

Тепловые процессы в технике. 2023. Т. 15. № 1. С. 3–12
Thermal processes in engineering, 2023, vol. 15, no. 1, pp. 3–12

Научная статья
УДК 536.46
DOI: 10.34759/tpt-2023-15-1-3-12

Экспериментальное исследование вихревого противоточного горелочного модуля с двухступенчатой подачей воздуха

О.А. Евдокимов¹✉, А.И. Гурьянов¹, С.В. Веретенников¹,
У.П. Мухоммедов¹, А.А. Шайкина¹

¹Рыбинский государственный авиационный технический университет имени П.А. Соловьева,
Рыбинск, Россия
yevdokimov_oleg@mail.ru✉

Аннотация. Предложена новая схема организации горения в противоточном закрученном течении, основанная на применении ступенчатого подвода воздуха. Отмеченная схема реализована в виде вихревого противоточного горелочного модуля, работающего на газообразном топливе. Проведены экспериментальные исследования срывных и эмиссионных характеристик горелочного модуля. Результаты показали, что подача в устройство воздуха через основной и дополнительный тангенциальные каналы приводит к противоположным эффектам: увеличение числа Рейнольдса вторичного потока (дополнительный канал) обеспечивает расширение области устойчивой работы, в то время как повышение числа Рейнольдса первичного воздуха (основной канал) характеризуется уменьшением коэффициента избытка воздуха, соответствующего срыву пламени. Обобщение результатов в рамках параметра, характеризующего отношение расходов первичного и вторичного потоков воздуха n , показало, что наибольшие значения интегрального коэффициента избытка воздуха α_Σ достигаются в диапазоне $0.4 \leq n \leq 1.0$. Эмиссионные характеристики горелочного модуля со ступенчатой подачей близки к тем значениям, которые имеют место для классических вихревых противоточных устройств. Максимальные значения эмиссии оксидов азота наблюдаются вблизи стехиометрии, а область наименьших выбросов монооксида углерода соответствует горению обедненных топливовоздушных смесей. Наиболее экологически целесообразным является организация работы горелочного модуля в диапазоне значений интегрального коэффициента избытка воздуха $1.8 < \alpha_\Sigma < 2.0$.

Ключевые слова: закрученный поток, вихревая противоточная горелка, ступенчатая подача воздуха, пропан, срыв пламени, эмиссия загрязняющих веществ

Благодарность. Работа подготовлена в рамках государственного задания на выполнение фундаментальных научных исследований на 2022 год (шифр научной темы 0774-2020-0004).

Для цитирования. Евдокимов О.А., Гурьянов А.И., Веретенников С.В., Мухоммедов У.П., Шайкина А.А. Экспериментальное исследование вихревого противоточного горелочного модуля с двухступенчатой подачей воздуха // Тепловые процессы в технике. 2023. Т. 15. № 1. С. 3–12. DOI: 10.34759/tpt-2023-15-1-3-12

Original article

An experimental study of a bidirectional vortex combustor with two-stage air supply

O.A. Evdokimov¹✉, A.I. Guryanov¹, S.V. Veretennikov¹,
U.P. Muhommedov¹, A.A. Shaykina¹

¹ Soloviev Rybinsk State Aviation Technical University, Rybinsk, Russia
yevdokimov_oleg@mail.ru✉

Abstract. The article proposes organization of a new scheme of burning in the counterflow swirling flow based on stepped air feeding. The said scheme was realized in the form of vortex counterflow burning module running of gas fuel. Experimental studies of both stalling and emission characteristics of the burner module were conducted. The results revealed that feeding air feeding into the unit through the main and additional tangential channels led to the opposite effects. Reynolds number increasing of the secondary flow ensured safe operating area enhancing, while Reynolds number increasing of the primary air was being characterized by the excess air coefficient reduction corresponding to the flame stalling. Generalization of the results within the framework of the parameter characterizing the air consumptions interrelation n , revealed that the largest values of the integral excess air coefficient a_{Σ} were being reached within the range of $0.4 \leq n \leq 1.0$. Emission characteristics of the burner module with the stepped feeding are closer to those existing for the classical counterflow units. Maximum values of nitrogen dioxides emission are being observed near the stoichiometry, and the area of the lowest carbon dioxide emission corresponds to the depleted air-fuel mixtures. The more ecologically rational is the burner module operation organizing within the excess air coefficient range of $1.8 \leq a_{\Sigma} \leq 2.0$.

Keywords: swirled flow, vortex bidirectional burner, stepped air feeding, propane, flame blow-off, pollutants emission

Acknowledgement. This work was carried out under the state contract for the fundamental scientific research (scientific code 0774-2020-0004).

For citation. Evdokimov O.A., Guryanov A.I., Veretennikov S.V., Muhommedov U.P., Shaykina A.A. An experimental study of a bidirectional vortex combustor with two-stage air supply. *Teplovye protsessy v tekhnike = Thermal processes in engineering*, 2023, vol. 15, no. 1, pp. 3–12. (In Russ.). DOI: 10.34759/tpt-2023-15-1-3-12

Введение

Повышение стабильности и экологичности сжигания углеводородного топлива является важнейшей научно-технической задачей, которая не потеряет своей актуальности в ближайшие десятилетия. Это определяет постоянный поиск новых технологий организации горения, применяемых в современных энергетических установках и обеспечивающих расширение диапазона устойчивой работы и снижение выбросов загрязняющих веществ.

Известным и широко применяемым на практике способом интенсификации горения является использование закрутки потока [1, 2]. Горение в закрученном потоке обеспечивает значительное возрастание площади фронта

пламени, увеличение удельной теплонапряженности зоны реакции с повышением равномерности распределения среднемассовой температуры и скорости. Одной из наиболее эффективных газодинамических схем организации закрученного потока является противоточное течение, принципиальная структура которого показана на рис. 1 [3]. В основе противоточного закрученного течения лежат два вихря (периферийный и приосевой), движущиеся в противоположных осевых направлениях, но имеющие одинаковое направление вращения [4]. Формирование противоточного течения осуществляется в вихревой камере, в наиболее простом случае имеющей цилиндрическую форму, тангенциальные закручивающие подво-

ды и выходное сопло-диафрагму. Воздух подается через закручивающее устройство 1 и первоначально движется в составе периферийного вихря (сплошная линия на рис. 1), после чего вблизи торцевой стенки 3 осуществляется разворот потока, и приосевой вихрь (штриховая линия на рис. 1) покидает устройство через сопло-диафрагму 5.

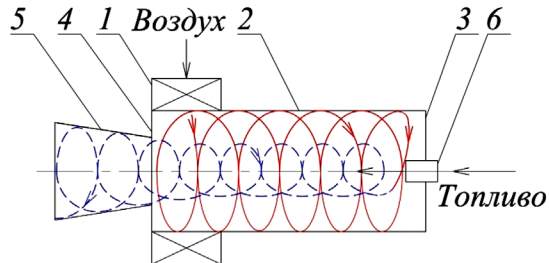


Рис. 1. Упрощенная схема течения в противоточной вихревой горелке: 1 – закручивающее устройство; 2 – вихревая камера; 3 – торцевая стенка; 4 – задираемая стенка; 5 – сопло-диафрагма; 6 – топливная форсунка

Одной из главных причин высокой эффективности противоточных вихревых камер является значительная величина времени пребывания горючего и окислителя в зоне высокой температуры, формирующейся вследствие отмеченной структуры закрученного течения [5]. С целью определения оптимальной геометрии противоточной камеры различными научными группами выполнены исследования для цилиндрической [6, 7], конической [8], полусферической [9, 10] и тороидальной [11] форм. Результаты таких исследований показали, что именно профилированная тороидальная геометрия камеры и, в частности, ее торцевой стенки обеспечивает наибольшую величину времени пребывания и, как следствие, полноты сгорания топлива [12]. Еще одним преимуществом тороидальной противоточной камеры является возможность организации горения в ней различных видов топлива – газообразного [13], жидкого [14] и твердого пылевидного [15, 16]. Кроме того, возможной и перспективной является реализация сжигания водородосодержащих и синтетических видов топлива [17], а также многотопливных режимов горения [18].

В настоящее время противоточные вихревые горелки и камеры сгорания используются при создании малоразмерных реактивных двигателей [7, 19, 20], водород-кислородных пароперегревателей [21], плазменных систем [22] и дру-

гих устройств энергетического и авиационного применения. Также известным фактом является реализация в противоточном закрученном течении высокоэффективной тепловой защиты внутренней поверхности стенок вихревой камеры [23], что приводит к значительному снижению их температуры и увеличению ресурсных показателей [24, 25].

Результаты отмеченных выше исследований позволили получить перспективные экологические показатели горения в противоточном закрученном течении в широком диапазоне устойчивых режимов работы. В соответствии со срывной характеристикой противоточного горелочного модуля, показанной на рис. 2, граница бедного срыва пламени при работе на метане достигает значения $\alpha_{\max} \approx 2.4$. Близкие значения также были получены и при использовании других газообразных углеводородных видов топлива, в частности пропана ($\alpha_{\max} \approx 2.1$) [18]. Дополнительное повышение стабильности и экологических показателей горения возможно на основе организации ступенчатой подачи окислителя в вихревую камеру. Известные результаты исследований горения в прямоточном закрученном потоке подтверждают эффективность такого подхода [26–28].

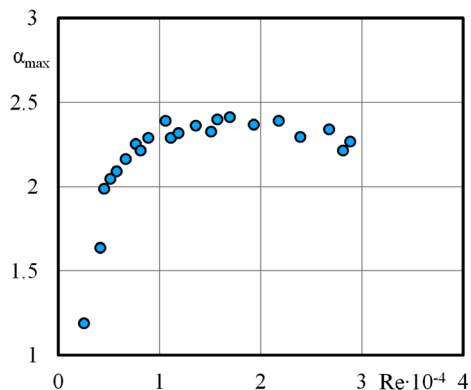


Рис. 2. Граница бедного срыва пламени в вихревой противоточной горелочной камере, работающей на метане [17]

Таким образом, целью настоящей работы является повышение эффективности горения газообразного углеводородного топлива в противоточном закрученном течении, заключающееся в расширении диапазона устойчивой работы по коэффициенту избытка воздуха и обеспечении требуемых значений эмиссии загрязняющих веществ, за счет организации двухступенчатой подачи воздуха в горелочный модуль.

Постановка эксперимента

Экспериментальные исследования процесса горения в закрученном противоточном течении со ступенчатой подачей воздуха проводились на вихревом горелочном модуле, внешний вид и схема проточной части которого показаны на рис. 3.

Рабочий процесс горелочного модуля организован следующим образом. Первичный воздух подается в устройство через тангенциальный штуцер 4 и движется вдоль наружных конической 5 и цилиндрической 3 стенок вихревой камеры, таким образом конвективно охлаждая их. Проходя через закручивающее устройство 2, первичный воздух формирует интенсивно закрученный поток, первоначально движущийся в сторону тороидальной вихревой камеры 9,

где осуществляется его осевой разворот и дальнейшее перемещение к соплу-диафрагме 1. Подача газообразного горючего осуществляется с использованием форсунки 11, установленной в центре торцевой стенки 10. Подача вторичного воздуха организована через тангенциальный штуцер 8, что позволяет сформировать развитое закрученное течение непосредственно в профилированной части устройства и значительно увеличить время пребывания топлива в зоне высокой температуры.

Для проведения экспериментальных исследований использовался стенд, схема которого показана на рис. 4. Работа стенда осуществляется следующим образом. Пропан из баллона 2 поступает в топливную магистраль, из которой подается в горелочный модуль 1. Массовый

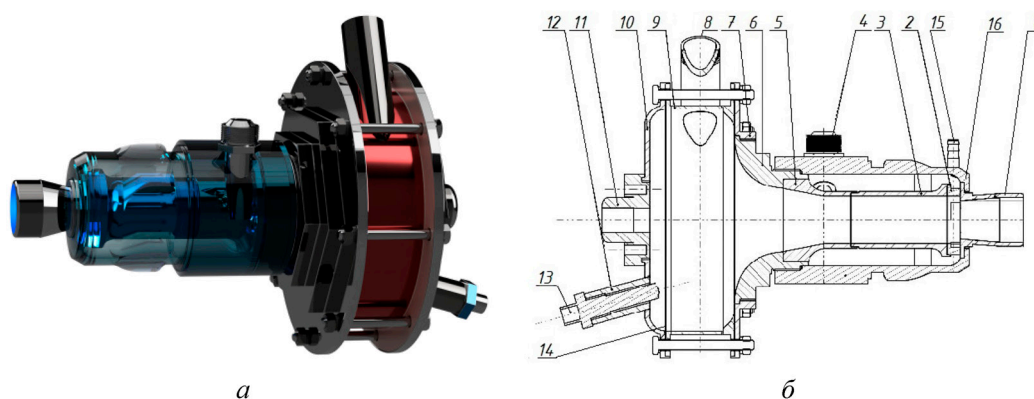


Рис. 3. Внешний вид (а) и схема проточной части (б) вихревого противоточного горелочного модуля со ступенчатой подачей воздуха: 1 – сопло-диафрагма; 2 – закручивающее устройство; 3 – цилиндрическая вихревая камера; 4 – штуцер подачи первичного воздуха; 5 – коническая вихревая камера; 6 – переход; 7 – фланец; 8 – штуцер подачи вторичного воздуха; 9 – тороидальная вихревая камера; 10 – торцевая стенка; 11 – форсунка подачи основного топлива; 12 – штуцер свечи зажигания; 13 – свеча зажигания; 14 – прокладка; 15 – штуцер подачи дополнительного топлива; 16 – корпус охлаждающей рубашки

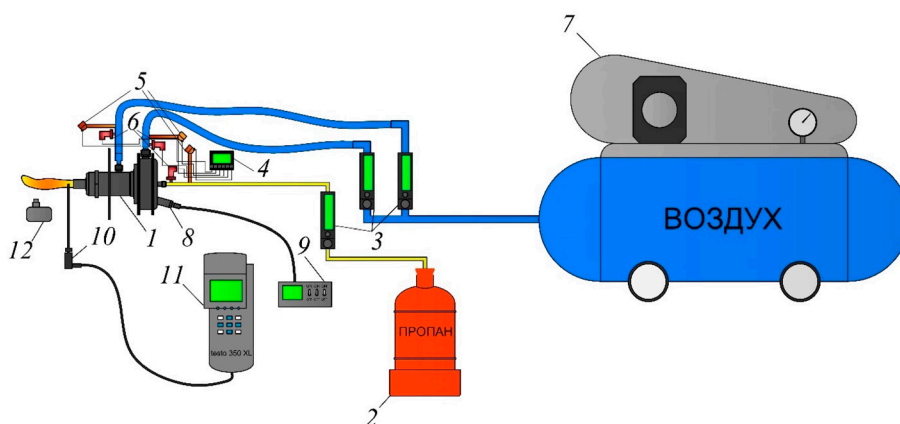


Рис. 4. Схема экспериментального стенда: 1 – противоточный горелочный модуль; 2 – газовый баллон; 3 – электронные массовые расходомеры Bronkhorst MV306; 4 – многоканальный измеритель-регулятор; 5 – термопары ТХА; 6 – датчики избыточного давления; 7 – воздушный компрессор; 8 – свеча зажигания; 9 – блок питания системы зажигания; 10 – газозаборный зонд; 11 – газоаналитический комплекс; 12 – цифровая фотокамера

расход горючего регулируется и измеряется электронным расходомером 3, а температура и давление определяются при помощи термопары ТХА 5 и датчика давления 6, соответственно, подключенных к многоканальному измерителю-регулятору 4. Одновременно с этим воздух от компрессора 7 по соответствующей магистрали также поступает в горелку 1. Воздушная магистраль состоит из двух ответвлений, необходимых для организации подачи первичного и вторичного потоков воздуха. Для каждого из них осуществляется измерение массового расхода, температуры и давления с использованием оборудования, полностью идентичного тому, что установлено в топливной магистрали. Воспламенение топливоздушной смеси, формирующейся в проточной части горелочного модуля, реализуется при помощи свечи зажигания 8, подключенной к блоку питания 9. За выходным соплом горелки с использованием зонда 10 и газоанализатора 11 выполняется исследование химического состава истекающих продуктов сгорания, основной целью которого является определение концентраций основных загрязняющих атмосферу веществ. Также осуществляется цифровая фоторегистрация зоны горения при помощи камеры 12.

Исследование границ устойчивого горения выполнялось следующим образом. Массовые расходы первичного и вторичного воздуха устанавливались на необходимый уровень, после чего в горелочный модуль подавался пропан и выполнялось его воспламенение. Далее расход горючего последовательно уменьшался до тех пор, пока пламя полностью не погасало. Значения массовых расходов воздуха и горючего, соответствовавших погасанию пламени, приводились к величине интегрального коэффициента избытка воздуха α_Σ , характеризующего границу устойчивого горения по зависимости

$$\alpha_\Sigma = \frac{G_{B1} + G_{B2}}{G_T \cdot L_0}, \quad (1)$$

где G_{B1} и G_{B2} – массовые расходы первичного и вторичного воздуха соответственно; G_T – массовый расход топлива; L_0 – стехиометрический коэффициент (для пропана $L_0 = 15.6$). Описанная выше процедура определения границы срыва пламени проводилась не менее пяти раз для каждого режима работы, после чего проводилось осреднение полученных значений.

Измерения концентраций вредных выбросов в процессе горения проводились следующим образом. Газозаборный зонд фиксировался в центре выходного сечения горелочного модуля, после чего проводилось измерение концентраций монооксида углерода CO и оксидов азота NO_x (NO + NO₂) за период времени не менее трех минут для каждого режима работы.

В процессе проведения экспериментальных исследований использовалось только откалиброванное и поверенное метрологическое оборудование. Неопределенность измерения температуры воздуха и топлива не превышала $\pm 1\%$. Соответствующие неопределенности измерения давления и массового расхода составляли $\pm 0.25\%$ и $\pm 2\%$. Неопределенность измерения концентраций загрязняющих веществ зависела от конкретного типа веществ, но не превышала $\pm 10\%$. Более подробная информация об особенностях проведения газового анализа приведена в работе [16].

Результаты экспериментальных исследований

При проведении исследований на экспериментальном стенде, показанном на рис. 4, помимо интегрального коэффициента избытка, рассчитываемого по зависимости (1), анализ результатов проводился с использованием значений локального коэффициента избытка воздуха для смеси вторичного воздуха и горючего, подаваемых в профилированную область устройства $\alpha_{см}$, и отношения массовых расходов первичного и вторичного воздуха n

$$\alpha_{см} = \frac{G_{B2}}{G_T \cdot L_0}, \quad (2)$$

$$n = \frac{G_{B1}}{G_{B2}}. \quad (3)$$

Исследованные режимы работы противоточного горелочного модуля приведены к соответствующим значениям чисел Рейнольдса для первичного и вторичного потоков воздуха Re_{B1} и Re_{B2} , рассчитываемых по зависимостям

$$Re_{B1} = \frac{4G_{B1}}{\pi \cdot d_1 \cdot \mu_B}, \quad (4)$$

$$Re_{B2} = \frac{4G_{B2}}{\pi \cdot d_2 \cdot \mu_B}, \quad (5)$$

где d_1 – гидравлический диаметр закручивающего устройства для подвода первичного воздуха ($d_1 = 12.7$ мм); d_2 – диаметр штуцера подачи вторичного воздуха ($d_2 = 15.0$ мм); μ_v – динамическая вязкость воздуха на входе в модуль ($\mu_v = 1.81 \cdot 10^{-5}$ Па·с).

На рис. 5 и 6 показаны зависимости коэффициента избытка воздуха, соответствующего срыву пламени, от значений числа Рейнольдса потоков первичного и вторичного воздуха. Ана-

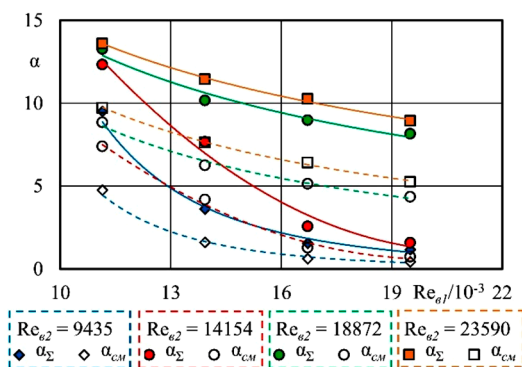


Рис. 5. Зависимость коэффициента избытка воздуха (α_Σ , α_{CM}), соответствующего срыву пламени, от числа Рейнольдса первичного потока воздуха Re_{v1}

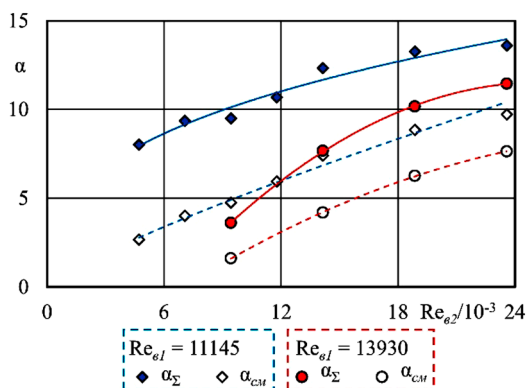


Рис. 6. Зависимость коэффициента избытка воздуха (α_Σ , α_{CM}), соответствующего срыву пламени, от числа Рейнольдса первичного потока воздуха Re_{v2}

лиз приведенных зависимостей свидетельствует о сложном влиянии режима организации ступенчатого подвода воздуха на границу устойчивого горения. Глобальный тренд заключается в том, что при возрастании Re_{v1} величина интегрального коэффициента избытка воздуха для срыва пламени уменьшается, а при повышении Re_{v2} – увеличивается. Отмеченное справедливо и для коэффициента избытка воздуха смеси α_{CM} , формирующейся в профилированной тороидальной части устройства.

При этом влияние отмеченных чисел Рейнольдса на границу срыва достаточно неравномерно. Можно отметить, что при малых значениях $Re_{v2} < 15\,000$ наблюдаемый эффект расширения области устойчивого горения является наиболее существенным и характеризуется величиной $\alpha_\Sigma = 11.15$ при $Re_{v1} = 11\,145$ и $\alpha_\Sigma = 1.58$ при $Re_{v1} = 19\,500$. Также необходимо сказать, что увеличение интегрального коэффициента избытка воздуха сопровождается радикальной перестройкой структуры зоны горения, которая показана на рис. 7. В условиях стехиометрического соотношения топлива и окислителя, а также до значения $\alpha_\Sigma < 2.0$ зона горения локализуется преимущественно в выходном сопле-диафрагме (см. рис. 7, а), а также внутри устройства, где происходит формирование реагирующей смеси. Это связано с тем, что величина коэффициента избытка воздуха для смеси вторичного воздуха и горючего в этом случае $\alpha_{CM} < 1.0$, что определяет необходимость подачи дополнительной массы воздуха для полного завершения процесса горения. По этой причине активная фаза горения завершается непосредственно после взаимодействия топливовоздушной смеси с первичным потоком воздуха вблизи закручивающего устройства и ниже по потоку – в выходном сопле.

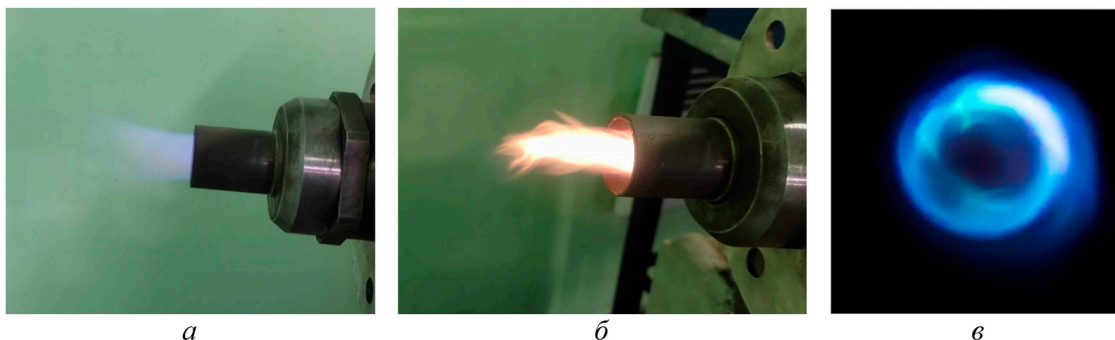


Рис. 7. Фотографии зоны горения на режимах работы $Re_{v1} = 18600$, $Re_{v2} = 8200$: а – $\alpha_\Sigma = 1.6$; б – $\alpha_\Sigma = 2.4$; в – $\alpha_\Sigma = 7.1$

В диапазоне режимов $2.0 < \alpha_\Sigma < 5.0$ наблюдается неустойчивость положения зоны горения с ее периодическим перемещением внутри горелочного устройства от выходного сопла до профилированной тороидальной области. Это сопровождается появлением локальных зон диффузионного горения в форме пульсирующего в осевом направлении пламени ярко желтого цвета, показанного на рис. 7, б. Дальнейшее уменьшение расхода подаваемого в устройство горючего приводит к подавлению указанной неустойчивости и локализации зоны горения полностью внутри профилированной тороидальной геометрии (см. рис. 7, в), где в последующем и происходит срыв пламени.

С целью обобщения совместного влияния чисел Рейнольдса $Re_{в1}$ и $Re_{в2}$ срывные характеристики на рис. 5 и 6 приведены в виде зависимости коэффициента избытка воздуха от отношения расходов первичного и вторичного воздуха $\alpha = f(n)$, показанных на рис. 8. Такие зависимости позволяют понять общую тенденцию влияния ступенчатого подвода воздуха в противоточное закрученное течение на границу устойчивого горения. Видно, что наибольшие значения коэффициента избытка воздуха α_Σ достигаются в диапазоне $0.4 \leq n \leq 1.0$. Уменьшение значения n относительно указанного диапазона приводит к существенным трудностям с воспламенением топливоздуш- ной смеси, в то время как при значениях $n > 1$ реализуется классическое противоточное течение, граница срыва для которого соответствует зависимости, показанной на рис. 2.

Математическая обработка полученных результатов для границы устойчивого горения методом наименьших квадратов позволила получить критериальное уравнение вида

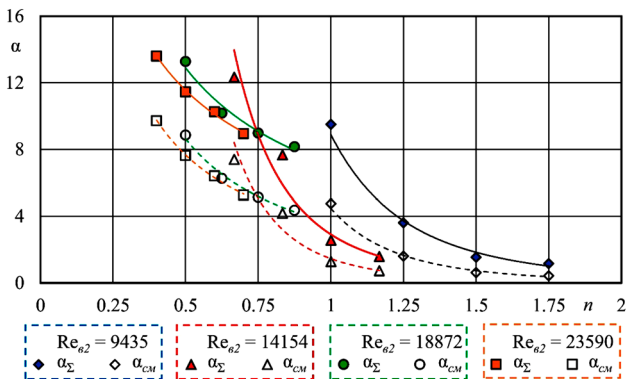


Рис. 8. Зависимость коэффициента избытка воздуха (α_Σ , $\alpha_{сМ}$), соответствующего срыву пламени, от соотношения расходов первичного и вторичного воздуха n

$$\alpha_\Sigma = 1.3 \cdot 10^{10} \cdot Re_{в1}^{-2.7} \cdot Re_{в2}^{0.75} \quad (6)$$

для величины α_Σ в диапазоне чисел Рейнольдса $10^4 \leq Re_{в1} \leq 2 \cdot 10^4$ и $4 \cdot 10^3 \leq Re_{в2} \leq 2.4 \cdot 10^4$.

На рис. 9 представлены эмиссионные характеристики противоточного горелочного модуля со ступенчатой подачей воздуха на режиме его работы $Re_{в1} = 11\,145$ и $Re_{в2} = 9435$. Анализируя зависимость для оксидов азота, можно отметить, что она имеет близкий к классическому вид с максимумом вблизи стехиометрии ($\alpha_{сМ} = 0.87$). В рассматриваемых условиях подавляющая часть оксидов азота формируется по термическому механизму Зельдовича в области наибольшей температуры, расположенной в профилированной тороидальной части горелочного устройства. При этом максимальная величина эмиссии NO_x составляет 23 ppm, что полностью соответствует существующим на настоящий момент требованиям к устройствам сжигания топлива (50 ppm по нормам ICAO [29]).

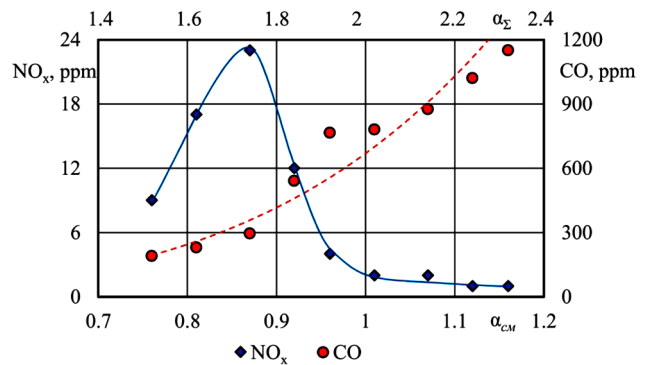


Рис. 9. Зависимости эмиссии оксидов азота (NO_x) и монооксида углерода (CO) от коэффициента избытка воздуха на режиме работы противоточного горелочного модуля $Re_{в1} = 11145$ и $Re_{в2} = 9435$

При анализе зависимости для монооксида углерода следует сделать акцент на влиянии именно интегрального коэффициента избытка воздуха α_Σ . Из рис. 9 следует, что минимум эмиссии CO соответствует значениям $1.5 < \alpha_\Sigma < 1.7$ и далее с увеличением α_Σ выбросы существенно возрастают. Это связано с известными особенностями горения в противоточном закрученном течении и, в частности, с увеличенным временем пребывания топлива в области протекания реакции [30]. В условиях профилированной вихревой камеры время пребывания топлива в составе формирующегося тороидального вихря возрастает настолько, что, несмотря на общее снижение среднемассовой

температуры в зоне горения, вызванное увеличением интегрального коэффициента избытка воздуха, реализуется практически полное сгорание всего топлива с минимальными выбросами монооксида углерода.

Обобщение экспериментальных данных для эмиссии оксидов азота и монооксида углерода в противоточном реагирующем течении с закруткой потока позволяет определить область компромиссных режимов работы вихревого горелочного устройства. Ей соответствует диапазон значений интегрального коэффициента избытка воздуха $1.8 < \alpha_{\Sigma} < 2.0$, в котором эмиссия как CO, так и NO_x соответствует существующим экологическим нормам [29].

Заключение

Проведенные экспериментальные исследования показали преимущество противоточного закрученного течения со ступенчатой подачей воздуха, заключающееся в существенном расширении диапазона устойчивой работы соответствующего горелочного устройства. В диапазоне отношений расходов первичного и вторичного воздуха, подаваемых в зону горения, $0.35 < n < 0.5$ величина интегрального коэффициента избытка воздуха, определяющая устойчивое горение, достигает значения $\alpha_{\Sigma} \approx 13.5$, что более чем в пять раз превышает соответствующее значение для классического однорасходного противоточного закрученного течения ($\alpha \approx 2.4$).

При организации ступенчатой подачи окислителя в противоточном течении имеют место значительное увеличение времени пребывания топлива в области высокой температуры и интенсивное взаимодействие между периферийным и приосевым вихрями. Это позволяет обеспечить высокие экологические характеристики горения в противоточных устройствах, и оптимальный диапазон значений интегрального коэффициента избытка воздуха соответствует $1.8 < \alpha_{\Sigma} < 2.0$.

Список источников

1. Гупта А., Лилли Д., Сайред Н. Закрученные потоки. Москва, 1984. 475 с.
2. Пираллишвили Ш.А., Поляев В.М., Сергеев М.Н. Вихревой эффект. Эксперимент, теория, технические решения. Москва, 2000. 412 с.
3. Evdokimov O.A., Prokhorov D.A., Guryanov A.I., Veretennikov S.V. Transient numerical simulations of a cold-flow bidirectional vortex chamber. *Physics of Fluids*, 2022, vol. 34, no. 1, pp. 015123. URL: <https://doi.org/10.1063/5.0079224>
4. Vyas A.B., Majdalani J. Exact Solution of the Bidirectional Vortex. *AIAA Journal*, 2006, vol. 44, no. 10, pp. 2208–2216. URL: <https://doi.org/10.2514/1.14872>
5. Guryanov A.I., Evdokimov O.A., Guryanova M.M., Veretennikov S.V. Criterion analysis and experimental study of combustion mechanisms in a bidirectional swirling flow and their relationship with pollutants emission. *International Journal of Energy Research*, 2021, vol. 45, no. 4, pp. 5500–5516. URL: <https://doi.org/10.1002/er.6178>
6. Majdalani J., Chiaverini M.J. On steady rotational cyclonic flows: The viscous bidirectional vortex. *Physics of Fluids*, 2009, vol. 21, no. 10, p. 103603. URL: <https://doi.org/10.1063/1.3247186>
7. Yu N., Zhao B., Lee G., Wang J. Experimental and simulation study of a Gaseous oxygen/Gaseous hydrogen vortex cooling thrust chamber. *Acta Astronautica*, 2016, vol. 118, pp. 11–20. URL: <https://doi.org/10.1016/j.actaastro.2015.09.017>
8. Barber T.A. Helical Models of the Bidirectional Vortex in a Conical Geometry. Knoxville, 2014, 223 p.
9. Majdalani J., Williams L.L. A quasi complex-lamellar solution for a hemispherically bounded cyclonic flowfield. *Physics of Fluids*, 2021, vol. 33, no. 8, p. 083105. URL: <https://doi.org/10.1063/5.0058647>
10. Williams L.L., Majdalani J. Exact Beltramian solutions for hemispherically bounded cyclonic flowfields. *Physics of Fluids*, 2021, vol. 33, no. 9, p. 093601. URL: <https://doi.org/10.1063/5.0063743>
11. Evdokimov O.A., Prokhorov D.A., Guryanov A.I., Mikhailov A.S., Veretennikov S.V. A study of flame and flow structures and their effect on emission properties in a bidirectional vortex pulverized peat combustor. *Fuel*, 2021, vol. 291, p. 120120. URL: <https://doi.org/10.1016/j.fuel.2020.120120>
12. Евдокимов О.А., Лебедев И.Р., Гурьянов А.И., Веретеников С.В. Расчетное сопоставление режимов сжигания топливной пыли в прямоточной и противоточной вихревых горелках // Тепловые процессы в технике. 2021. Т. 13. № 12. С. 543–554. URL: <https://doi.org/10.34759/tp-2021-13-12-543-554>
13. Piralishvili Sh.A., Gur'yanov A.I. Dimensionless Base of Experimental Investigation of Thermogasdynamic Parameters in a Twisted Flow with Combustion. *Heat Transfer Research*, 2008, vol. 39, no. 8, pp. 703–712. URL: <https://doi.org/10.1615/HeatTransRes.v39.i8.60>
14. Гурьянов А.И. Эмиссионные характеристики горения в закрученном течении с газодинамическим противотоком // Тепловые процессы в технике. 2013. Т. 1. № 1. С. 5–12.
15. Evdokimov O.A., Guryanov A.I., Mikhailov A.S., Veretennikov S.V. A numerical simulation of burning of pulverized peat fuel in a bidirectional vortex combustor. *Thermal Science and Engineering Progress*, 2020, vol. 17, p. 100510. URL: <https://doi.org/10.1016/j.tsep.2020.100510>
16. Evdokimov O.A., Guryanov A.I., Mikhailov A.S., Veretennikov S.V., Stepanov E.G. Experimental investigation of burning of pulverized peat in a bidirectional vortex combustor. *Thermal Science and Engineering Progress*, 2020, vol. 18, p. 100565. URL: <https://doi.org/10.1016/j.tsep.2020.100565>
17. Guryanov A.I., Evdokimov O.A., Guryanova M.M., Piralishvili S.A., Kononova V.V., Veretennikov S.V. A Study of Superlean Combustion Modes in a Reverse Flow Combustor.

- tion Chamber Burning Multicomponent Fuel. *Journal of Physics: Conference Series*, 2019, vol. 1261, p. 012015. URL: <https://doi.org/10.1088/1742-6596/1261/1/012015>
18. **Guryanov A.I., Evdokimov O.A., Veretennikov S.V., Guryanova M.M.** A study of multifuel bidirectional combustor. *Procedia Environmental Science, Engineering and Management*, 2021, vol. 8, no. 1, pp. 255–263.
 19. **Munson S., Sauer J.A., Rocholl J.D., Chiaverini M.J.** Development of a Low-Cost Vortex-Cooled Thrust Chamber Using Hybrid Fabrication Techniques. *47th AIAA/ASME/SAE/ASEE Joint Propulsion Conference & Exhibit*. San Diego, California: American Institute of Aeronautics and Astronautics, 2011. URL: <https://doi.org/10.2514/6.2011-5835>
 20. **Евдокимов О.А., Пираллишвили Ш.А., Гурьянов А.И., Веретенников С.В.** Исследование малоразмерного реактивного двигателя на основе вихревой противоточной горелки // Тепловые процессы в технике. 2020. Т. 12. № 10. С. 465–472. URL: <https://doi.org/10.34759/tpt-2020-12-10-465-472>
 21. **Guryanov A.I., Piralishvili S.A., Guryanova M.M., Evdokimov O.A., Veretennikov S.V.** Counter-current hydrogen-oxygen vortex combustion chamber. Thermal physics of processing. *Journal of the Energy Institute*, 2020, vol. 93, no. 2, pp. 634–641. URL: <https://doi.org/10.1016/j.joei.2019.06.002>
 22. **Matveev I., Serbin S.** Investigations of a Reverse-Vortex Plasma Assisted Combustion System. *Heat Transfer Summer Conference. Volume 2*. Rio Grande, Puerto Rico, USA: American Society of Mechanical Engineers, 2012, pp. 133–140. URL: <https://doi.org/10.1115/HT2012-58037>
 23. **Mikhailov A.S., Evdokimov O.A.** CFD simulation of peat dust combustion in a bidirectional vortex burner with wall cooling. *AIP Conference Proceedings*, 2020, vol. 2211, p. 040006. URL: <https://doi.org/10.1063/5.0000866>
 24. **Rom C., Anderson M., Chiaverini M.** Cold Flow Analysis of a Vortex Chamber Engine for Gelled Propellant Combustor Applications. *40th AIAA/ASME/SAE/ASEE Joint Propulsion Conference and Exhibit*. Fort Lauderdale, Florida, 2004, pp. 1–12. URL: <https://doi.org/10.2514/6.2004-3359>
 25. **Khan O., Ahmed A.** An Experimental Study of Internal Flow Field of a Cyclone Vortex Combustion Chamber using Particle Image Velocimetry. *AIAA Propulsion and Energy 2021 Forum*. Virtual Event: American Institute of Aeronautics and Astronautics, 2021. URL: <https://doi.org/10.2514/6.2021-3572>
 26. **Chen D., Cai N., Zhang Z., Li Z.** Optimizing in-situ char gasification kinetics in reduction zone of pulverized coal air-staged combustion. *Combustion and Flame*, 2018, vol. 194, pp. 52–71. URL: <https://doi.org/10.1016/j.combustflame.2018.04.015>
 27. **Wilhite J.M., Dolan B., Villalva R., Kabiraj L., Pasche-reit C.O., Gutmark E.J.** Analysis of Combustion Oscillations in a Staged MLDI Burner using Decomposition Methods and Recurrence Analysis. *54th AIAA Aerospace Sciences Meeting*. San Diego, California: American Institute of Aeronautics and Astronautics, 2016, 17 p. URL: <https://doi.org/10.2514/6.2016-1156>
 28. **Mikhailov A.S., Piralishvili S.A., Stepanov E.G., Evdokimov O.A., Spesivtseva N.S.** Features of Burning of Pulverized Peat Fuel in a Vortex Burner Device. *Journal of Engineering Physics Thermophysics*, 2018, vol. 91, no. 4, pp. 925–932. URL: <https://doi.org/10.1007/s10891-018-1818-8>
 29. Annex 16 – Environmental Protection. Vol. 2. Aircraft Engine Emissions / Order Number: AN16-2. – ISBN 978-92-9231-123-0. – ICAO, 2008.
 30. **Evdokimov O.A., Guryanov A.I., Veretennikov S.V.** Emission characteristics of bidirectional vortex combustors operating on gaseous, liquid and pulverized solid fuel. *Procedia Environmental Science, Engineering and Management*, 2021, vol. 8, no. 1, pp. 233–231.

References

1. **Gupta A., Lilley D., Syred N.** *Zakruchennye potoki [Swirl Flows]*. Moscow, 1984, 475 p. (In Russ.)
2. **Piralishvili Sh.A., Polyaev V.M., Sergeev M.N.** Vortex effect. Experiment, theory, technical solutions. Moscow, 2000, 412 p. (In Russ.)
3. **Evdokimov O.A., Prokhorov D.A., Guryanov A.I., Veretennikov S.V.** Transient numerical simulations of a cold-flow bidirectional vortex chamber. *Physics of Fluids*, 2022, vol. 34, no. 1, pp. 015123. URL: <https://doi.org/10.1063/5.0079224>
4. **Vyas A.B., Majdalani J.** Exact Solution of the Bidirectional Vortex. *AIAA Journal*, 2006, vol. 44, no. 10, pp. 2208–2216. URL: <https://doi.org/10.2514/1.14872>
5. **Guryanov A.I., Evdokimov O.A., Guryanova M.M., Veretennikov S.V.** Criterion analysis and experimental study of combustion mechanisms in a bidirectional swirling flow and their relationship with pollutants emission. *International Journal of Energy Research*, 2021, vol. 45, no. 4, pp. 5500–5516. URL: <https://doi.org/10.1002/er.6178>
6. **Majdalani J., Chiaverini M.J.** On steady rotational cyclonic flows: The viscous bidirectional vortex. *Physics of Fluids*, 2009, vol. 21, no. 10, p. 103603. URL: <https://doi.org/10.1063/1.3247186>
7. **Yu N., Zhao B., Lee G., Wang J.** Experimental and simulation study of a Gaseous oxygen/Gaseous hydrogen vortex cooling thrust chamber. *Acta Astronautica*, 2016, vol. 118, pp. 11–20. URL: <https://doi.org/10.1016/j.actaastro.2015.09.017>
8. **Barber T.A.** *Helical Models of the Bidirectional Vortex in a Conical Geometry*. Knoxville, 2014, 223 p.
9. **Majdalani J., Williams L.L.** A quasi complex-lamellar solution for a hemispherically bounded cyclonic flowfield. *Physics of Fluids*, 2021, vol. 33, no. 8, p. 083105. URL: <https://doi.org/10.1063/5.0058647>
10. **Williams L.L., Majdalani J.** Exact Beltramian solutions for hemispherically bounded cyclonic flowfields. *Physics of Fluids*, 2021, vol. 33, no. 9, p. 093601. URL: <https://doi.org/10.1063/5.0063743>
11. **Evdokimov O.A., Prokhorov D.A., Guryanov A.I., Mikhailov A.S., Veretennikov S.V.** A study of flame and flow structures and their effect on emission properties in a bidirectional vortex pulverized peat combustor. *Fuel*, 2021, vol. 291, p. 120120. URL: <https://doi.org/10.1016/j.fuel.2020.120120>
12. **Evdokimov O.A., Lebedev I.R., Guryanov A.I., Veretennikov S.V.** A numerical comparison of mono and bidirectional pulverized peat combustors at different operation modes. *Thermal processes in engineering*, 2021, vol. 13, no. 12, pp. 543–554. URL: <https://doi.org/10.34759/tpt-2021-13-12-543-554> (In Russ.)
13. **Piralishvili Sh.A., Gur'yanov A.I.** Dimensionless Base of Experimental Investigation of Thermogasdynamic Parameters in a Twisted Flow with Combustion. *Heat Transfer Research*, 2008, vol. 39, no. 8, pp. 703–712. URL: <https://doi.org/10.1615/HeatTransRes.v39.i8.60>
14. **Guryanov A.I.** Emission properties of combustion in a bidirectional swirling flow. *Thermal Processes in Engineering*, 2013, vol. 1, no. 1, pp. 5–12. (In Russ.)

15. **Evdokimov O.A., Guryanov A.I., Mikhailov A.S., Veretennikov S.V.** A numerical simulation of burning of pulverized peat fuel in a bidirectional vortex combustor. *Thermal Science and Engineering Progress*, 2020, vol. 17, p. 100510. URL: <https://doi.org/10.1016/j.tsep.2020.100510>
16. **Evdokimov O.A., Guryanov A.I., Mikhailov A.S., Veretennikov S.V., Stepanov E.G.** Experimental investigation of burning of pulverized peat in a bidirectional vortex combustor. *Thermal Science and Engineering Progress*, 2020, vol. 18, p. 100565. URL: <https://doi.org/10.1016/j.tsep.2020.100565>
17. **Guryanov A.I., Evdokimov O.A., Guryanova M.M., Piralishvili S.A., Kononova V.V., Veretennikov S.V.** A Study of Superlean Combustion Modes in a Reverse Flow Combustion Chamber Burning Multicomponent Fuel. *Journal of Physics: Conference Series*, 2019, vol. 1261, p. 012015. URL: <https://doi.org/10.1088/1742-6596/1261/1/012015>
18. **Guryanov A.I., Evdokimov O.A., Veretennikov S.V., Guryanova M.M.** A study of multifuel bidirectional combustor. *Procedia Environmental Science, Engineering and Management*, 2021, vol. 8, no. 1, pp. 255–263.
19. **Munson S., Sauer J.A., Rocholl J.D., Chiaverini M.J.** Development of a Low-Cost Vortex-Cooled Thrust Chamber Using Hybrid Fabrication Techniques. *47th AIAA/ASME/SAE/ASEE Joint Propulsion Conference & Exhibit. San Diego, California: American Institute of Aeronautics and Astronautics*, 2011. URL: <https://doi.org/10.2514/6.2011-5835>
20. **Evdokimov O.A., Piralishvili S.A., Guryanov A.I., Veretennikov S.V.** A study of small-size thruster based on a bidirectional vortex combustor. *Thermal processes in engineering*, 2020, vol. 12, no. 10, pp. 465–472. (In Russ.). URL: <https://doi.org/10.34759/tpt-2020-12-10-465-472>
21. **Guryanov A.I., Piralishvili S.A., Guryanova M.M., Evdokimov O.A., Veretennikov S.V.** Counter-current hydrogen-oxygen vortex combustion chamber. Thermal physics of processing. *Journal of the Energy Institute*, 2020, vol. 93, no. 2, pp. 634–641. URL: <https://doi.org/10.1016/j.joei.2019.06.002>
22. **Matveev I., Serbin S.** Investigations of a Reverse-Vortex Plasma Assisted Combustion System. *Heat Transfer Summer Conference. Volume 2. Rio Grande, Puerto Rico, USA: American Society of Mechanical Engineers*, 2012, pp. 133–140. URL: <https://doi.org/10.1115/HT2012-58037>
23. **Mikhailov A.S., Evdokimov O.A.** CFD simulation of peat dust combustion in a bidirectional vortex burner with wall cooling. *AIP Conference Proceedings*, 2020, vol. 2211, p. 040006. URL: <https://doi.org/10.1063/5.0000866>
24. **Rom C., Anderson M., Chiaverini M.** Cold Flow Analysis of a Vortex Chamber Engine for Gelled Propellant Combustor Applications. *40th AIAA/ASME/SAE/ASEE Joint Propulsion Conference and Exhibit. Fort Lauderdale, Florida*, 2004, pp. 1–12. URL: <https://doi.org/10.2514/6.2004-3359>
25. **Khan O., Ahmed A.** An Experimental Study of Internal Flow Field of a Cyclone Vortex Combustion Chamber using Particle Image Velocimetry. *AIAA Propulsion and Energy 2021 Forum. Virtual Event: American Institute of Aeronautics and Astronautics*, 2021. URL: <https://doi.org/10.2514/6.2021-3572>
26. **Chen D., Cai N., Zhang Z., Li Z.** Optimizing in-situ char gasification kinetics in reduction zone of pulverized coal air-staged combustion. *Combustion and Flame*, 2018, vol. 194, pp. 52–71. URL: <https://doi.org/10.1016/j.combustflame.2018.04.015>
27. **Wilhite J.M., Dolan B., Villalva R., Kabiraj L., Pascheleit C.O., Gutmark E.J.** Analysis of Combustion Oscillations in a Staged MLDI Burner using Decomposition Methods and Recurrence Analysis. *54th AIAA Aerospace Sciences Meeting. San Diego, California: American Institute of Aeronautics and Astronautics*, 2016, 17 p. URL: <https://doi.org/10.2514/6.2016-1156>
28. **Mikhailov A.S., Piralishvili S.A., Stepanov E.G., Evdokimov O.A., Spesivtseva N.S.** Features of Burning of Pulverized Peat Fuel in a Vortex Burner Device. *Journal of Engineering Physics Thermophysics*, 2018, vol. 91, no. 4, pp. 925–932. URL: <https://doi.org/10.1007/s10891-018-1818-8>
29. Annex 16 – Environmental Protection. Vol. 2. Aircraft Engine Emissions / Order Number: AN16-2. – ISBN 978-92-9231-123-0. – ICAO, 2008.
30. **Evdokimov O.A., Guryanov A.I., Veretennikov S.V.** Emission characteristics of bidirectional vortex combustors operating on gaseous, liquid and pulverized solid fuel. *Procedia Environmental Science, Engineering and Management*, 2021, vol. 8, no. 1, pp. 233–231.

Статья поступила в редакцию 10.11.2022; одобрена после рецензирования 05.12.2022; принята к публикации 29.12.2022

The article was submitted on 10.11.2022; approved after reviewing on 05.12.2022; accepted for publication on 29.12.2022