двухъярусной горелки КС ГТУ

Схема экспериментальной установки представлена на рисунке 2 и 3. Установка состоит из следующих элементов: система подачи воздуха; система подачи топлива; система зажигания; приборный комплекс с измерительной оснасткой.

В качестве источника воздуха используется вентилятор 1, на выходе из которого установлена стабилизационная труба 2 длиной 190 см, диаметром $\varnothing 20$ см, предназначенная для выравнивания полей скоростей. В стабилизационной трубе диффузора фронтального устройства с исследуемой горелкой 7 находится мерный участок 3 для измерения параметров подающего воздуха из вентилятора. В мерном участке установлены коллекторы статического давления и насадок полного давления для определения расхода и поля скоростей потока, а температура воздуха определяется с помощью хромель-копелевой термопары. Далее к стабилизационной трубе соединяется фронтальное устройство с исследуемой двухъярусной горелкой 7. Общий вид горелочного устройства представлен на рисунке 4. Газообразное топлива отбирается из газопровода 4 и через топливоподающую трубку 6 подается к горелочным установкам. Перед подачей к горелкам с помощью мерного участка 5 измеряются основные характеристики топлива.



1 – вентилятор; 2 – стабилизирующая труба; 3 – мерный участок на входе воздуха; 4 – газопровод; 5 – мерный участок на подводе топлива; 6 – топливоподающая трубка; 7 – диффузор фронтального устройства с горелкой; 8 – многоканальный измеритель; 9 – мерный участок за диффузором; 10 – газоанализатор Testo-350-XL

Рисунок 2 - Схематическое изображение стенда



Рисунок 3 - Общий вид стенда для исследования горелки

В эксперименте исследовалась влияние расположения углов лопаточного аппарата наружного и внутреннего ярусов на выбросы в окружающую среду, в особенности, изучалось концентрация оксидов азота в уходящих газах, срыв пламени и

стабилизационные характеристики. Для этого проводилась ряд эксперимента при которых варьировались углы лопатки двух ярусов на 30°, 45°, 60°, скорость воздуха с шагом в 1 м/с в диапазоне 2÷6 м/с при постоянном расходе воздуха и изменялась подача топлива на ярусы горелки. Расход воздуха контролировался анемометром, причем расход корректировался в зависимости от температуры, давления и влажности воздуха. Температура измерялась стандартными термопарами типа ТХА, погрешность которых составляет $0,0075 * t_{изм}$ и газоанализатором Testo 350-XL. Также концентрация оксидов азота и углерода замерялись газоанализатором Testo 350-XL. Давление топлива измерялся с помощью манометра МП50М, класс точности 2,5. А давление воздуха от вентилятора высокого давления (ВР120-28-5,2С-01 производительность и напор которой составляет до 5000 м³/ч и 5000 Па соответственно) измерялись с помощью датчика избыточного давления Метран-100 1151 класс точности которого составляет 0,5 и датчика перепада давления Метран-100 1411.

В качестве топлива в экспериментах использовался природный газ и сжиженный газ (пропан). Топливная система включает газопровод природного газа в цехе или емкость с сжиженным газом, то есть пропаном емкостью 50 л с давлением 1,57 МПа, позволяющий иметь расход топлива до 4 г/с, и в каждой линии крана тонкой регулировки подачи сжиженного газа, электромагнитного отсечного клапана и расходомерное устройство.

В качестве микрофакельного горелочного устройства в эксперименте использовалась двухъярусное микрофакельное устройство по патенту РК № 35167, приведенный на рисунке 10.



Рисунок 4 - Конструкция двухъярусной горелки

Для замеров оксидов азота, температуры и полноты сгорания расход топлива был постоянным и равным 3,6 кг/ч при подаче топлива на два яруса. При работе только наружного яруса расход топлива равен 2,7 кг/ч, а внутреннего 0,9 кг/ч. Для изменения значений коэффициента избытка воздуха α , расход воздуха изменялся в диапазоне 2-6 м/с, с интервалом 1 м/с. Обработка результатов исследований проводилась по методике [12].

Коэффициент избытка воздуха рассчитывался по следующему уравнению:

$$\alpha = \frac{(G_{\text{в}}/G_{\text{т}})}{L_0} \quad , \quad (1)$$

где L_0 – количество теоретически необходимого воздуха.

Коэффициент полноты сгорания топлива определялась по формуле:

$$\eta_r = \frac{[(1 + \alpha_{\Sigma} L_0)(c_{p,r} T_r^* - c_{p,r} T_0^*) - \alpha_{\Sigma} L_0 (c_{p,g} T_g^* - c_{p,g} T_0^*) - (c_{p,r} T_r^* - c_{p,r} T_0^*)]}{Q_{\text{н}}^p} \quad (2)$$

Отличительной особенностью эксперимента является то, что практически было исследовано процесс устойчивого горения и срыв пламени, исследованы характеристики горелочного устройства и вредные выбросы в атмосферу с использованием высокоточных измерительных приборов.

Результаты и обсуждение.

Ниже в таблицах и рисунках приведены результаты эксперимента при устойчивом горении и срыве на разных скоростях воздуха при разных режимах каждого яруса. В таблицах 1,2 и на рисунках 5, 6 результаты при работе внутреннего яруса.

Таблица 1 - Результаты уст. горения пламени

ω , м/с	V_d , м ³ /ч	G_T , кг/ч	G_B , кг/с	α
2	1,44	2,67	0,032	1,88
3	1,56	2,89	0,048	2,6
4	1,8	3,33	0,064	3,0
	2,04	3,78	0,08	3,3
6	2,4	4,45	0,095	3,3

Таблица 2 - Результаты при срыве

ω , м/с	V_d , м ³ /ч	G_T , кг/ч	G_B , кг/с	α
2	0,66	1,22	0,032	4,1
3	0,9	1,67	0,048	4,5
4	1,2	2,44	0,064	4,1
5	1,5	2,78	0,08	4,5
6	1,62	3,0	0,095	4,95

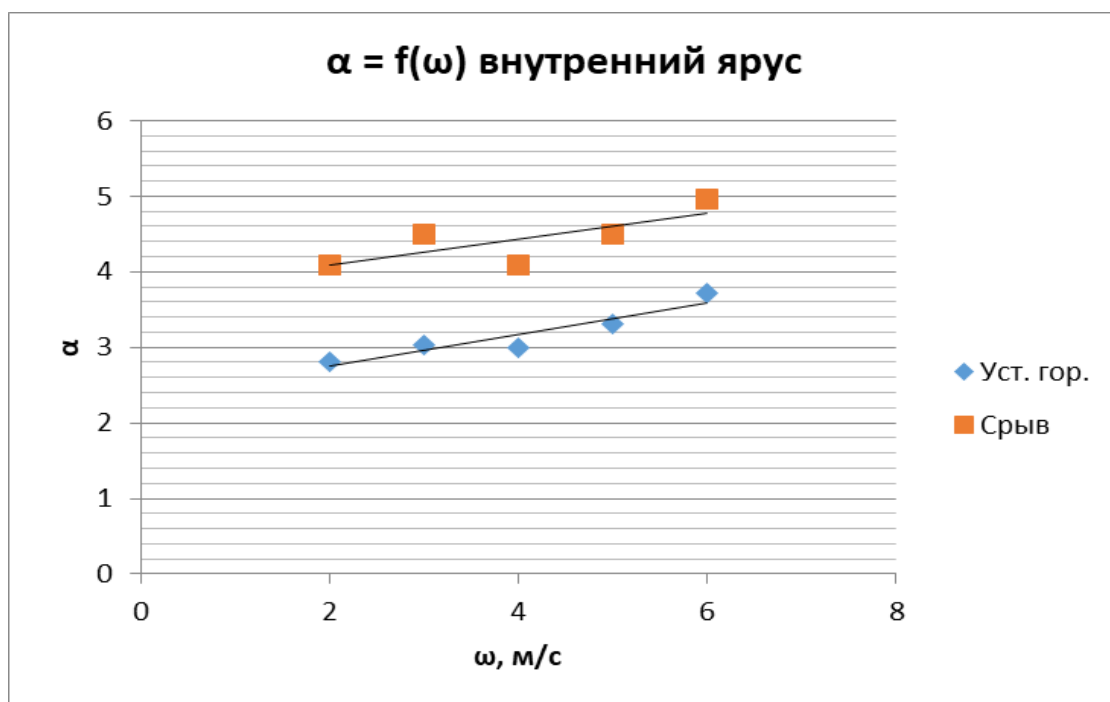


Рисунок 5 - Зависимость коэффициента избытка воздуха от скорости потока воздуха при работе внутреннего яруса

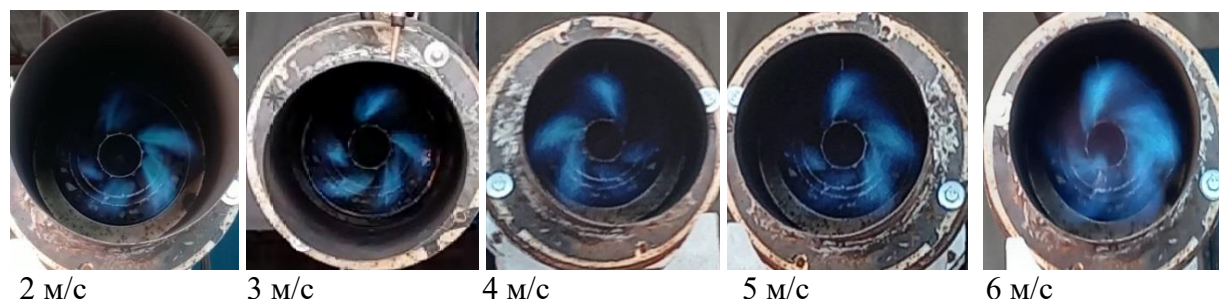


Рисунок 6 - Снимок процесса горения внутреннего яруса при разных режимах

В период исследования коэффициент избытка воздуха внутреннего яруса горения изменялся в диапазоне $\alpha = 1,87 \div 4,95$; в среднем расход топлива при срыве меньше расхода топлива устойчивого горения на 63%.

В таблицах 3,4 и на рисунках 7, 8 приведены результаты исследования горения при работе наружного яруса.

Таблица 3 - Результаты уст. горения

ω , м/с	V_d , м ³ /ч	G_T , кг/ч	G_B , кг/с	α
2	0,96	1,79	0,032	2,8
3	1,08	2,00	0,048	3,75
4	1,2	2,22	0,064	4,50
5	1,32	2,45	0,08	5,12
6	1,44	2,67	0,095	5,57

Таблица 4 - Результаты при срыве пламени

ω , м/с	V_d , м ³ /ч	G_T , кг/ч	G_B , кг/с	α
2	0,3	0,55	0,032	9,00
3	0,36	0,67	0,048	11,26
4	0,42	0,77	0,064	12,87
5	0,6	1,11	0,08	11,26
6	1,44	2,67	0,095	5,57

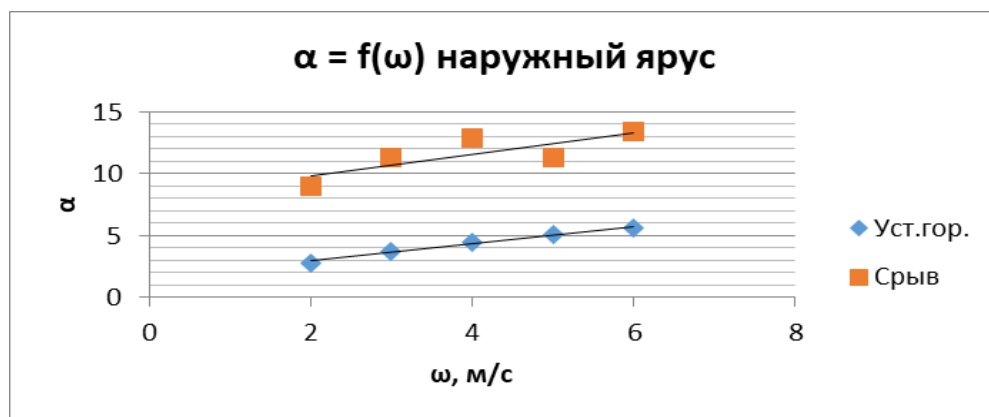


Рисунок 7 - Зависимость коэффициента избытка воздуха от скорости потока воздуха при работе наружного яруса

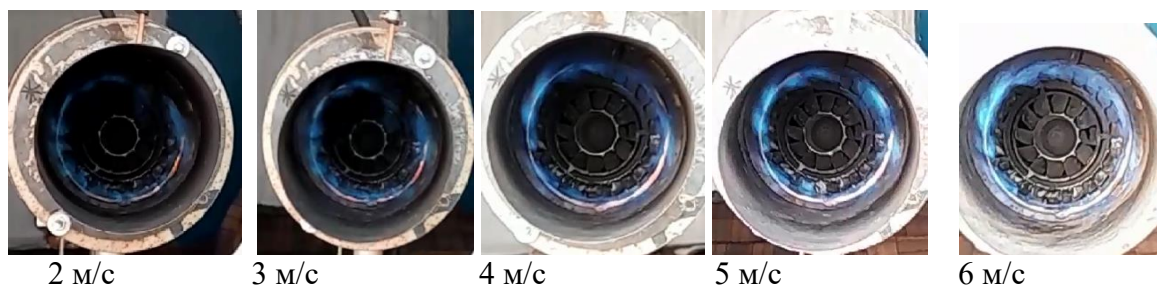


Рисунок 8 - Снимок процесса горения наружного яруса при разных режимах

В проведенных экспериментальных исследованиях коэффициент избытка воздуха наружного яруса горения изменялся в диапазоне $\alpha = 2,81 \div 13,37$; в среднем расход топлива при срыве меньше расхода топлива устойчивого горения.

В целом коэффициент избытка воздуха α изменялся в диапазоне $1,9 \div 13,4$. В данном диапазоне коэффициента избытка воздуха полнота сгорания достигает $\eta \geq 0,98$. По результатам экспериментов выбросы оксидов азота в камере сгорания также уменьшаются и зависят от распределения значений α в ярусах, а также степени крутки потока в верхней и нижней ярусах. В работе получена зависимость выхода NO_x при сжигании бедной топливовоздушной смеси от α для двухъярусной горелки при совместной устойчивой работе представленный на рисунке 9.

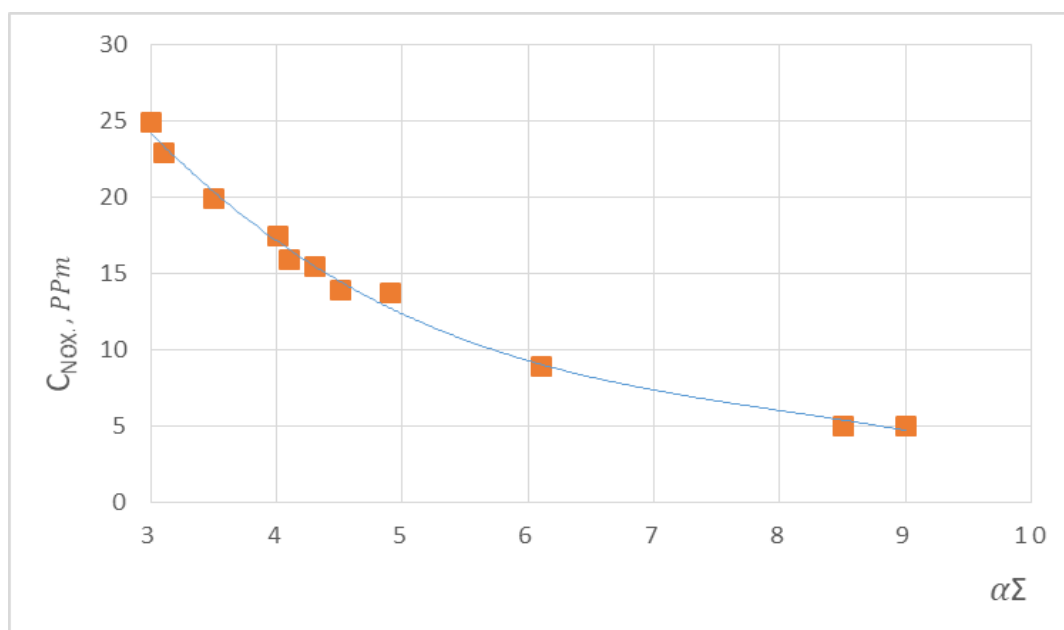


Рисунок – 9. Зависимость эмиссии оксидов азота в двухъярусной горелке от коэффициента избытка воздуха

Для уменьшения экологических показателей в камерах сгорания газотурбинной установки следует применять микрофакельный метод сжигания с использованием двухъярусной горелки. Таким образом экспериментально показано устойчивость работы ярусов как совместно, так и раздельно при низких значениях C_{NO_x} .

Выводы.

1. Фронтное устройство КС ГТУ с двухъярусной горелкой можно отнести к микрофакельной технологии сжигания.

2. Самостоятельными экспериментами подтверждена эффективность снижения оксидов азота в двухъярусной горелке при сжигании природного газа или пропана в бедной предварительно подготовленной ТВС.

ЛИТЕРАТУРА

[1] Bikram R. et al., Effects of free stream flow turbulence on blowoff characteristics of bluff-body stabilized premixed flames, *Combustion and Flame*, 190 (2018), 1, pp. 302-316.

[2] Bifen Wu, Xinyu Zhao, Bikram Roy Chowdhury, Baki M. Cetegen, Chao Xu, Tianfeng Lu, A numerical investigation of the flame structure and blowoff characteristics of a bluff-body stabilized turbulent premixed flame, *Combustion and Flame*, Volume 202, 2019, pp. 376-393.

[3] Shuguang Tia, et al., Effects of outer secondary air vane angles on combustion characteristics and NO_x emission for centrally fuel rich swirl burner in a 600-MWe wall-fired pulverized-coal utility boiler. *Applied Thermal Engineering*, 125 (2017), pp. 951-962.

[4] De Almeida D.S., Lacava P.T. Analysis of Pollutant Emissions in Double-Stage Swirl Chamber for Gas Turbine Application. The 12th International Conference on Combustion & Energy Utilisation – 12ICCEU. *Energy Procedia*, 66 (2015), pp. 117-120.

[5] Umyshev D.R., Dostiyarov A.M., Tumanov M.Y., Wang Q. Experimental investigation of v-gutter flameholders. *Thermal Science*, 21 (2), 2017(a), pp. 1011-1019.

[6] Dostiyarov A.M., Umyshev D.R., Katranova G.S. Results of investigation of the GTE combustion chamber with a two-stage burner. *Revista Espacios*, Vol. 39 (Number 24), 2018, pp. 33-47.

[7] Hussain M., Abdelhafez A., Nemitallah M.A., Araoye A.A., Ben-Mansour R., Habib M.A. A highly diluted oxy-fuel micromixer combustor with hydrogen enrichment for enhancing turndown in gas turbines. *Energy*, 2020;279:115818.

[8] A. M. Dostiyarov, R. A. Musabekov, A.K. Yamanbekova., A.K. Terziev. Influence of Air Distribution on the Formation of Oxides of Nitrogen in the Heat Source. XXIV Scientific conference with international participation fpepm 2019 17th – 20th September, 2019, pp. 49-53.

[9] Paolo G., Massimo M., Andrea T., Andrea L., Giordano T. Calculation of the flow field and NO_x emissions of a gas turbine combustor by a coarse computational fluid dynamics model, *Energy*, 2012. – №45. pp. 445-455.

[10] Достияров А.М., Мусабеков Р.А., Яманбекова А.К. Возможности использования микрофакельной воздушной горелки для теплогенератора. – Вестник АУЭС, №4 (6). 2018. – с. 32-39.

[11] Lefebvre A.H., Dilip R. Ballal. Gas turbine combustion: Alternative Fuels and Emissions. – third edition. – London: Taylor & Francis, 2010. – 537 p.

[12] Пчелкин Ю.М., Лебедев В.П. Характеристики работы камер сгорания ГТД. – М.: МВТУ, 1978 -64 с.

REFERENCES*

[1] Bikram R. et al., Effects of free stream flow turbulence on blowoff characteristics of bluff-body stabilized premixed flames, *Combustion and Flame*, 190 (2018), 1, pp. 302-316.

[2] Bifen Wu, Xinyu Zhao, Bikram Roy Chowdhury, Baki M. Cetegen, Chao Xu, Tianfeng Lu, A numerical investigation of the flame structure and blowoff characteristics of a bluff-body stabilized turbulent premixed flame, *Combustion and Flame*, Volume 202, 2019, pp. 376-393.

[3] Shuguang Tia, et al., Effects of outer secondary air vane angles on combustion characteristics and NOx emission for centrally fuel rich swirl burner in a 600-MWe wall-fired pulverized-coal utility boiler. Applied Thermal Engineering, 125 (2017), pp. 951-962.

[4] De Almeida D.S., Lacava P.T. Analisis of Pollutant Emissions in Double-Stage Swirl Chamber for Gas Turbine Application. The 12th International Conference on Combustion & Energy Utilisation – 12ICCEU. Energy Procedia, 66 (2015), pp. 117-120.

[5] Umyshev D.R., Dostiyarov A.M., Tumanov M.Y., Wang Q. Experimental investigation of v-gutter flameholders. Thermal Science, 21 (2), 2017(a), pp. 1011-1019.

[6] Dostiyarov A.M., Umyshev D.R., Katranova G.S. Results of investigation of the GTE combustion chamber with a two-stage burner. Revista Espacios, Vol. 39 (Number 24), 2018, pp. 33-47.

[7] Hussain M., Abdelhafez A., Nemitallah M.A., Araoye A.A., Ben-Mansour R., Habib M.A. A highly diluted oxy-fuel micromixer combustor with hydrogen enrichment for enhancing turndown in gas turbines. Energy, 2020;279:115818.

[8] A. M. Dostiyarov, R. A. Musabekov, A.K. Yamanbekova., A.K. Terziev. Influence of Air Distribution on the Formation of Oxides of Nitrogen in the Heat Source. XXIV Scientific conference with international participation fpepm 2019 17th – 20th September, 2019, pp. 49-53.

[9] Paolo G., Massimo M., Andrea T., Andrea L., Giordano T. Calculation of the flow field and [NO] x emissions of a gas turbine combustor by a coarse computational fluid dynamics model, Energy, 2012. – №45. pp. 445-455.

[10] Dostiyarov A.M., Musabekov R.A., Jamanbekova A.K. Vozmozhnosti ispol'zovanija mikrofaekel'noj vozdushnoj gorelki dlja teplogeneratora. – Vestnik AUJeS, №4 (6). 2018. – s. 32-39.

[11] Lefebvre A.H., Dilip R. Ballal. Gas turbine combustion: Alternative Fuels and Emissions. – third edition. – London: Taylor & Francis, 2010. – 537 p.

[12] Pchelkin Ju.M., Lebedev V.P. Harakteristiki raboty kamer sgoranija GTD. – M.: MVTU, 1978 -64 s.

Абай Достияров, т.ғ.д., профессор, Ғ.Даукеев атындағы Алматы энергетика және байланыс университеті, Алматы, Қазақстан, a.m.dost1951@gmail.com

Жанар Айдымбаева, PhD, доцент Ғ. Даукеев атындағы Алматы энергетика және байланыс университеті, Алматы, Қазақстан, diararu@mail.ru

Жанат Ожикенова, PhD, қауымдастырылған профессор Yessenov University, Ақтау, Қазақстан, ozhikenova92@mail.ru

Ғазиза Катранова, PhD, Ғ. Даукеев атындағы Алматы энергетика және байланыс университеті, Алматы, Қазақстан, gaziza.katranova@gmil.com

Алия Достиярова, т.ғ.к., доцент, Логистика және көлік академиясы, Алматы, Қазақстан, adostiyarova@mail.ru

ГАЗ ТУРБИНАЛЫҚ ҚОНДЫРҒЫНЫҢ ЕКІ ДЕҢГЕЙЛІ ЖАНУ КАМЕРАСЫНЫҢ ОТТЫҒЫН ЭКСПЕРИМЕНТТІК ЗЕРТТЕУ НӘТИЖЕЛЕРІ

Аңдатпа. Мақалада газ турбиналық қондырғының жану камерасының екі деңгейлі оттығын эксперименттік зерттеу нәтижелері, атап айтқанда екі деңгейлі оттықтағы микрофакельді жағу зерттелген. Тәжірибелер Қазкотлосервис зертханасында АЭЖБУ стендінде табиғи газ бен пропанды жағу кезінде жанғыш құрылғыларды сынау бойынша жүргізілді. Эксперименттік стендтің қысқаша сипаттамасы, зерттеу нәтижелерін өңдеу әдістемесі берілген. Экспериментте сыртқы және ішкі деңгейлердің қалақша

аппараттарының бұрыштарының қоршаған ортаға шығарындыларға әсері зерттелді, әсіресе шығатын газдардағы азот оксидтерінің Концентрациясы, әр деңгейде бөлек жалынның бұзылуы зерттелді. Кестелер мен суреттерде зерттеу материалдары келтірілген.

Түйінді сөздер. ГТҚ жану камерасы, екі деңгейлі оттық, ГТҚ жану камерасының алдыңғы құрылғысы, микрофакельді жағу, сатылы жағу, азот оксиді (NOx).

Abay Dostiyarov, doctor of technical sciences, professor, Almaty University of Power Engineering and Telecommunications named after G. Daukeyev, Almaty, Kazakhstan, a.m.dost1951@gmail.com

Zhanar Aidymbayeva, PhD, docent, Almaty University of Power Engineering and Telecommunications named after G. Daukeev, Almaty, Kazakhstan, diararu@mail.ru

Zhanat Ozhikenova, PhD, associate professor, Yessenov University, Aktau, Kazakhstan, ozhikenova92@mail.ru

Gaziza Katranova, PhD, Almaty University of Power Engineering and Telecommunications named after G. Daukeev, Almaty, Kazakhstan, gaziza.katranova@gmil.com

Aliya Dostiyarova, candidate of technical sciences, associate professor, Academy of Logistics and Transport, Almaty, Kazakhstan, adostiyarova@mail.ru

RESULTS OF AN EXPERIMENTAL STUDY OF A TWO-TIER BURNER OF THE COMBUSTION CHAMBER OF A GAS TURBINE INSTALLATION

Abstract. The article presents the results of an experimental study of a two-tier burner of the combustion chamber of a gas turbine installation, namely, microfakel combustion in a two-tier burner was investigated. The experiments were carried out in the KazkotloSERVICE laboratory at the AUES stand for testing burner devices for burning natural gas and propane. A brief description of the experimental stand, methods of processing research results is given. In the experiment, the influence of the location of the angles of the blade apparatus of the outer and inner tiers on emissions into the environment was studied, in particular, the concentration of nitrogen oxides in the exhaust gases, flame failure separately in each tier was studied. The tables and figures show the research materials.

Keywords. GTP combustion chamber, two-tier burner, front-end device of the GTP combustion chamber, microfakel combustion, step-by-step combustion, nitrogen oxide (NOx).
