Информационные технологии и автоматизация в черной металлургии / Information technologies and automatic control in ferrous metallurgy

УДК 669.04
DOI 10.17073/0368-0797-2026-3-305-307

Краткое сообщение
Short report

Распределение температуры в прилегающем к своду пространстве методической печи при работе плоскопламенной горелки

Е. В. Лалетина, **И. А. Левицкий**, **К. С. Шатохин**

Национальный исследовательский технологический университет «МИСИС» (Россия, 119049, Москва, Ленинский пр., 4)

laletina1992@mail.ru

Аннотация. Качество выпускаемого металлургической промышленностью листового проката зависит от правильного выбора и соблюдения технологических режимов. Нагрев металла перед прокаткой обычно осуществляют в методических печах. В процессе нагрева в рабочем пространстве печи происходят сложные явления, для моделирования которых необходимо использовать средства CFD. Характер горения топлива и движения продуктов сгорания, определяющие подачу теплоты к поверхности нагреваемого металла, определяются конструкциями используемых горелок. В печах с плоским сводом применяют плоскопламенные горелки. В работе с помощью Ansys Fluent моделируются процессы, происходящие во фрагменте рабочего пространства нагревательной печи, оснащенной плоскопламенными горелками.

Ключевые слова: плоскопламенная горелка, температурное поле, рециркуляционные зоны, ANSYS Fluent, RNG *k*-ε модель турбулентности, теплообмен, горение природного газа, закрученный поток

Для цитирования: Лалетина Е.В., Левицкий И.А., Шатохин К.С. Распределение температуры в прилегающем к своду пространстве методической печи при работе плоскопламенной горелки. *Известия вузов. Черная металлургия*. 2026;69(3):305–307. https://doi.org/10.17073/0368-0797-2026-3-305-307

Temperature distribution in roof-adjacent space of reheating furnace with a flat-flame burner

E. V. Laletina, **I. A. Levitskii**, **K. S. Shatokhin**

National University of Science and Technology "MISIS" (4 Leninskii Ave., Moscow 119049, Russian Federation)

laletina1992@mail.ru

Abstract. The quality of sheet metal products produced in the metallurgical industry depends on the correct selection and adherence to process conditions. Metal heating before rolling is typically performed in continuous furnaces. During the heating process, complex phenomena occur in the furnace working space, requiring the use of CFD systems to simulate these processes. The specialties of fuel combustion and the movement of combustion products, which stipulate the heat transfer to the surface of the heated metal, are determined by the design of the burners used. Flat-roof furnaces use flat-flame burners. The Ansys Fluent simulates the processes occurring in a portion of the working space of a heating furnace equipped with flat-flame burners.

Keywords: flat-flame burner, temperature field, recirculation zones, ANSYS Fluent, RNG *k*-ε turbulence model, heat transfer, natural gas combustion, swirling flow

For citation: Laletina E.V., Levitskii I.A., Shatokhin K.S. Temperature distribution in roof-adjacent space of reheating furnace with a flat-flame burner. *Izvestiya. Ferrous Metallurgy*. 2026;69(3):305–307. https://doi.org/10.17073/0368-0797-2026-3-305-307

Принцип работы плоскопламенных горелок основан на создании закрученного потока, который благодаря эффекту Коанда безотрывно растекается по поверхности свода, формируя плоский факел, обеспечивающий интенсивный конвективный нагрев кладки свода. Нагрев металла в таких печах происходит в значительной степени излучением от раскаленного свода.

© Е. В. Лалетина, И. А. Левицкий, К. С. Шатохин, 2026

В горелках типа ГР [1] осуществляются подача газообразного топлива вдоль оси горелки и тангенциальная подача окислителя (воздуха), в результате чего происходит их активное перемешивание в закрученном потоке, способствующее началу горения на поверхности горелочного камня, оказывающего каталитическое воздействие на этот процесс.

Растекающийся по поверхности свода поток частично состоит из продуктов сгорания, а частично – из перемешанных, но еще не сгоревших реагентов. В области рабочего пространства под горелками возникает эффект разрежения, приводящий к возникновению внутренних зон рециркуляции [2], в которых активные химические компоненты возвращаются к корню факела и активно перемешиваются с более горячими продуктами сгорания, где вступают в реакцию, увеличивая стабилизацию пламени в областях с относительно низкими скоростями [3; 4].

Совместное решение задач газодинамики, конвективной диффузии, горения топлива и теплообмена в пространстве, примыкающем к промышленной плоскопламенной горелке, является актуальным, поскольку правильность выбора конструктивных и режимных параметров обеспечивает возникновение разомкнутого факела, безотрывно растекающегося по поверхности свода, обеспечивающего его конвективный нагрев и последующую интенсивную передачу теплоты металлу радиационными механизмами. Сложность и взаимозависимость решаемых задач обусловили необходимость использования CFD-комплекса ANSYS Fluent.

Для исследования вопроса была построена 3D-модель фрагмента печи и плоскопламенной горелки. Для описания турбулентного течения применена k-ε модель турбулентности (RNG), для описания конвективной диффузии – модель Species Transport, взаимодействие химии и турбулентности учитывали с помощью подмодели Eddy Dissipation, параметры одноступенчатой реакции горения метана взяли из базы данных ANSYS Fluent.

Параметры моделируемой горелки соответствуют плоскопламенной горелке с тангенциальным подводом воздуха[1] со следующими геометрическими характеристиками: диаметр горелочного камня – 250 мм, диаметр входного патрубка для воздуха – 150 мм, диаметр газового сопла – 60 мм, общая длина горелочного камня – 450 мм.

На рис. 1 показан разрез температурного поля фрагмента печи с установленной горелкой для расчета с расходом природного газа – 60 нм^3/ч, воздуха – 600 нм^3/ч (коэффициент избытка воздуха α = 1,05) при температуре воздуха и газа 20 °С. Свод и под печи приняты адиабатными.

Из представленных данных видно, что при выбранных параметрах происходит требуемое формирование плоского факела – выходящий из горелки поток прижимается к своду и растекается вдоль него, что соответствует принципу работы таких горелок. Изменение температуры печной среды вдоль оси горелки, представленное на рис. 2, показывает, что ядро горения с температурой в диапазоне 1850 – 2050 К локализовано в подсводовом слое толщиной около 75 мм. Наличие

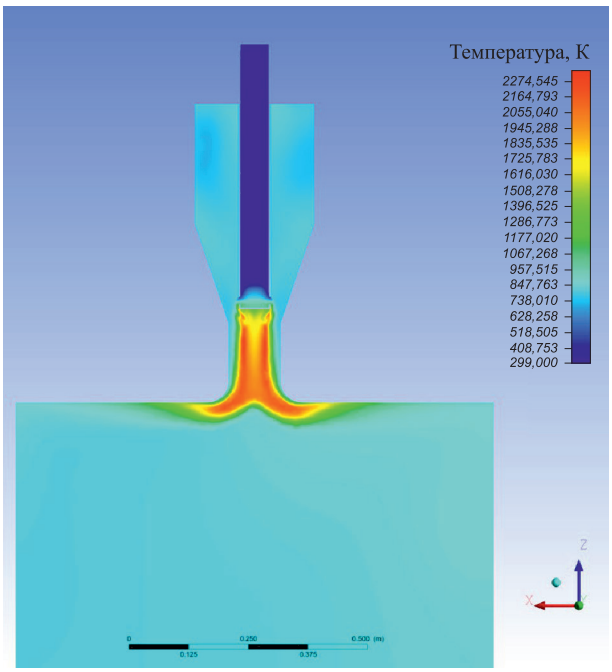

Рис. 1. Разрез температурного поля печной среды внутри фрагмента нагревательной печи с плоскопламенной горелкой

Fig. 1. Section of temperature field of the furnace environment inside the furnace heating section with a flat flame burner

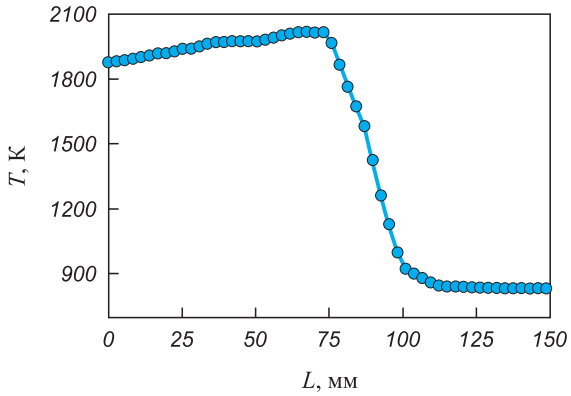

Рис. 2. Изменение температуры печной среды вдоль оси плоскопламенной горелки

Fig. 2. Change in temperature of the furnace environment along the axis of a flat flame burner

[1] Промышленная Инжиниринговая Группа. Горелки радиационные типа «ГР»-П. URL: http://kaluga.p-irgroup.ru/katalog/gorelki/metallurgicheskie-pechi-stendy-kovshi-podogreva/promyshlennye-gazovye-gorelki/radiatsionnye-gorelki/gorelki-radiatsionnye-tipa-gr-p.html (дата обращения: 20.04.2026).

максимума температуры 2050 К в точке, отстоящей от плоскости поверхности свода на расстоянии L = 75 мм, обусловлено, видимо, тем, что в поток продуктов сгорания, смешанных с непрореагировавшими компонентами (температура смеси около 1850 К), подмешивается, вследствие разрежения под горелкой, часть печной среды того же состава. Это сопровождается дожиганием непрогоревшего топлива в зоне рециркуляции. При дальнейшем удалении от свода температура печной среды плавно снижается, достигая 800 – 900 К на расстоянии 100 – 150 мм от кладки.

Оптимизация конструкций и режимных параметров горелок для промышленных печей обусловлена необходимостью повышения энергоэффективности [5], а методы CFD позволяют улучшить процессы горения.

Выводы

Разработанная модель газодинамики, конвективной диффузии, горения топлива и теплообмена во фрагменте нагревательной печи с плоскопламенной горелкой адекватно отражает процессы, происходящие в рабочем пространстве печи, и может быть использована для определения рациональных режимных параметров работы горелки и (при дополнении моделью радиационного теплообмена) соответствующих им тепловых условий на поверхности нагреваемого металла.

Список литературы / References

1. Винтовкин А.А., Ладыгичев М.Г., Гусовский В.Л., Лифшиц А.Е. Современные горелочные устройства (конструкции и технические характеристики): Справочное издание. Москва: Машиностроение-1; 2001:496.
2. Baej H. Swirl Flows. Effects of geometry and gas composition on swirling flow: PhD Thesis, Chapter 2. 2015:35–41.
3. Ermolaev A.N., Khaustova O.V., Yakovets A.P. Finite element analysis of a thermally insulated infrared radiant emitter. *MATEC Web of Conferences*. 2018;194:01016. http://doi.org/10.1051/matecconf/201819401016
4. Li N., Bykov V., Moroshkina A., Sereshchenko E., Gubernov V. Two dimensional flame structure of oscillating burner-stabilized methane-air flames. *Combustion and Flame*. 2025;276:114115. https://doi.org/10.1016/j.combustflame.2025.114115
5. Strogonov K., Popov A., Zdarov A., Kornilova L. For calculation of perforated hearth burner equipment to the bubble-type furnaces. In: *Proceedings of the Int. Symp. on Sustainable Energy and Power Engineering 2021. SUSE 2021. Lecture Notes in Mechanical Engineering*. Springer, Singapore; 2022:143–151. https://doi.org/10.1007/978-981-16-9376-2_14

Сведения об авторах / Information about the Authors

Екатерина Витальевна Лалетина, *ассистент кафедры энергоэффективных и ресурсосберегающих промышленных технологий»*, Национальный исследовательский технологический университет «МИСИС»
E-mail: laletina1992@mail.ru

Игорь Анисимович Левицкий, *к.т.н., доцент кафедры энергоэффективных и ресурсосберегающих промышленных технологий*, Национальный исследовательский технологический университет «МИСИС»
ORCID: 0000-0002-9345-3628
E-mail: lewwwis@mail.ru

Константин Станиславович Шатохин, *к.т.н., доцент кафедры энергоэффективных и ресурсосберегающих промышленных технологий*, Национальный исследовательский технологический университет «МИСИС»
E-mail: temp@misis.ru

Ekaterina V. Laletina, *Assistant of the Chair "Energy-Efficient and Resource-Saving Industrial Technologies"*, National University of Science and Technology "MISIS"
E-mail: laletina1992@mail.ru

Igor' A. Levitskii, *Cand. Sci. (Eng.), Assist. Prof. of the Chair "Energy-Efficient and Resource-Saving Industrial Technologies"*, National University of Science and Technology "MISIS"
ORCID: 0000-0002-9345-3628
E-mail: lewwwis@mail.ru

Konstantin S. Shatokhin, *Cand. Sci. (Eng.), Assist. Prof. of the Chair "Energy-Efficient and Resource-Saving Industrial Technologies"*, National University of Science and Technology "MISIS"
E-mail: temp@misis.ru

Вклад авторов / Contribution of the Authors

Е. В. Лалетина – формирование концепции, проведение расчетов в ANSYS Fluent, подготовка текста, формирование выводов, анализ результатов.
И. А. Левицкий – проведение расчетов в Ansys Fluent, анализ результатов.
К. С. Шатохин – научное руководство, анализ результатов, доработка текста, корректировка выводов.

E. V. Laletina – conceptualization, performing calculations in ANSYS Fluent, writing the text, formation of conclusions, analysis of results.

I. A. Levitskii – performing calculations in Ansys Fluent, analysis of results.
K. S. Shatokhin – scientific guidance, analysis of results, revision of the text, correction of conclusions.

Поступила в редакцию 27.03.2026
После доработки 30.03.2026
Принята к публикации 03.04.2026

Received 27.03.2026
Revised 30.03.2026
Accepted 03.04.2026