



УДК 621.365.2:662.612.11/321/322

DOI 10.17073/0368-0797-2025-5-454-460



Оригинальная статья

Original article

СРАВНИТЕЛЬНЫЙ АНАЛИЗ КИНЕТИЧЕСКОГО И ДИФФУЗИОННОГО РЕЖИМОВ ГОРЕНИЯ ПРИРОДНОГО ГАЗА В ГОРЕЛКАХ ДУГОВОЙ СТАЛЕПЛАВИЛЬНОЙ ПЕЧИ

И. В. Глухов^{1, 2} , Г. В. Воронов¹, О. Ю. Шешуков^{1, 3}, М. В. Калганов^{1, 2}

¹ Уральский Федеральный университет имени первого Президента России Б.Н. Ельцина (Россия, 620002, Екатеринбург, ул. Мира, 19)

² ОАО «Научно-исследовательский институт металлургической теплотехники» (ВНИИМТ) (Россия, 620137, Екатеринбург, ул. Студенческая, 16)

³ Институт металлургии имени академика Н.А. Ватолина Уральского отделения РАН (620016, Россия, Екатеринбург, ул. Амундсена, 101)

 ermia12@yandex.ru

Аннотация. В современных дуговых сталеплавильных печах (ДСП) для снижения расхода электроэнергии и интенсификации тепловой работы широко применяется нагрев шихты продуктами сгорания природного газа с технологическим кислородом. В существующих горелках, применяемых на ДСП, газ и кислород подаются раздельно через газокислородные и рафинирующие горелки, что обеспечивает диффузионный режим горения. Диффузионный режим в условиях использования в рабочем объеме ДСП имеет ряд недостатков, таких как неоптимальное распределение температурных и концентрационных полей продуктов сгорания, повышенный угар железосодержащих компонентов шихты. В данной работе представлены результаты расчетного исследования физико-химических свойств продуктов сгорания по длине факела для горелок фирм VAI FUCHS, SMS DEMAG и НТПФ «Эталон» при концентрации кислорода в окислителе 95 мас. %. Были проанализированы результаты компьютерного моделирования температурных полей факелов с целью оценки риска «прокоска» пламени во внутренний объем горелки. Авторы провели сравнительное исследование характеристик факелов в горелочных устройствах с диффузионным и кинетическим режимами горения. На основании полученных данных предложен переход от диффузионного режима сжигания природного газа к кинетическому, что может повысить энергоэффективность использования горелок, равномерность температурных и концентрационных полей продуктов сгорания, а также снизить угар железосодержащей шихты. Исследование производилось с помощью компьютерного моделирования в пакете программ ANSYS в модуле CFX. Полученные результаты могут быть полезны для оптимизации тепловых процессов в рабочем объеме ДСП, снижения расхода электроэнергии и предотвращения аварийных режимов эксплуатации горелок.

Ключевые слова: дуговая сталеплавильная печь, горелка, природный газ, кислород, факел, концентрация, температурное поле, режим, диффузионный, кинетический

Для цитирования: Глухов И.В., Воронов Г.В., Шешуков О.Ю., Калганов М.В. Сравнительный анализ кинетического и диффузионного режимов горения природного газа в горелках дуговой сталеплавильной печи. *Известия вузов. Черная металлургия*. 2025;68(5):454–460.

<https://doi.org/10.17073/0368-0797-2025-5-454-460>

COMPARATIVE ANALYSIS OF KINETIC AND DIFFUSION MODES OF NATURAL GAS COMBUSTION IN EAF BURNERS

I. V. Glukhov^{1,2} , G. V. Voronov¹, O. Yu. Sheshukov^{1,3}, M. V. Kalganov^{1,2}

¹ Ural Federal University named after the first President of Russia B.N. Yeltsin (19 Mira Str., Yekaterinburg 620002, Russian Federation)

² OJSC “Scientific Research Institute of Metallurgical Heat Engineering” (VNIIMT) (16 Studencheskaya Str., Yekaterinburg 620137, Russian Federation)

³ Vatolin Institute of Metallurgy of the Ural Branch of the Russian Academy of Sciences (101 Amundsen Str., Yekaterinburg 620016, Russian Federation)

ermia12@yandex.ru

Abstract. In modern electric arc furnaces (EAF), charge heating by natural gas (NG) combustion products with process oxygen is widely used to reduce the power consumption and intensify the thermal performance. In existing EAF burners, gas and oxygen are supplied separately through oxygen gas and refining burners, which ensures the diffusion combustion mode. The diffusion mode in conditions of EAF working space has a number of disadvantages, such as non-optimal distribution of temperature and concentration fields of combustion products, increased burn-off of iron-containing components of the charge. This paper presents the results of a computational study of the physico-chemical properties of combustion products along the torch length for the burners of VAI FUCHS, SMS DEMAG and NTPF Etalon Ltd. companies at oxygen concentration in the oxidizer of 95 wt. %. The results of computer modeling of temperature fields in the torches were analyzed in order to assess the risk of flame “slip” into the burner internal volume. The authors carried out a comparative study of the characteristics of torches in the burner devices with diffusion and kinetic combustion modes. Based on the data obtained, a transition from the diffusion mode of natural gas combustion to the kinetic mode is proposed, which can increase the energy efficiency of using burners, uniformity of temperature and concentration fields of combustion products, and reduce carbon monoxide of the iron-containing charge. The study was performed using computer modeling in ANSYS software package in CFX module. The obtained results can be useful for optimizing thermal processes in EAF working space, reducing power consumption and preventing emergency operation of burners.

Keywords: EAF, burner, natural gas, oxygen, torch, concentration, temperature field, mode, diffusion, kinetic

For citation: Glukhov I.V., Voronov G.V., Sheshukov O.Yu., Kalganov M.V. Comparative analysis of kinetic and diffusion modes of natural gas combustion in EAF burners. *Izvestiya. Ferrous Metallurgy*. 2025;68(5):454–460. <https://doi.org/10.17073/0368-0797-2025-5-454-460>

ВВЕДЕНИЕ

Диффузионное горение природного газа с технологическим кислородом рассмотрено при условии, когда газовая смесь образуется в свободном объеме печи за пределами горелки [1 – 3]. При диффузионном режиме сжигания газ и окислитель подают раздельно до их встречи на границе раздела потока газа и окислителя. За счет молекулярной диффузии образуется смесь, характерная для ламинарного диффузионного пламени при малых скоростях потоков или мольной диффузии, способствующей образованию крупномасштабной турбулентности, свойственной турбулентному диффузионному пламени. Смесь газа и окислителя частично образуется до момента ее воспламенения и в процессе горения, что создает большие трудности при анализе такого процесса. Температура, состав продуктов сгорания, их физические и теплофизические свойства в зоне горения, разделенной границей (фронт пламени) с исходной смесью, оказывают влияние как на первичную стадию – смешение, так и на скорость химических реакций.

Температура в зоне горения диффузионного пламени соответствует температуре горения стехиометрической предварительно перемешанной смеси при условии, что коэффициент температуропроводности равен коэффициенту взаимодиффузии газа и окисли-

теля, а также отсутствуют теплопотери в окружающую среду. Основные положения теории диффузионного горения были разработаны и опубликованы в работах [4 – 6]. На действующих пламенных печах с учетом их конструктивных особенностей, технологического процесса, тепловых и температурных режимов целесообразно реализовать кинетический способ сжигания природного газа с кислородом, особенность которого состоит в подготовке предварительной хорошо перемешанной смеси [7 – 10]. Практически из цикла последовательно происходящих физико-химических процессов исключается подготовка смеси к горению. Нагрев и плавление исходных материалов фактически происходит только за счет тепло- и массообмена с продуктами сгорания при отсутствии горения углеводородов исходного газа [11 – 14].

Таким образом, целью работы является выполнение сравнительного анализа кинетического и диффузионного режимов горения природного газа с кислородно-воздушной смесью (КВС) в горелках дуговых сталеплавильных печей (ДСП) на основе моделирования температурных полей и концентраций CO/H_2 .

Задачи:

Сравнить характеристики факелов горелки VG (кинетический режим) и аналогов (VAI FUCHS, SMS DEMAG, НТПФ «Эталон») при сжигании природного газа с кислородом.

Оценить влияние режимов горения на:

- распределение температурных полей;
- максимальные концентрации CO и H_2 .

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

В работе проведено сравнительное исследование характеристик факелов при сжигании природного газа с КВС в горелочных устройствах различных конструкций. Исследование проводилось для:

- диффузионных горелок, применяемых на современных ДСП, производства фирм НТПФ «Эталон», SMS DEMAG и VAI FUCHS;

- горелки версии VG перспективной конструкции с кинетическим режимом горения, обеспечивающей предварительное смешение компонентов в диффузоре (рис. 1).

Проведение экспериментальных исследований требует значительных временных и финансовых затрат, связанных с разработкой методик испытаний и применением специализированного измерительного оборудования. В отличие от натурных экспериментов, компьютерное моделирование процессов горения предоставляет возможность оптимизировать конструкцию горелки без необходимости изготовления промежуточных вариантов, а также оперативно анализировать влияние конструктивных параметров и режимов работы на формирование факела и его

характеристики. Компьютерное моделирование позволяет сократить сроки разработки и получить оценку эффективности различных конструктивных изменений и решений [15 – 17].

Моделирование процессов горения выполнено в программном комплексе ANSYS (модуль CFX) с применением:

- расширенной когерентной модели Flamelet (ECFM);

- расчета теплопереноса «Total Energy»;

- модели турбулентности « k -Epsilon».

Исходные граничные параметры для горелочных устройств:

- расход кислорода 0,553 кг/с (95 мас. %);

- расход природного газа 0,092 кг/с (состав природного газа приведен к эквивалентной концентрации метана 100 мас. %).

Изменение температуры (T , К) максимальной концентрации оксида углерода (CO) и водорода (H_2) в поперечном сечении продуктов сгорания по длине факела представлено на рис. 2 – 4.

В результате исследования факелов с кинетическим и диффузионным режимами горения получены сравнительные показатели работы горелок фирм НТПФ «Эталон»; VAI FUCHS; SMS DEMAG, создающих диффузионный режим горения, и горелки VG, создающей кинетический режим при равном расходе природного газа и кислорода.

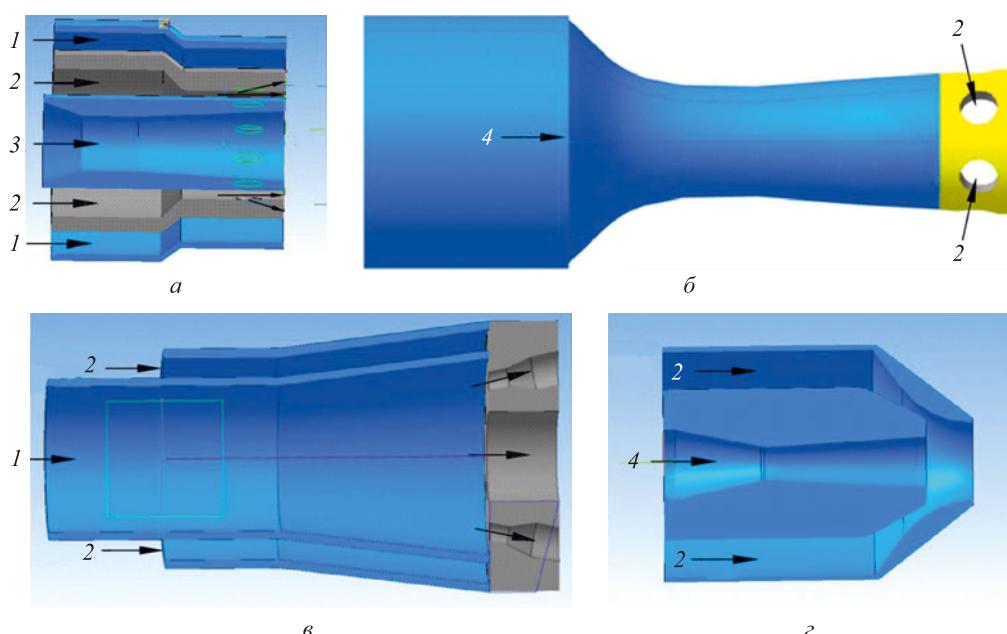


Рис. 1. Схемы конструкций газокислородных горелок:

а – фирмы VAI FUCHS; *б* – версии VG; *в* – фирмы НТПФ «Эталон»; *г* – фирмы SMS DEMAG

1 – подвод кислорода на горение; 2 – подвод природного газа;

3 – подвод кислорода в режиме фришевания; 4 – подвод кислорода на горение и в режиме фришевания

Fig. 1. Schemes of gas-oxygen burners designs:

a – VAI FUCHS; *б* – VG; *в* – NTPF Etalon; *г* – SMS DEMAG

1 – oxygen supply for combustion; 2 – natural gas supply;

3 – oxygen supply in refining mode; 4 – oxygen supply for combustion and refining mode

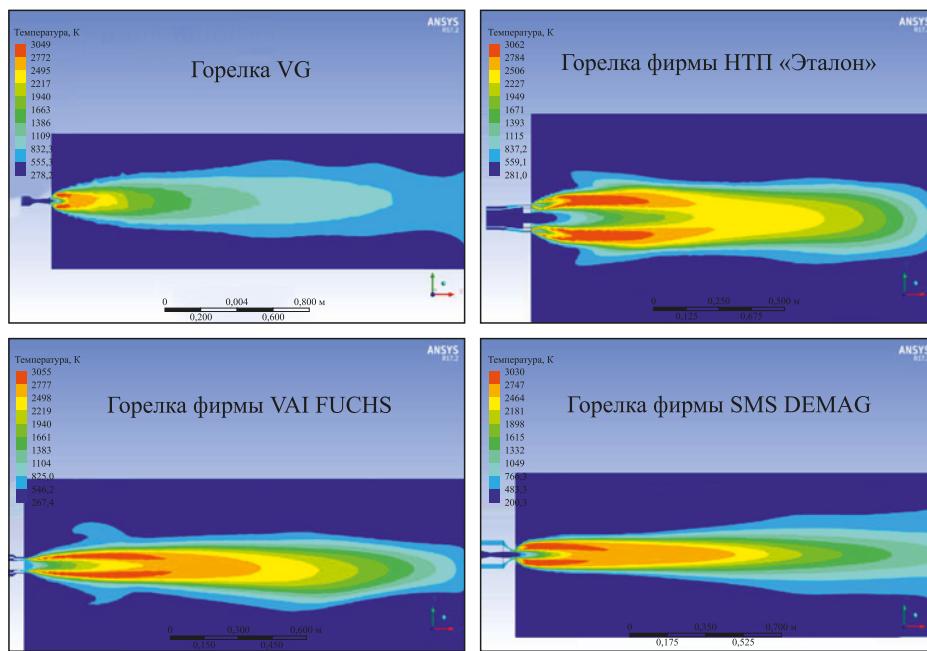


Рис. 2. Температурные поля продуктов сгорания горелок при сжигании природного газа с КВС, массовая концентрация кислорода составляет 95 %

Fig. 2. Temperature fields of combustion products of the burner when burning natural gas with oxygen-air mixture, oxygen mass concentration – 95 %

Анализ полученных результатов позволяет выделить зоны интенсивного горения по минимальному значению концентраций CH_4 и максимальным температурам:

- для горелки НТП «Эталон» длиной 500 мм;
- для горелки VG длиной 100 – 200 мм;
- для горелки SMS DEMAG длиной 500 мм;
- для горелки VAI FUCHS длиной более 1000 мм.

Так же можно определить области возможного догоорания по наличию CO и H_2 . При этом

наименьшие значения максимальных концентраций CO и H_2 в локальных объемах отмечаются для горелки VG 32 и 35 об. %, для диффузионных горелок различной конструкции диапазон составляет 36 – 42 и 41 – 56 об. % соответственно. Такое существенное различие в концентрациях (на 4 – 12 об. % для CO и на 6 – 14 об. % для H_2) свидетельствует о более полном и равномерном сгорании природного газа в кинетическом режиме по сравнению с традиционными диффузионными системами.

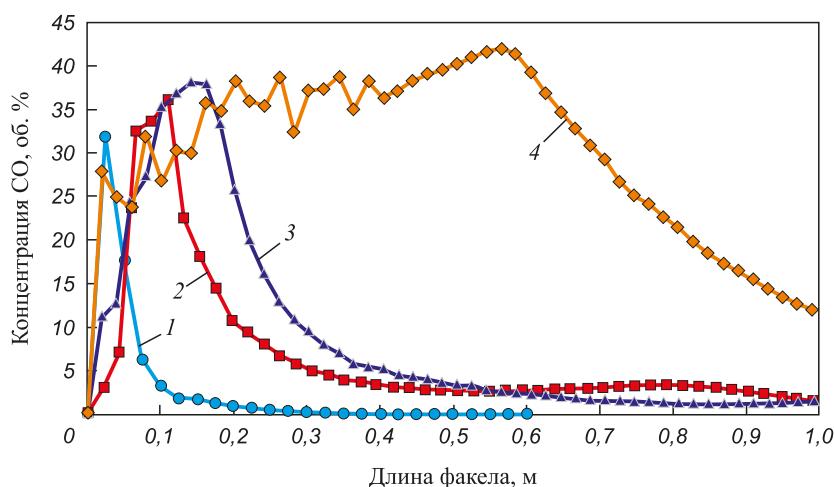


Рис. 3. Изменение максимальной концентрации оксида углерода в поперечном сечении продуктов сгорания по длине факела горелок:
1 – версии VG; 2 – фирмы SMS DEMAG; 3 – фирмы НТПФ «Эталон»; 4 – фирмы VAI FUCHS

Fig. 3. Change in the maximum concentration of CO in cross-section of combustion products along the torch length of the burners:
1 – VG; 2 – SMS DEMAG; 3 – NTPF Etalon; 4 – VAI FUCHS

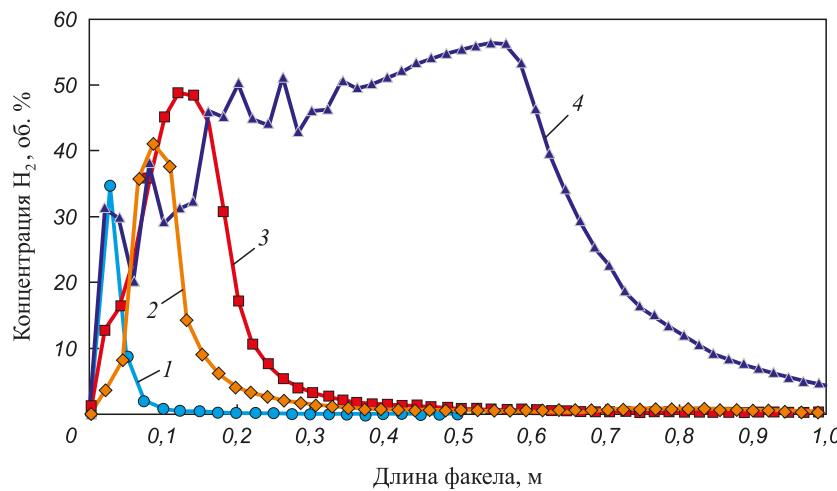


Рис. 4. Изменение максимальной концентрации водорода в поперечном сечении продуктов сгорания по длине факела горелок:
1 – версии VG; 2 – фирмы SMS DEMAG; 3 – фирмы НТПФ «Эталон»; 4 – фирмы VAI FUCHS

Fig. 4. Change in the maximum concentration of hydrogen in cross-section of combustion products along torch length of the burners:
1 – VG; 2 – SMS DEMAG; 3 – NTPF Etalon; 4 – VAI FUCHS

Критерием отсутствия риска проскока пламени принято считать отсутствие зон с температурой выше 800 °C во внутреннем объеме пространства горелки. Для исследуемых горелок зон с повышенной температурой в их объеме не выявлено. Максимальная температура продуктов сгорания в факеле горелок колеблется от 2757 до 2792 °C, в то же время скорость в локальных объемах газодинамического потока изменяется в широком диапазоне от 250 до 750 м/с (см. таблицу). Следует отметить, что температура продуктов сгорания горелки VG, равная 2776 °C, соответствует газодинамическому потоку, скорость которого в 1,15 – 3,75 раза выше, чем у горелок, создающих диффузионный режим горения [18; 19].

Оптимальная эффективность работы горелки VG в условиях дуговой сталеплавильной печи также может достигаться с соблюдением расстояния по высоте от зеркала расплава (уровня ванны), угла наклона в вертикальной плоскости и тангенциального движения продуктов сгорания в горизонтальной плоскости [15; 20].

Такая конфигурация потенциально позволяет максимально эффективно использовать тепловую энергию продуктов сгорания для быстрого и равномерного нагрева шихтовых материалов, что в конечном итоге способствует интенсификации сталеплавильного процесса, снижению энергопотребления и повышению общей производительности.

Выводы

Проведенные исследования демонстрируют преимущества горелки VG с кинетическим режимом горения по сравнению с диффузионными аналогами. Горелка VG обеспечивает полное и быстрое сжигание углеводородов исходной смеси и исключает режим «проскока» пламени во внутренний объем горелки.

Полученные результаты подтверждают перспективность внедрения горелок кинетического типа в современные сталеплавильные производства.

Показатели работы горелок

Performance indicators of the burners

Параметр	Горелка версии VG	Горелка фирмы НТП «Эталон»	Горелка фирмы SMS DEMAG	Горелка фирмы VAI FUCHS
Максимальная локальная скорость продуктов сгорания, м/с	750	200	650	250
Длина интенсивного горения, мм	100	500	300	Более 1000
Максимальная локальная температура, К (°C)	3049 (2776)	3062 (2789)	3030 (2757)	3065 (2792)
Максимальная локальная концентрация водорода (H ₂) в продуктах сгорания, об. %	35	49	41	56
Максимальная локальная концентрация оксида углерода (CO) в продуктах сгорания, об. %	32	38	36	42

Список литературы / References

- Белковский А.Г., Кац Я.Л., Краснянский М.В. Современное состояние и тенденции развития технологии производства стали в ДСП и их конструкции. *Черная металлургия. Бюллетень научно-технической и экономической информации*. 2013;(3):72–78.
- Belkovskii A.G., Kats Ya.L., Krasnyanskii M.V. Current state and development trends of steel production technology in EAF and their designs. *Ferrous Metallurgy. Bulletin of Scientific, Technical and Economic Information*. 2013;(3): 72–78. (In Russ.).
- Рябов А.Б., Чуманов И.В., Шишимиров М.В. Современные способы выплавки стали в дуговых печах: Учебное пособие. Москва: Технотехник; 2007:192.
- Voronov G.V., Glukhov I.V. Thermal and physical properties of methane family hydrocarbon and oxygen combustion products in state-of-the-art arc steel furnace. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*. 2020;969(1):012043. <https://doi.org/10.1088/1757-899X/969/1/012043>
- Зельдович Я.Б. Теория горения и детонации газов. Москва; Ленинград: Издательство АН СССР; 1944:71.
- Щетинков Е.С. Физика горения газов. Москва: Наука; 1965:739.
- Зельдович Я.Б., Баренблат Г.И., Либрович В.Б., Мохвиладзе Г.М. Математическая теория горения и взрыва. Москва: Наука; 1980:479.
- Abel M., Hein M. The SIMETAL ultimate at Colakoglu, Turkey. *Iron and Steel Technology*. 2009;6(2):56–64.
- Rathaba P.L., Craig I.K., Pistorius P.C. Influence of oxyfuel burner subsystem on the EAF process. *IFAC Proceedings Volumes*. 2004;37(15):215–220. [https://doi.org/10.1016/S1474-6670\(17\)31026-1](https://doi.org/10.1016/S1474-6670(17)31026-1)
- Abel M., Knapp H., Moxon P., Cooke R. Oxygen-injection technology using Fuchs RCB burner in an EAF. *Millennium Steel*. 2004;(28):28–30.
- Gottardi R., Miani S., Partyka A. Decarburization efficiency in EAF with hot metal charge. *Iron & Steel Technology*. 2012;(1):61–69.
- Voronov G.V., Glukhov I.V. Natural gas burning with process oxygen in up-to-date arc steel furnace operating space. In: *Proceedings of the 7th Int. Conf. on Industrial Engineering (ICIE 2021)*. 2022;358–365. https://doi.org/10.1007/978-3-030-85233-7_43
- Gottardi R., Engin B., Miani S. Single EAF and single billet caster for 320 t/h productivity. *SEAISI Quarterly Journal*. 2009;2:13–22.
- Kopfle J. EAF metallics. In: *5th Steel Scrap Conf., November 9–10, Chicago, 2011*. 2011:271–282.
- Kirschen M., Risonarta V., Pfeifer H. Energy efficiency and the influence of gas burners to the energy related carbon dioxide emissions of electric arc furnaces in steel industry. *Energy*. 2009;34(9):1065–1072. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2009.04.015>
- Sung Y., Lee S., Han K., Koo J., Lee S., Jang D., Oh C., Jang B. Improvement of energy efficiency and productivity in an electric arc furnace through the modification of side-wall injector systems. *Processes*. 2020;8(10):1202. <https://doi.org/10.3390/pr8101202>
- Kovačič M., Stopar K., Vertnik R., Šarler B. Comprehensive electric arc furnace electric energy consumption modeling: A pilot study. *Energies*. 2019;12(11):2142. <https://doi.org/10.3390/en12112142>
- Brhel J., Farmer C., Shver V. The JetBOxTM burner injector system for EAF steelmaking. *Millennium Steel*. 2006;87–97.
- Voronov G.V., Glukhov I.V. Physicochemical properties of natural gas and oxygen combustion products at diffusion and kinetic burning. In: *Proceedings of the 7th Int. Conf. on Industrial Engineering (ICIE 2021)*. 2022;318–324. https://doi.org/10.1007/978-3-030-85233-7_38
- Voronov G.V., Antropov M.V., Glukhov I.V. Gas dynamics in the working space of a modern electric-arc steelmaking furnace. *Refractories and Industrial Ceramics*. 2015;55(6): 498–500. <https://doi.org/10.1007/s11148-015-9752-1>
- Винтовкин А.А., Ладыгичев М.Г., Гусовский В.Л., Капинова Т.В. Горелочные устройства промышленных печей и топок (конструкции и технические характеристики): Справочник. Москва: Технотехник; 2008:553.

Сведения об авторах

Илья Васильевич Глухов, к.т.н., доцент кафедры теплофизики и информатики в металлургии, Уральский Федеральный университет имени первого Президента России Б. Н. Ельцина; главный специалист технологического бюро, ОАО «Научно-исследовательский институт металлургической теплотехники»

ORCID: 0000-0001-6506-1865

E-mail: ermia12@yandex.ru

Герман Викторович Воронов, д.т.н., профессор кафедры теплофизики и информатики в металлургии, Уральский Федеральный университет имени первого Президента России Б. Н. Ельцина

Олег Юрьевич Шешуков, д.т.н., профессор, директор Института новых материалов и технологий, Уральский федеральный университет имени первого Президента России Б.Н. Ельцина; главный научный сотрудник лаборатории порошковых, композиционных и нано-материалов, Институт металлургии имени академика Н.А. Ватолина Уральского отделения РАН

ORCID: 0000-0002-2452-826X

E-mail: o.j.sheshukov@urfu.ru

Information about the Authors

Il'ya V. Glukhov, Cand. Sci. (Eng.), Assist. Prof. of the Chair "Thermal Physics and Informatics in Metallurgy", Ural Federal University named after the first President of Russia B.N. Yeltsin; *Chief Specialist of the Technology Bureau*, OJSC "Scientific Research Institute of Metallurgical Heat Engineering"

ORCID: 0000-0001-6506-1865

E-mail: ermia12@yandex.ru

German V. Voronov, Dr. Sci. (Eng.), Prof. of the Chair "Thermal Physics and Informatics in Metallurgy", Ural Federal University named after the first President of Russia B.N. Yeltsin

Oleg Yu. Sheshukov, Dr. Sci. (Eng.), Prof., Director of the Institute of New Materials and Technologies, Ural Federal University named after the first President of Russia B.N. Yeltsin; *Chief Researcher of the Laboratory of Powder, Composite and Nano-Materials*, Vatolin Institute of Metallurgy of the Ural Branch of the Russian Academy of Sciences

ORCID: 0000-0002-2452-826X

E-mail: o.j.sheshukov@urfu.ru

Михаил Владимирович Калганов, к.т.н., доцент кафедры теплотехники и информатики в металлургии, Уральский Федеральный университет имени первого Президента России Б. Н. Ельцина; руководитель ВТК «Тягодутьевые устройства специального назначения», ОАО «Научно-исследовательский институт металлургической теплотехники»

ORCID: 0009-0005-7176-2285

E-mail: m.v.kalganov@urfu.ru

Mikhail V. Kalganov, Cand. Sci. (Eng.), Assist. Prof. of the Chair "Thermophysics and Informatics in Metallurgy", Ural Federal University named after the first President of Russia B.N. Yeltsin; Head of the TLC "Special Purpose Draft Devices", OJSC "Scientific Research Institute of Metallurgical Heat Engineering"

ORCID: 0009-0005-7176-2285

E-mail: m.v.kalganov@urfu.ru

Вклад авторов

Contribution of the Authors

И. В. Глухов – постановка задачи исследований, выполнение компьютерного моделирования, написание статьи.

Г. В. Воронов – постановка задачи исследований.

О. Ю. Шешуков – постановка задачи исследований, редактирование статьи.

М. В. Калганов – обсуждение результатов, редактирование статьи.

I. V. Glukhov – setting the research task, performing computer modeling, writing the text.

G. V. Voronov – setting the research task.

O. Yu. Sheshukov – setting the research task, editing the text.

M. V. Kalganov – discussion of the results, editing the text.

Поступила в редакцию 21.04.2025

После доработки 25.07.2025

Принята к публикации 28.08.2025

Received 21.04.2025

Revised 25.07.2025

Accepted 28.08.2025