

НОВЫЕ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЕ ПРОЦЕССЫ И ОБОРУДОВАНИЕ NEW TECHNOLOGICAL PROCESSES AND EQUIPMENT

ISSN 1995-2732 (Print), 2412-9003 (Online)

УДК 662.951.23

DOI: 10.18503/1995-2732-2025-23-1-178-189



АДАПТИВНОСТЬ И НАДЕЖНОСТЬ РАБОТЫ ЗАПАЛЬНЫХ УСТРОЙСТВ НА КОКСОВОМ ГАЗЕ ДЛЯ МЕТАЛЛУРГИЧЕСКИХ ПРОИЗВОДСТВ

Телешев М.И.^{1,2}, Саушин И.И.^{1,2,3}, Гольцман А.Е.³, Хуснутдинова Э.М.⁴, Хамидуллина Г.Р.⁴,
Фахреева Д.Р.⁴

¹ ООО «НПП „ПРОМА“», Казань, Россия

² ООО «Завод горелочного оборудования и автоматики „ПРОМА“», Казань, Россия

³ ФИЦ КазНЦ РАН, Казань, Россия

⁴ Казанский (Приволжский) федеральный университет, Казань, Россия

Аннотация. Надежность работы запального устройства горелочного оборудования является важным параметром работы тепловых энергетических установок. Согласно ГОСТ Р 52229-2004 основным видом топлива запальных горелок является природный или сжиженный газ. Однако для металлургических производств актуальным является использование коксового газа в условиях небольшого присоединительного давления. Целью данной работы был процесс адаптации серийного запального устройства, работающего на природном газе и удовлетворяющего ГОСТ Р 52229-2004, к работе на коксовом газе. Высокое объемное содержание водорода в составе коксового газа приводит к существенным отличиям по величинам динамического напора потока и теплотворной способности горючей смеси по сравнению с природным газом, что в условиях небольшого присоединительного давления становится критичным для серийных запальных устройств. В данной работе предложена новая конструкция запального устройства с двумя эквивалентными газовыми трубками. По результатам численного моделирования цифровых двойников запальных горелок с одной и двумя газовыми трубками показано сходство параметров горения и общей структуры факелов на центральной оси при сжигании коксового газа в условиях присоединительного давления 15 кПа и номинальной тепловой мощности устройства 120 кВт. Однако использование конструкции с двумя газовыми трубками позволяет разместить в стволе горелки высоковольтную свечу зажигания без увеличения внешнего диаметра ствола горелки, наличие которой повышает общую надежность работы устройства и металлургической печи в целом. Предложенная конструкция также имеет преимущество по тепловому напряжению стальных элементов оголовка ствола горелки, что продлевает срок эксплуатации устройства.

Ключевые слова: запальное устройство, коксовый газ, численное моделирование, металлургия, горение

Работа выполнена при финансовой поддержке ФИЦ КазНЦ РАН (проект № FMEG-2024-0004) и ФГАОУ ВО «Казанский (Приволжский) федеральный университет».

© Телешев М.И., Саушин И.И., Гольцман А.Е., Хуснутдинова Э.М., Хамидуллина Г.Р., Фахреева Д.Р., 2025

Для цитирования

Адаптивность и надежность работы запальных устройств на коксовом газе для металлургических производств / Телешев М.И., Саушин И.И., Гольцман А.Е., Хуснутдинова Э.М., Хамидуллина Г.Р., Фахреева Д.Р. // Вестник Магнитогорского государственного технического университета им. Г.И. Носова. 2025. Т. 23. №1. С. 178-189. <https://doi.org/10.18503/1995-2732-2025-23-1-178-189>



Контент доступен под лицензией Creative Commons Attribution 4.0 License.
The content is available under Creative Commons Attribution 4.0 License.

ADAPTABILITY AND RELIABILITY OF IGNITION DEVICE OPERATION ON COKE-OVEN GAS FOR METALLURGICAL PRODUCTION

Teleshev M.I.^{1,2}, Saushin I.I.^{1,2,3}, Goltsman A.E.³, Khusnutdinova E.M.⁴, Khamidullina G.R.⁴, Fakhreeva D.R.⁴

¹LLC NPP PROMA, Kazan, Russia

²LLC PROMA Combustion Equipment and Automation Plant, Kazan, Russia

³Kazan Scientific Center of the Russian Academy of Sciences, Kazan, Russia

⁴Kazan Federal University, Kazan, Russia

Abstract. Important parameter of the operation of thermal power system is reliability of the ignition device of the combustion equipment. According to GOST R 52229-2004, the main type of fuel for ignition burners is natural or liquefied gas. However, for metallurgical production, the use of coke-oven gas under conditions of low connection pressure is relevant. The present paper has been aimed to the process of adapting a serial ignition device operating on natural gas and satisfying GOST R 52229-2004 to operation on coke-oven gas. High volumetric hydrogen content in the coke-oven gas leads to significant differences in the values of the dynamic flow pressure and the calorific effect of the combustible mixture compared to natural gas; this fact becomes critical for serial ignition devices under conditions of low connection pressure. New design of an ignition device with two equivalent gas tubes has been proposed. Digital twins of ignition burners with one and two gas tubes have been studied numerically; the similarity of the combustion parameters and of the general structure of torches on the central axis when burning coke gas at 15 kPa of a connection pressure and at 120 kW of a nominal thermal power of the device has been shown. However, the use of the unit with two gas tubes allows placing a high-voltage spark plug in the burner barrel without increasing the external diameter of it; the presence of plug increases the overall reliability of the device and the metallurgical furnace as a whole. The proposed unit also has an advantage in thermal stress of the steel elements of the burner barrel head, which extends the service life of the device.

Keywords: ignition device, coke-oven gas, numerical simulation, metallurgy, combustion

The work was carried out with the financial support of the Federal Research Center Kazan Scientific Center of the Russian Academy of Sciences (project No. FMEG-2024-0004) and the FSAEI HE Kazan Federal University

For citation

Teleshev M.I., Saushin I.I., Goltsman A.E., Khusnutdinova E.M., Khamidullina G.R., Fakhreeva D.R. Adaptability and Reliability of Ignition Device Operation on Coke-Oven Gas for Metallurgical Production. *Vestnik Magnitogorskogo Gosudarstvennogo Tekhnicheskogo Universiteta im. G.I. Nosova* [Vestnik of Nosov Magnitogorsk State Technical University]. 2025, vol. 23, no. 1, pp. 178-189. <https://doi.org/10.18503/1995-2732-2025-23-1-178-189>

Введение

Коксовый газ является одним из основных источников тепловой энергии для металлургических предприятий, который получают при выработке кокса из каменного угля. Большая объемная доля водорода в коксовом газе по сравнению с природным газом приводит к существенным отличиям их физических характеристик, что обязательно учитывается при проектировании индустриальной горелки. Однако, помимо самой горелки, важным элементом энергетической установки является запальное устройство. Запальные устройства имеют две основные функции – это дистанционный розжиг основного горелочного устройства энергоустановки и контроль наличия пламени [1]. Сложившаяся современная общемировая тенденция к снижению допустимого уровня содержания оксидов азота (NOx) и углерода (CO) в дымовых газах энергоустановок привела к существенно непропорциональному расходу финансовых вложений в разработку новых конструкций промышленных горелок

и запальных устройств для них. В результате во многих моделях запально-зажигательных (ЗЗУ) и запально-сигнализирующих (ЗСУ) устройств используются устаревшие технологии и конструкции. Поэтому надежность работы самой современной и технологичной промышленной горелки может быть существенно ухудшена стабильностью выполнения запальным устройством своих функций [2].

Классическая конструкция газовой части запальной горелки с предварительным смешиванием (рис. 1) состоит из ствола 1, в который помещена одна или две газовые трубки (вспомогательная 1 и основная 2) с расходными сменными газовыми соплами. Также в стволе размещены центральный 3 и контрольный 4 электроды соответственно для поджига и контроля наличия пламени. Проточное сечение между этими элементами, ограниченное стенкой ствола горелки, используется для подачи воздуха к срезу расходного сопла. Расход топливного газа обеспечивается за счет присоединительного давления и регулируется диаметрами горл расходных сопел. Расход

воздуха может быть обеспечен величиной присоединительного давления, разрежением в топке энергоустановки и/или за счет действия эжектирующих сил при расширении топливного газа на выходе из сопла.

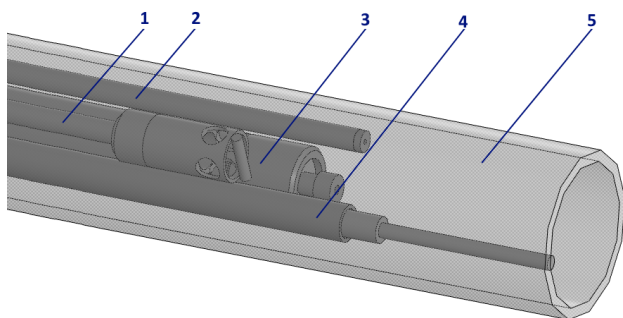


Рис. 1. Оголовок запально-защищенного устройства ЗСУ-ПИ-Exd производства ООО «НПП „ПРОМА“», Россия: 1 – вспомогательная газовая трубка с расходным соплом; 2 – основная газовая трубка с расходным соплом; 3 – электрод розжига с керамической изоляцией; 4 – электрод розжига; 5 – ствол

Fig. 1. The head of the ignition-protected device ZSU-PI-Exd manufactured by LLC NPP Proma, Russia: 1 is auxiliary gas tube with a flow nozzle; 2 is main gas tube with a flow nozzle; 3 is ignition electrode with ceramic insulation; 4 is ignition electrode; 5 is barrel

В отличие от промышленных горелок для повышения стабильности горения и снижения влияния внешних факторов воспламенение горючей смеси в запальной горелке происходит внутри ствола на расстоянии нескольких калибров до выходного сечения горелки, наконечник которой имеет исполнение из специальной жаропрочной стали [2]. Благодаря этому некоторые конструкции пилотных горелок имеют стабильную работу даже при обдуве выходного сечения инертным газом или воздухом со скоростью до 66 м/с. Максимальная тепловая мощность и минимальная длина факела и другие конструктивные характеристики запальных устройств регламентированы соответствующими стандартами [3-5].

Большинство конструкций запальных горелок рассчитаны для работы на промышленных объектах, подключенных к магистралям природного газа среднего давления. Согласно ГОСТ Р 52229 [3], основными видами топлив для запальной горелки являются природный газ по ГОСТ 5542 [6] или сжиженный газ по ГОСТ 20448 [7]. Однако для объектов металлургической отрасли существует острая потребность сжигания коксового газа собственного производства с относительно низким давлением присоединения 5-10 кПа, что также допустимо по [3], если данное топливо является основным для тепловой установки. Горелки, предназначенные для работы на природном газе, и

вся газовая система в целом обычно могут хорошо работать на смеси природного газа с водородом с объемной долей последнего не более 15-20% [8-11], в то время как в коксовом газе объемная доля водорода составляет примерно 50%. Наличие в составе смеси самого легкого газа – водорода заметно снижает её плотность, поэтому выполнение условия по сохранению тепловой мощности горелки приводит к увеличению гидравлических потерь в газовых трубках [8]. Эти гидравлические потери в зависимости от длины и диаметра газовых труб могут быть соизмеримы или даже больше величины присоединительного давления, что, очевидно, делает невозможным работу горелки. Поэтому в большинстве подобных случаев требуется увеличение внутренних диаметров газовых труб, которые, во-первых, конструктивно должны поместиться в ствол горелки, а во-вторых, оставить достаточно межтрубного пространства для расхода воздуха. Помимо этого, добавление водорода в топливную смесь увеличивает скорость и температуру пламени, увеличивает диапазон воспламеняемости, снижает яркость пламени и меняет другие факторы процесса горения [12-14].

Единственный показатель горения, который не несет негативного влияния с увеличением объемной доли водорода – это концентрация вредных веществ в дымовых газах. В зависимости от типа горелки, добавление объемной доли водорода до 30% снижает концентрацию NOx в дымовых газах примерно на 20% и незначительно увеличивает концентрацию CO [11]. Учитывая динамику изменения параметров (теплотворная способность, число Воббе, плотность, стехиометрический коэффициент) смеси природного газа с водородом при увеличении объемной концентрации водорода [15], можно ожидать схожее изменение экологических параметров и для коксового газа, где объемная доля водорода составляет порядка 50%.

В данной статье на примере запально-сигнализирующего устройства ЗСУ-ПИ-Exd (производства ООО «НПП „ПРОМА“», Россия) [3] представлена оценка возможности адаптации ЗСУ, работающего на природном газе, для работы на коксовом газе при низком присоединительном давлении с целью минимизации конструкторских изменений устройства. Результатом проведенного исследования стала принципиально новая конструкция запального устройства с двумя идентичными основными газовыми трубками, которая, как оказалось, имеет ряд преимуществ перед аналогами по диаметру и температурному состоянию ствола горелки.

Материалы и методы исследования

Для проведения исследования был взят состав коксового газа, который используется на одном из крупнейших металлургических заводов России (табл. 1). На основе состава коксового газа были рассчитаны его физические характеристики, необходимые для расчета запального устройства (табл. 2) [16, 17].

Таблица 1. Химический состав коксового газа
Table 1. Chemical composition of coke-oven gas

Компонент	Обозначение	Единица измерения	Водород	Метан	Этан	Оксид углерода
Химическая формула	-	-	H ₂	CH ₄	C ₂ H ₆	CO
Молярная масса	M	г/моль	2	16	30	28
Объемная доля*	M_V	%	51	34	5	10
Теплотворная способность	H_i	кВт·ч/м ³	3,527	11,055	19,42	3,52
Плотность при н.у.	$\rho_{н.у.}$	кг/м ³	0,09	0,717	1,26	1,14
Объемный стехиометрический коэффициент	α_V	м ³ /м ³	2,4	9,5	15	2,38
Показатель адиабаты	k		1,4	1,33	1,33	1,33

*Объемные доли округлены до целых значений, из состава топливного газа были исключены компоненты с объемной долей менее 1%.

Таблица 2. Физические характеристики рассматриваемого коксового газа
Table 2. Physical characteristics of the coke-oven gas

Параметр	Обозначение	Единица измерения	Значение
Теплотворная способность	H_i	кВт·ч/м ³	6,88
Плотность при н.у.	$\rho_{н.у.}$	кг/м ³	0,45
Показатель адиабаты	k		1,38
Объемный стехиометрический коэффициент	α_V	м ³ /м ³	5,44

Были рассмотрены две конструкции запальных устройств с эквивалентной тепловой мощностью (рис. 2): пилотная горелка Hegwein ZGO 120 (Durag Group, Германия) и запальная пилотная горелка ЗСУ-ПИ-Exd (НПП «ПРОМА», Россия). Из сравнения технических характеристик устройств (табл. 3) видно, что при эквивалентных величинах тепловой мощности и диаметров стволов горелки величины присоединительного давления и суммарной площади поперечных сечений газовых трубок отличаются у запальников в несколько раз (рис. 3). Третьим принципиальным отличием является способ розжига пламени. Использование в ЗСУ-ПИ-Exd высоковольтной свечи зажигания является более надежным и эффективным техническим решением по сравнению с запальным электродом. Однако высоковольтная свеча зажигания занимает больше пространства в стволе горелки (см. рис. 3).

Обеспечение эквивалентной номинальной тепловой мощности в условиях разного присоединительного давления газа имеет прямую связь с диаметрами горла сопла и газовых трубок. Горло сопла обеспечивает необходимый расход газа в условиях действующего перепада давления до и после него. Статическое давление газа перед соплом, очевидно, меньше присоединительного давления газа к горелке вследствие наличия гидравлических потерь в газовых трубках. Особенно это становится заметным для длинноствольных горелок. Поэтому возможность сохранения тепловой мощности горелки в условиях снижения присоединительного давления обеспечивается не только увеличением диаметра горла сопла, важным является сохранение динамического напора топливного газа за счет увеличения диаметра газовых трубок.

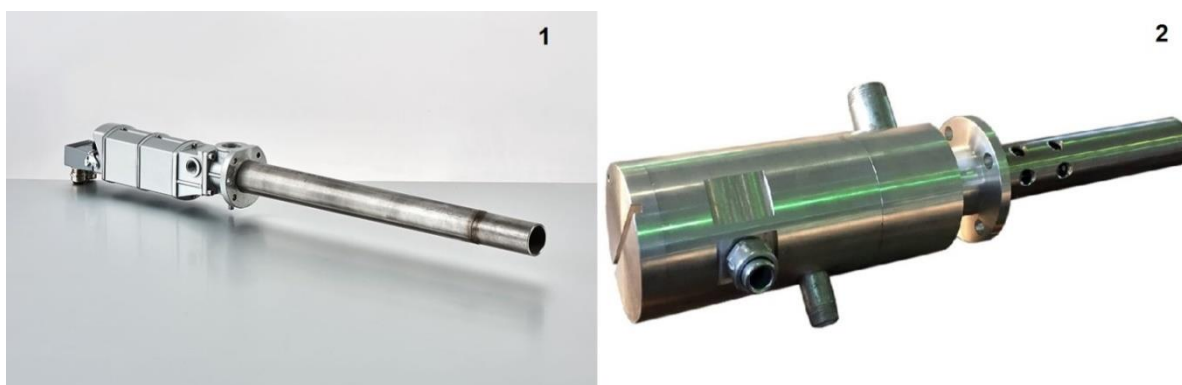


Рис. 2. Запальные горелки: 1 – Hegwein ZGO 120 производства Durag Group, Германия; 2 – ЗСУ-ПИ-Exd производства ООО «НПП „ПРОМА“», Россия

Fig. 2. Ignition burners: 1 is Hegwein ZGO 120 manufactured by Durag Group, Germany; 2 is ZSU-PI-Exd manufactured by LLC NPP PROMA, Russia

Таблица 3. Сравнение заявленных характеристик Hegwein ZGO 120 и ЗСУ-ПИ-Exd
 Table 3. Comparison of the declared characteristics of Hegwein ZGO 120 and ZSU-PI-Exd

Изделие	Единица измерения	Hegwein ZGO 120	ЗСУ-ПИ-Exd	ЗСУ-ПИ-Exd модифицированная
Номинальная тепловая мощность	кВт	120	120	120
Длина факела	мм	600	800	
Диаметр ствола	мм	48	45	45
Суммарная площадь сечений газовых трубок	мм ²	93,6	25,1	99,5
Присоединительное давление газа	кПа	5–15	3–100	5–15
Температура эксплуатации	°С	От -40 до +60	От -60 до +80	
Контроль погасания пламени		Ионизационный датчик		
Розжиг		Запальный электрод	Высоковольтная свеча зажигания	
Тип топлива		Природный газ, сжиженный углеводородный газ, коксовый газ, технологический газ	Природный газ, сжиженный углеводородный газ	Природный газ, сжиженный углеводородный газ, коксовый газ, технологический газ

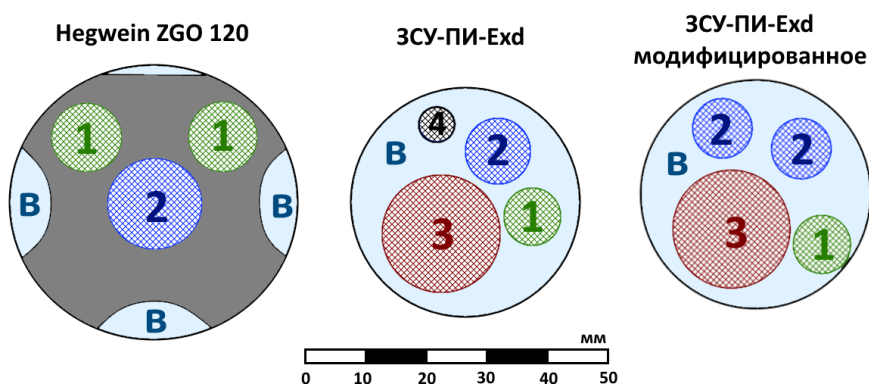


Рис. 3. Распределение площади поперечного сечения запальных горелок: 1 – электрод с керамикой; 2 – основная газовая трубка; 3 – высоковольтная свеча зажигания; 4 – вспомогательная газовая трубка; «В» – проточное сечение для воздуха

Fig. 3. Distribution of the cross-sectional area of the ignition burners: 1 is electrode with ceramics; 2 is main gas tube; 3 is high-voltage spark plug; 4 is auxiliary gas tube; "B" is flow section for air

Для обеспечения тепловой мощности 120 кВт при величине присоединительного давления коксового газа 15 кПа в горелке ЗСУ-ПИ-Exd площадь сечений газовых трубок должна быть увеличена в 3-4 раза. Однако наличие высоковольтной свечи зажигания не позволит разместить газовую трубку требуемого диаметра без увеличения диаметра ствола горелки. Одним из технических решений является использование схемы с двумя эквивалентными газовыми трубками (вместо основной и вспомогательной (см. рис. 3)), суммарная поперечная площадь сечений которых обеспечит приемлемый уровень гидравлических потерь. При этом, в отличие от Hegwein ZGO 120, горелка будет иметь более технически эффективный способ розжига с помощью высоковольтной свечи зажигания.

На основе расчетов гидравлических потерь Δp и необходимого диаметра отверстия d^* горла сопла при докритическом режиме истечения по классическим гидродинамическим соотношениям (1) и (2) [18, 19] для ЗСУ-ПИ-Exd было выбрано конструктивное ис-

полнение с двумя газовыми трубками с суммарной площадью поперечного сечения 99 мм².

$$\Delta p = \frac{1}{(1,8 \lg Re - 1,64)^2} \frac{l}{d} \frac{\rho V^2}{2}, \quad (1)$$

$$d^* = \frac{2}{\sqrt{\pi}} \left[\frac{G}{\mu} \sqrt{\frac{2kP_1\rho_1}{k-1} \left(\left\{ \frac{P_2}{P_1} \right\}^{\frac{2}{k}} - \left\{ \frac{P_2}{P_1} \right\}^{\frac{k+1}{k}} \right)} \right]^{0.5}, \quad (2)$$

где l – длина прямого участка трубы круглого сечения диаметра d ; V – среднерасходная скорость газа; ρ – плотность газа; $Re = Vd/\nu$ – число Рейнольдса; ν – кинематическая вязкость; G – массовый расход газа; P – давление; k – показатель адиабаты; μ – коэффициент расхода; индексы 1 и 2 – параметры среды до и после отверстия.

На первом этапе исследования были подготовлены цифровые двойники изделий Hegwein ZGO 120 и

модифицированной горелки ЗСУ-ПИ-Exd, работа которых была математически смоделирована в пакете ANSYS Fluent в псевдостационарной постановке. Движение неразрывной сплошной среды описывалось уравнениями сохранения импульса, энергии и компонентов смеси с общим видом

$$\frac{\partial(\rho\Phi)}{\partial t} + \text{div}(\rho\Phi u) = \text{div}(\Gamma \text{grad}\Phi) + S_\Phi, \quad (3)$$

где Φ – зависимые переменные; Γ – коэффициент переноса переменной Φ ; u – скорость среды; ρ – плотность среды; S_Φ – источниковый член уравнения движения переменной Φ .

Для моделирования турбулентности использовалась изотропная модель k - ε Standart. Процесс горения коксового газа (см. табл. 1) рассчитывался по модели без предварительного смешивания (non premixed combustion model), где термохимическое состояние сплошной среды связано с сохраняющейся скалярной величиной, известной как фракция смеси f . Взаимодействие турбулентности и химии учитывается с предполагаемой формой, являющейся β -функцией плотности вероятности (PDF). Доля смеси может быть выражена через атомную массовую долю:

$$f = \frac{Z_i - Z_{i,O}}{Z_{i,T} - Z_{i,O}}, \quad (4)$$

где Z_i – массовая доля элемента i , нижние индексы: O – значение на входе окислителя; T – значение на входе топлива.

При условии равенства коэффициентов диффузии (когда турбулентная конвекция подавляет молекулярную диффузию) уравнения можно свести к единому осредненному по Фавру (осредненному по плотности) уравнению для фракции смеси:

$$\frac{\partial(\rho \bar{f})}{\partial t} + \nabla(\rho \bar{u} \bar{f}) = \nabla \left(\left[\frac{\kappa}{c_p} + \frac{\mu_T}{\sigma_T} \right] \nabla \bar{f} \right), \quad (5)$$

где κ – ламинарная теплопроводность смеси; c_p – удельная теплоемкость смеси; σ_T – число Прандтля; μ_T – турбулентная вязкость.

Для замыкания системы и связи химических реакций с турбулентностью также решается уравнение для дисперсии фракции смеси:

$$\frac{\partial(\rho \overline{f'^2})}{\partial t} + \nabla(\rho \bar{u} \overline{f'^2}) = \nabla \left(\left[\frac{\kappa}{c_p} + \frac{\mu_T}{\sigma_T} \right] \nabla \overline{f'^2} \right) + C_g \mu_T (\nabla \bar{f})^2 - C_d \rho \frac{\varepsilon}{k} \overline{f'^2}, \quad f' = f - \bar{f}, \quad (6)$$

где C_d и C_g – константы; ε – скорость диссипации кинетической энергии турбулентности; k – кинетическая энергия турбулентности.

Тандем модели турбулентности k - ε Standart с моделью горения без предварительного смешивания для сжигания коксового газа и родственных смесей также использовался в недавней работе [20], где результаты расчетов были признаны удовлетворительными. По этой причине отдельных тестов математической постановки задачи по расчету горения коксового газа в данном исследовании не проводилось. Для моделирования излучения была выбрана диффузионная модель P-1, которая благодаря допущению об изотропности поля излучения является более экономичной. Наименование P-1 обусловлено тем, что поток энергии излучения пропорционален градиенту плотности энергии излучения. Как показывает практика, неопределенность результатов расчета излучения моделью P-1 является приемлемой для факельных установок.

Для связи давления и скорости использовалась схема Coupled. В пространственной дискретизации для членов конвекции во всех уравнениях переноса использовалась противопоточная схема второго порядка. Для дискретизации давления использовался метод PRESTO!. Абсолютные критерии сходимости для всех параметров невязок были ограничены величиной 10^{-4} , за исключением уравнений энергии и P-1, где параметры невязок были ограничены величиной 10^{-6} .

На рис. 4 изображена расчетная модель, включающая полный проточный тракт коксового газа и воздуха в стволе горелки длиной 2300 мм от места присоединения до выхода в цилиндрическую топку длиной 1500 мм и диаметром 300 мм. Расход коксового газа обеспечивался за счет перепада присоединительного давления (15 кПа) и давления на выходе из топки (0 кПа). Расход воздуха обеспечивался за счет перепада присоединительного давления (15 кПа) и давления на выходе из топки (0 кПа). В первом приближении расчетные области были разделены на 2 миллиона вычислительных доменов тетраэдральной формы. Проверка сеточной сходимости была выполнена постепенным увеличением масштаба разбиения зоны горения и смешивания компонентов до тех пор, пока графики температуры на центральной продольной оси топочной камеры имели расхождение более 3%. Окончательное количество расчетных доменов в моделях составило порядка 3,5 миллионов. В процессе расчета также выполнялась адаптация пристеночных расчетных доменов по параметру y^+ в соответствии с требованиями выбранной модели турбулентности k - ε .

Для оценки температурного состояния элементов горелки, находящихся в зоне воздействия температур, в расчет также были добавлены твердотельные тела, которые имели сопряженный тип сеточного разбиения с областями движения сжимаемой среды.

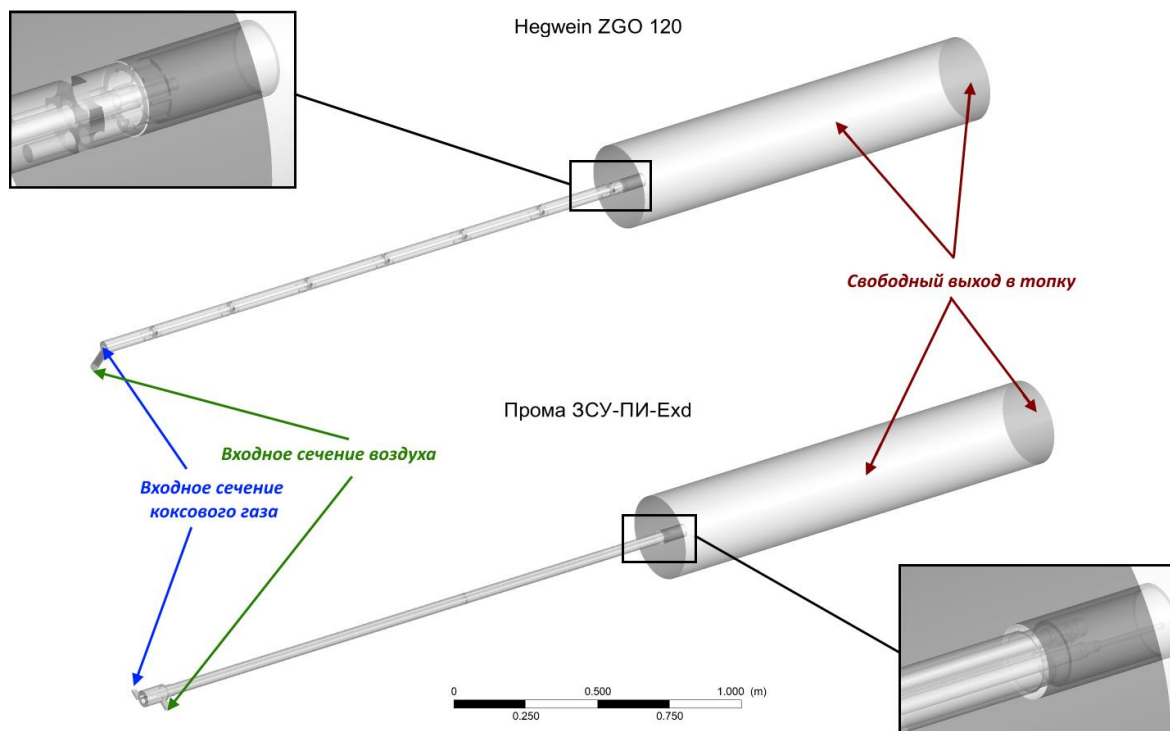


Рис. 4. Расчетные области для численного моделирования
 Fig. 4. Computational domains for numerical simulation

Полученные результаты и их обсуждение

В табл. 4 и на рис. 5 представлены сопоставления результатов численного моделирования цифровых двойников рассмотренных горелок. Номинальная тепловая мощность горелки ЗСУ-ПИ-Exd по результатам расчетов оказалась незначительно меньше 120 кВт по причине неучтенных потерь давления в проточном тракте при теоретической оценке. Очевидно, что при необходимости довести значение тепловой мощности до 120 кВт можно за счет небольшой корректировки диаметра горла сопла. С другой стороны, следует помнить о непостоянстве состава коксового газа и его теплотворной способности, поэтому полученное отклонение в 3% является условным и допустимым. Вторым важным параметром запальной или пилотной горелки является длина факела, а в контексте данного исследования – влияние подачи топлива

через две (ЗСУ-ПИ-Exd) газовые трубки вместо одной (Hegwein ZGO 120).

Номинальную длину факела можно оценить как расстояние от выходного сечения горелки до точки, где концентрация диоксида углерода (CO₂) понизится до уровня 95% от достигнутого максимального значения. Полученные по результатам численного моделирования оценки концентрации диоксида углерода (CO₂) на центральной продольной оси сопел горелок показывают (см. рис. 5), что техническое решение, примененное в устройстве горелки ЗСУ-ПИ-Exd, не оказывает существенного влияния на длину факела. При подаче коксового газа из двух сопел длина факела становится короче лишь на 8%, по сравнению с вариантом подачи из одного сопла. Укорачивание факела ожидаемо сопровождается увеличением его диаметра. Это всё наглядно видно и на сопоставлении температурных полей в топке (рис. 6).

Таблица 4. Сравнение расчетных характеристик горелок Hegwein ZGO 120 и ЗСУ-ПИ-Exd при работе на коксовом газе
 Table 4. Comparison of the calculated characteristics of the Hegwein ZGO 120 and ZSU-PI-Exd burners when operating on coke gas

Характеристики	Единица измерения	Hegwein ZGO 120	ЗСУ-ПИ-Exd модифицированная
Номинальная тепловая мощность	кВт	121	116
Длина факела	мм	655	590/605*
Внешний диаметр ствола	мм	50	45
Суммарная площадь сечений газовых трубок	мм ²	93,6	99,5
Присоединительное давление газа	кПа	15	15

*Длина факела на центральной оси одного из двух сопел / длина объединенного факела от двух сопел.

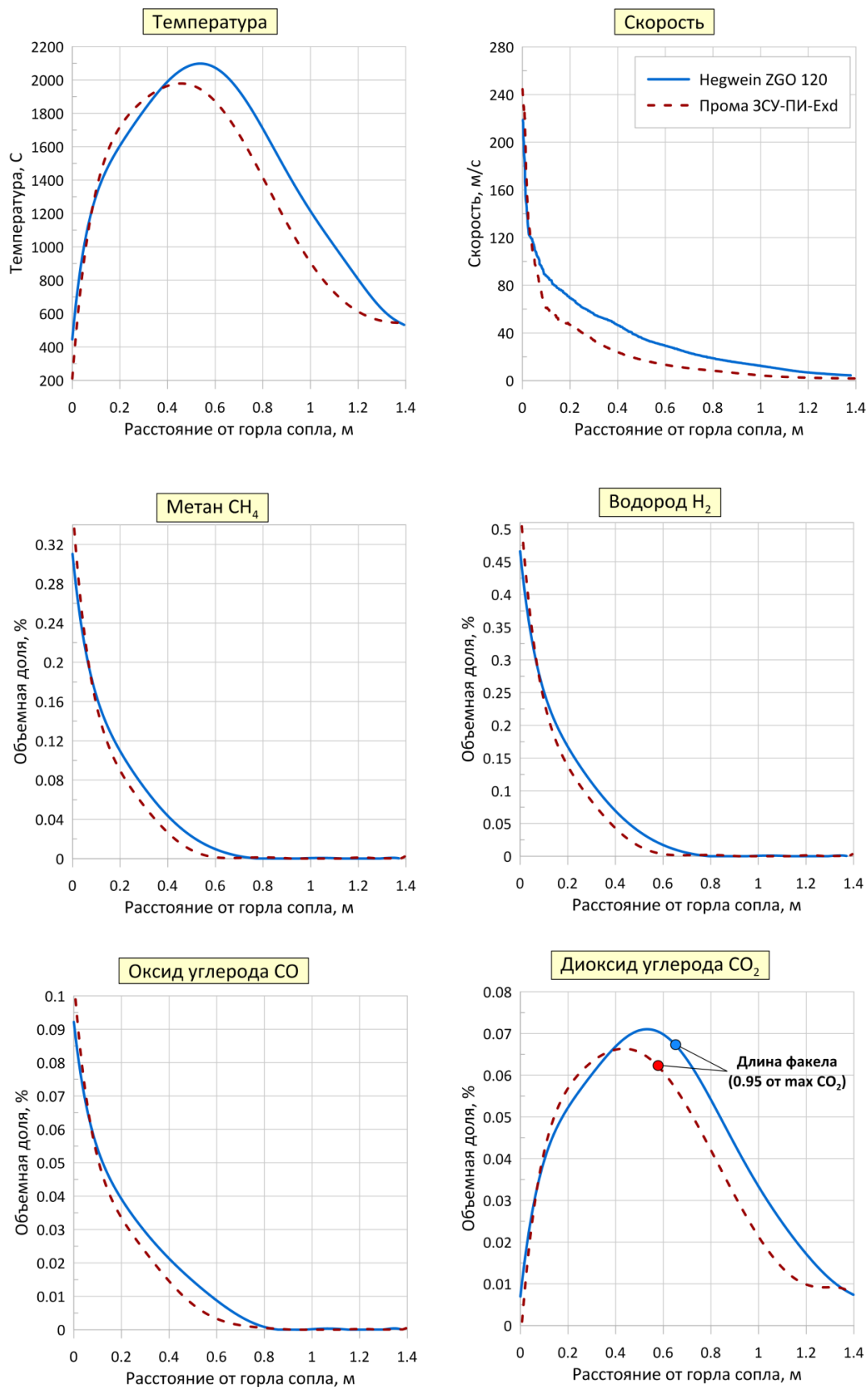


Рис. 5. Параметры на центральной продольной оси сопел горелок
 Fig. 5. Parameters on the central longitudinal axis of the burner nozzles

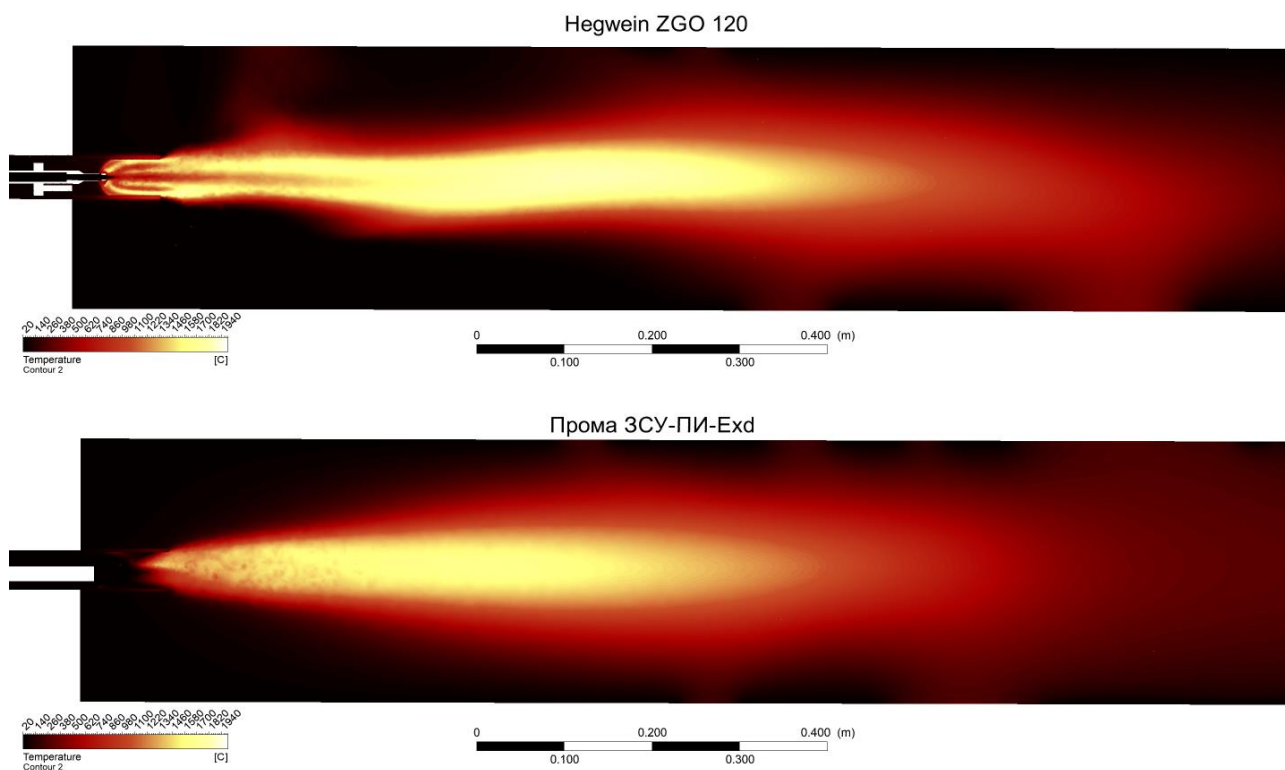


Рис. 6. Поля температуры горения коксового газа
 Fig. 6. Temperature field of coke-oven gas combustion

Графики распределения объемной доли метана (CH_4) и водорода (H_2) показывают полное сгорание топливного газа для обеих конструкций горелки (см. рис. 5). Единственным явным недостатком формирования факела из двух источников является более интенсивная скорость торможения струи, что ухудшает стабилизацию факела при боковом обдуве внешним источником. Сокращение длины стабильного участка факела от воздействия внешних факторов можно оценить величиной порядка 200 мм.

Наиболее важным результатом исследования является сопоставление температурных полей сжимаемых и твердотельных сред. Известно, что увеличение источника подачи топливного газа при сохранении тепловой мощности способствует улучшению перемешивания с воздухом и снижению локальных температурных экстремумов. Главным образом, эта техника используется для повышения класса экологичности горелочного устройства – снижения концентрации оксидов азота (NO_x) в дымовых газах, механизм образования которых имеет прямую связь с температурой. В горелке ЗСУ-ПИ-Exd с двумя источниками подачи топливного газа максимальная температура в факеле оказалась примерно на 100°C меньше (см. рис. 5). В сравнении с основной горелкой, уровень выбросов NO_x в запальной или пилотной горелке почти на порядок меньше, поэтому в данной работе

мы дополнительно не оценивали этот параметр как второстепенный в масштабах всей энергетической установки.

Распределение температуры на начальном участке центральной оси факела (порядка 80 мм) в пределах внутреннего пространства наконечника ствола для обоих горелочных устройств является эквивалентным (см. рис. 5). Температурное состояние стальных стенок оголовков ЗСУ-ПИ-Exd и Hegwein ZGO 120 порядка 700°C (рис. 7) удовлетворяет требованиям [API 537]. Однако температурное состояние оголовка Hegwein ZGO 120 оказалось более напряженным. Область высоких температур оголовка ствола Hegwein ZGO 120 соответствует расположению электродов, наличие которых приводит к неравномерности профиля скорости и сопутствующего охлаждения стенки оголовка вниз по потоку. Это также видно и на рис. 3: проточные отверстия «В» для воздуха у Hegwein ZGO 120 расположены вдалеке от электродов «1». У стенок оголовка ЗСУ-ПИ-Exd также наблюдается неравномерный нагрев стенки оголовка, но причиной этому является уже вынужденное неконцентрическое расположение газовых сопел, вблизи которых и наблюдается область максимальных температур стенки оголовка. Но, с другой стороны, такая конструкция обеспечивает более равномерное распределение охлаждающего потока воздуха в сечении (см. рис. 3) и лучшее охлаждение стенки оголовка.

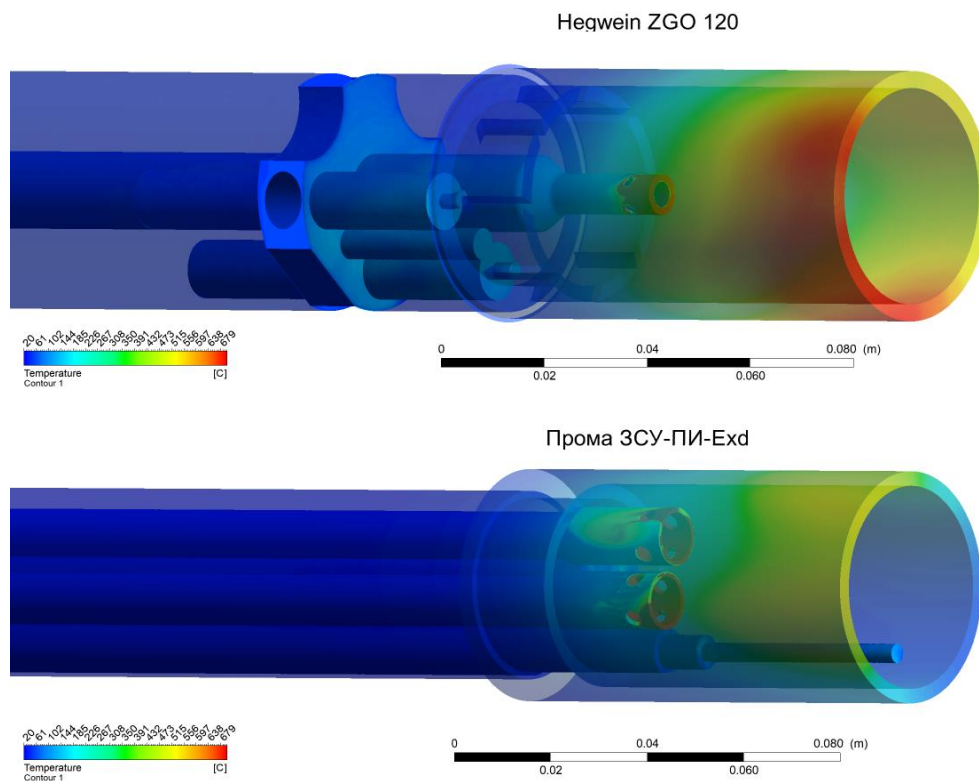


Рис. 7. Температурное состояние стальных деталей
Fig. 7. Temperature condition of steel parts

Заклучение

В данной работе впервые подробно рассмотрен процесс адаптации запальной горелки ЗСУ-ПИ-Exd, соответствующей ГОСТ Р 52229-2004, к работе на коксовом газе в условиях низкого присоединительного давления. В условиях сохранения величины внешнего диаметра ствола горелки была предложена новая конструкция запальной горелки ЗСУ-ПИ-Exd с двумя эквивалентными газовыми трубками. Данное исполнение позволило сохранить в составе горелки высоковольтную свечу зажигания (см. рис. 3), что является существенным преимуществом перед аналогичными изделиями данного класса и повышает общую надежность работы устройства. Сопоставление результатов численного моделирования цифровых двойников изделий с одной газовой трубкой (Hegwein ZGO 120) и с двумя газовыми трубками (ЗСУ-ПИ-Exd) показали схожие параметры горения факела на центральной оси (см. рис. 5). При этом благодаря более равномерному профилю скорости в оголовке ствола температурная напряженность стальных элементов горелки ЗСУ-ПИ-Exd оказалась ниже, чем у рассмотренного аналога.

Список источников

1. Baukal Jr C. E. (ed.). The John Zink Hamworthy Combustion Handbook: Volume 3-Applications. New York: CRC Press, 2012. 454 p.
2. Parker J., Guerra R. Advanced pilot technology: Ignition, flame detection and re-ignition // Process Safety Progress. 1996, vol. 15, no. 4, pp. 227-229. DOI:10.1002/prs.680150409.
3. ГОСТ Р 52229-2004. Устройства запально-защищенные. Общие технические условия. М.: Изд-во стандартов, 2004. 15 с.
4. API 537. Flare Details for Petroleum, Petrochemical, and Natural Gas Industries, Third Edition, Includes Addendum Washington: American Petroleum Institute, 2020. 195 p.
5. ISO 25457. Petroleum, petrochemical and natural gas industries – Flare details for general refinery and petrochemical service. Geneva: ISO copyright office, 2008. 128 p.
6. ГОСТ 5542-2022. Газ природный промышленного и коммунально-бытового назначения. Технические условия. М.: Российский институт стандартизации, 2022. 18 с.
7. ГОСТ 20448-2018. Газы углеводородные сжиженные топливные для коммунально-бытового потребления. Технические условия. М.: Изд-во стандартов, 2018. 15 с.
8. Aniello A. et al. Hydrogen substitution of natural-gas in premixed burners and implications for blow-off and flashback limits // International Journal of Hydrogen Energy. 2022, vol. 47, no. 77, pp. 33067-33081. DOI:10.1016/j.ijhydene.2022.07.066.
9. Safe Operation of Natural Gas Appliances Fuelled with Hydrogen & Natural Gas Mixtures (Progress Obtained in the NaturalHy-Project) / De Vries H., Florisson O., Tiekstra G.C. // International Conference on Hydrogen Safety. Derby: Igem House, 2007. Pp. 1-12.

10. Blending hydrogen into natural gas pipeline networks: a review of key issues / Melaina M. W., Antonia O., Penev M. Colorado: National Renewable Energy Laboratory, 2013. 131 p.
11. Impact of hydrogen/natural gas blends on partially pre-mixed combustion equipment: NOx emission and operational performance / Glanville P., Fridlyand A., Sutherland B. et al. // *Energies*. 2022, vol. 15, no.5, pp. 1706. DOI:10.3390/en15051706.
12. Impact of Hydrogen Admixture on Combustion Processes—Part II: Practice / Schaffert J., Leicher J., Burmeister F. et al. Berlin: THyGA, 2020. 75 p.
13. Implications of Increased Renewable Natural Gas on Appliance Emissions and Stability / McDonell V.G. Zhao Y., Choudhury S. et al. California: Energy Commission, 2020. 101 p.
14. Appliance and equipment performance with hydrogen-enriched natural gases / Suchovsky C.J., Ericksen L., Williams T.A. et al. // Canadian Standards Association, Toronto: ON, 2021. 56 p.
15. Compressed Natural Gas Vehicle Fuel Surv CRC Project No. PC-2-12 / George D.L., Poemer N.W., Ridens B.L. et al. San Antonio: Southwest Research Institute. 2014. 194 p.
16. Engineering ToolBox. URL: <https://www.engineeringtoolbox.com> (дата обращения: 28.07.2024)
17. Thermodynamic Properties and Gas Mixtures. Thermodynamics, Gas Dynamics, and Combustion / Foust III H.C. Cham: Springer International Publishing, 2021. Pp. 125-148.
18. Idelchik I.E. Flow resistance: a design guide for engineers. New York: Routledge, 2017. 416 p. DOI: 10.1201/9780203755754.
19. Лойцянский Л.Г. Механика жидкости и газа: учебник для вузов. М.: Дрофа, 2003. 840 с.
20. Bose D., Kumar I., Hens A. Enhancing fuel-air mixing in COG-BOG non-premixed combustion: A CFD analysis with different turbulent models // *Journal of the Indian Chemical Society*. 2024, vol. 101, no. 9, 101222. DOI: 10.1016/j.jics.2024.101222.
6. State standard GOST 5542-2022. Natural gas for industrial and municipal purposes. Technical conditions. Moscow: Russian Institute of Standardization, 2022. 18 p. (In Russ.)
7. State standard GOST 20448-2018. Liquefied hydrocarbon gases for domestic and public consumption. Technical conditions. Moscow: Standards Publishing House, 2018. 15 p. (In Russ.)
8. Aniello A. et al. Hydrogen substitution of natural-gas in premixed burners and implications for blow-off and flashback limits. *International Journal of Hydrogen Energy*. 2022;47(77):33067-33081. DOI: 10.1016/j.ijhydene.2022.07.066
9. De Vries H., Florisson O., Tiekstra G.C. Safe Operation of Natural Gas Appliances Fuelled with Hydrogen & Natural Gas Mixtures (Progress Obtained in the NaturalHy-Project). International Conference on Hydrogen Safety. Derby: IGEN House, 2007, pp. 1-12.
10. Melaina M. W., Antonia O., Penev M. Blending hydrogen into natural gas pipeline networks: a review of key issues. Colorado: National Renewable Energy Laboratory, 2013. 131 p.
11. Glanville P., Fridlyand A., Sutherland B. et al. Impact of hydrogen/natural gas blends on partially premixed combustion equipment: NOx emission and operational performance. *Energies*. 2022;15(5):1706. DOI: 10.3390/en15051706.
12. Schaffert J., Leicher J., Burmeister F. et al. Impact of Hydrogen Admixture on Combustion Processes—Part II: Practice. Berlin: THyGA, 2020. 75 p.
13. McDonell V.G. Zhao Y., Choudhury S. et al. Implications of Increased Renewable Natural Gas on Appliance Emissions and Stability. California: Energy Commission, 2020. 101 p.
14. Suchovsky C.J., Ericksen L., Williams T.A. et al. Appliance and equipment performance with hydrogen-enriched natural gases. Canadian Standards Association, Toronto: ON, 2021. 56 p.
15. George D.L., Poemer N.W., Ridens B.L. et al. Compressed Natural Gas Vehicle Fuel Surv CRC Project No. PC-2-12. San Antonio: Southwest Research Institute. 2014. 194 p.
16. Engineering ToolBox. Available at: <https://www.engineeringtoolbox.com> (Accessed July 28, 2024)
17. Foust III H.C. Thermodynamic Properties and Gas Mixtures. Thermodynamics, Gas Dynamics, and Combustion. Cham: Springer International Publishing, 2021, pp. 125-148.
18. Idelchik I.E. Flow resistance: a design guide for engineers. New York: Routledge, 2017. 416 p. DOI: 10.1201/9780203755754
19. Loitsyansky L.G. *Mekhanika zhidkosti i gaza: ucheb. dlya vuzov* [Mechanics of liquids and gases: textbook]. Moscow: Drofa, 2003. 840 p. (In Russ.)
20. Bose D., Kumar I., Hens A. Enhancing fuel-air mixing in COG-BOG non-premixed combustion: A CFD analysis with different turbulent models. *Journal of the Indian Chemical Society*. 2024;101(9):101222. DOI: 10.1016/j.jics.2024.101222.

References

1. Baukal Jr C. E. (ed.). The John Zink Hamworthy combustion handbook: Volume 3-Applications. New York: CRC press, 2012. 454 p.
2. Parker J., Guerra R. Advanced pilot technology: Ignition, flame detection and re-ignition. *Process Safety Progress*. 1996;15(4):227-229. DOI:10.1002/prs.680150409
3. State standard GOST P 52229-2004. Ignition-protected devices. General specifications. Moscow: Standards Publishing House, 2004. 15 p. (In Russ.)
4. API 537. Flare Details for Petroleum, Petrochemical, and Natural Gas Industries, Third Edition, Includes Addendum Washington: American Petroleum Institute, 2020. 195 p.
5. ISO 25457. Petroleum, petrochemical and natural gas industries — Flare details for general refinery and petrochemical service. Geneva: ISO copyright office, 2008. 128 p.

Поступила 19.08.2024; принята к публикации 12.12.2024; опубликована 28.03.2025
Submitted 19/08/2024; revised 12/12/2024; published 28/03/2025

Телешев Михаил Игоревич – заместитель директора по производству, ООО «НПП „ПРОМА“», ООО «Завод горелочного оборудования и автоматики „ПРОМА“», Казань, Россия.
Email: teleshev@promav.ru.

Саушин Илья Ирекович – кандидат технических наук, заместитель директора по науке, ООО «НПП „ПРОМА“», ООО «Завод горелочного оборудования и автоматики „ПРОМА“», старший научный сотрудник, ФИЦ КазНЦ РАН, Казань, Россия.
Email: saushin@promav.ru. ORCID 0000-0003-4958-1507

Гольцман Анна Евгеньевна – кандидат технических наук, старший научный сотрудник, ФИЦ КазНЦ РАН, Казань, Россия.
Email: an116ya@mail.ru. ORCID 0000-0001-6015-670X

Хуснутдинова Эльвира Мусавировна – кандидат технических наук, доцент, Казанский (Приволжский) федеральный университет, Казань, Россия.
Email: rr-088@mail.ru. ORCID 0000-0002-9496-5318

Хамидуллина Гульнара Рафкатовна – доктор экономических наук, профессор, Казанский (Приволжский) федеральный университет, Казань, Россия.
Email: gulnarah@list.ru. ORCID 0000-0001-9781-4841

Фахреева Диляра Рамилевна – кандидат педагогических наук, доцент, Казанский (Приволжский) федеральный университет, Казань, Россия.
Email: diliara17_91@mail.ru

Mikhail I. Teleshev – Deputy Director for Production, LLC NPP PROMA, Kazan, Russia;
LLC PROMA Combustion Equipment and Automation Plant, Kazan, Russia.
Email: teleshev@promav.ru

Ilya I. Saushin – PhD (Eng.), Deputy Director for Science, Senior Researcher LLC NPP PROMA, Kazan, Russia;
LLC PROMA Combustion Equipment and Automation Plant, Kazan, Russia;
Kazan Scientific Center of the Russian Academy of Sciences, Kazan, Russia.
Email: saushin@promav.ru. ORCID 0000-0003-4958-1507

Anna E. Goltsman – PhD (Eng.), Senior Researcher, Kazan Scientific Center of the Russian Academy of Sciences, Kazan, Russia.
Email: an116ya@mail.ru. ORCID 0000-0001-6015-670X

Elvira M. Khusnutdinova – PhD (Eng.), Associate Professor, Kazan Federal University, Kazan, Russia.
Email: rr-088@mail.ru. ORCID 0000-0002-9496-5318

Gulnara R. Khamidullina – DrSc (Econ.), Professor, Kazan Federal University, Kazan, Russia.
Email: gulnarah@list.ru. ORCID 0000-0001-9781-4841

Dilyara R. Fakhreeva – PhD, Associate Professor, Kazan Federal University, Kazan, Russia.
Email: diliara17_91@mail.ru