4. Совершенствование технологии подготовки и переработки стального лома / А. М. Поживанов, А. А. Зайцев, О. В. Кулагин, В. И. Матюхин. – М. : Интермет Инжиниринг, 2011. – 352 с.
5. Григорян, В. А. Теоретические основы электросталеплавильных процессов / В. А. Григорян, Л. Н. Белянчиков, А. Я. Стомахин. – 3-е изд. – М. : МИСиС, 2004. – 260 с.
6. Рощин, А. В. Влияние органических загрязнений шихты на экологические и технологические показатели работы установок предварительного подогрева лома / А. В. Рощин, В. Е. Рощин // Экология и промышленность России. – 2018. – Т. 22, № 11. – С. 10–14.
7. Тимофеев, В. Н. Анализ методов оценки качества металлического лома и их влияние на показатели плавки в ДСП / В. Н. Тимофеев, П. С. Гринберг // Известия вузов. Черная металлургия. – 2017. – Т. 60, № 5. – С. 341–347.
8. Rummler, K. Scrap Preheating and Continuous Charging System / K. Rummler, A. Tunaboyl // MPT International. – 2011. – N 5. – P. 44–49.
9. Установки подогрева шихты для электроплавки / С. Л. Ровин, Л. Е. Ровин, В. А. Жаранов [и др.] // Литье и металлургия. – 2006. – № 2. – С. 68–74.
10. Ровин, Л. Е. Интенсивные режимы нагрева шихты / Л. Е. Ровин, В. А. Жаранов, С. Л. Ровин // Литье и металлургия. – 2008. – № 3. – С. 55–60.

## ОПТИМИЗАЦИЯ СХЕМЫ РАСПОЛОЖЕНИЯ ГАЗОКИСЛОРОДНЫХ ГОРЕЛОК В ДУГОВОЙ СТАЛЕПЛАВИЛЬНОЙ ПЕЧИ НА БАЗЕ ЭКСПРЕСС-CFD-МОДЕЛИРОВАНИЯ

**И. О. Вечерко**

*Учреждение образования «Гомельский государственный технический университет имени П. О. Сухого», Республика Беларусь*

Научный руководитель В. А. Жаранов

*Выполнено параметрическое CFD-исследование восьми конфигураций стеновых газокислородных горелочных устройств (ГГУ) дуговой сталеплавильной печи емкостью 120 т в Ansys Discovery Live (GPU-ускоренный Lattice-Boltzmann-решатель). Варьировались угол наклона оси горелки α (10–45°) и положение ГГУ. Оптимальная конфигурация (α = 28°, смещение в «темные секторы») обеспечивает долю тепловой мощности, переданной шихте, $\eta_q$ = 61 %, площадь зоны переокисления $S_{\{O_2\}}$ = 0,02 м², коэффициент неравномерности температурного поля $K_T$ = 1,28. По сравнению с нерациональными схемами прогнозируется снижение угара металлошихты на 12–15 % и уменьшение удельного расхода электроэнергии на 25–30 кВт · ч/т. Применение экспресс-CFD обеспечивает ускорение итерационного цикла проектирования до 20 раз относительно классического CFD.*

**Ключевые слова:** дуговая сталеплавильная печь, газокислородная горелка, угар металла, CFD-моделирование, Ansys Discovery Live, газодинамика, переокисление ванны, темные секторы, тороидальное течение, удельный расход электроэнергии.

Электросталеплавильное производство обеспечивает свыше 28 % мирового выпуска стали; его доля устойчиво возрастает по мере роста ресурсной базы металлолома и развития возобновляемой генерации [1]. Стеновые газокислородные горелочные устройства (ГГУ) традиционно рассматриваются как один из наиболее экономически эффективных инструментов форсирования плавки: рациональное применение ГГУ снижает удельный расход электроэнергии на 20–45 кВт · ч/т и сокращает плавку на 4–8 мин [4, 5]. Вместе с тем нерациональная ориентация факела порождает противоположный эффект: кислородная струя, направленная на поверхность жидкой ванны, вызывает локальное переокисление металла и интенсивное образование FeO, увеличивая угар металлошихты на 0,5–1,5 % от общей массы плавки [5, 6].

Традиционные CFD-расчеты в программах класса Ansys Fluent требуют 4–8 ч машинного времени на GPU-кластере для одной геометрической конфигурации, что

делает перебор большого числа вариантов нереализуемым на стадии концептуального проектирования [7]. Ansys Discovery Live реализует решение уравнений Навье–Стокса в режиме реального времени на базе GPU посредством адаптивного воксельного разбиения (Lattice-Boltzmann-based GPGPU-решатель), обеспечивая параметрическую чувствительность при интерактивном изменении геометрии. Применение данного инструмента к задаче оптимизации ГГУ в дуговых сталеплавильных печах (ДСП) с явным критериальным анализом зон переокисления в литературе систематически не рассматривалось.

Цель работы – определение оптимального угла наклона $\alpha$ и азимутального положения трех стеновых ГГУ в ДСП емкостью 120 т на основании параметрического экспресс-CFD-исследования в Ansys Discovery Live, обеспечивающего минимальный угар металла, максимальный тепловой поток в зоны твердой шихты и равномерное газодинамическое перемешивание в рабочем пространстве.

**Методика исследования.** Объектом исследования является рабочее пространство ДСП типа FUCHS 120. Геометрическая модель построена в Ansys SpaceClaim на основании конструкторской документации агрегата. Основные параметры модели приведены в табл. 1.

*Таблица 1*

**Геометрические параметры модели ДСП**

| Параметр | Значение |
|---|---|
| Номинальная емкость, т | 120 |
| Внутренний диаметр кожуха корпуса, мм | 7 200 |
| Диаметр рабочей ванны (на уровне откосов), мм | 6 500 |
| Глубина жидкой ванны, мм | 1 100 |
| Рабочий объем плавильного пространства, м³ | ≈ 120 |
| Высота оси сопла ГГУ над уровнем порога, мм | 850 |
| Количество горелочных устройств, шт. | 3 (симметрично) |
| Диаметр сопла горелки, мм | 40 |
| Тепловая мощность одной горелки, МВт | 3,2 |

Рабочие среды – природный газ ($CH_4$ – 97 об. %, $C_2H_6$ – 2 об. %, $N_2$ – 1 об. %) и технический кислород (чистота ≥ 99,5 об. %). Коэффициент расхода окислителя $\lambda = 1{,}05$. Расход газа на горелку – 400 нм$^3$/ч; расход $O_2$ – 800 нм³/ч; скорость истечения из сопла – 88/176 м/с (газ/$O_2$); температура газов на вход – 20 °C. Поверхность жидкой ванны задана изотермической ($T = 1560$ °C); твердая шихта описана как пористое тело с коэффициентом порозности $\varepsilon = 0{,}40$.

Физическая модель включала: уравнения Навье–Стокса для несжимаемого течения в нестационарной постановке ($\Delta t = 0{,}1$ с); стандартную $k$–ε-модель турбулентности ($C_\mu = 0{,}09$); радиационный теплообмен (модель P1); упрощенную химическую кинетику горения (Eddy Dissipation Model, одностадийная реакция $CH_4 + 2O_2 \rightarrow CO_2 + 2H_2O$). Верификационный расчет в Ansys Fluent показал расхождение интегральных характеристик поля скоростей не более 8–12 %, что достаточно для задачи параметрического отбора конфигураций [8].

Варьировались: 1) угол наклона оси горелки (рис. 1) к горизонтальной плоскости $\alpha$: 10°, 20°, 28°, 30°, 45°; 2) азимутальное положение ГГУ – симметричное (шаг 120°) и смещенное в направлении «темных секторов» (азимутальный сдвиг $\Delta\varphi =$ 15–20°). Всего проанализировано 8 конфигураций. Среднее время расчета одной конфигурации в Discovery Live на GPU NVIDIA составило 15–25 мин против 5,5–7,0 ч в Ansys Fluent, что соответствует ускорению в 15–28 раз.

Критерии оценки: $S_{\{O_2\}}$ – площадь зоны с концентрацией свободного $O_2 > 5$ % над поверхностью ванны (минимизация); $\eta_q$ – доля тепловой мощности горелок, переданной зонам твердой шихты (максимизация); $K_T = T_{\max} / T_{\min}$ – коэффициент неравномерности температурного поля (минимизация).

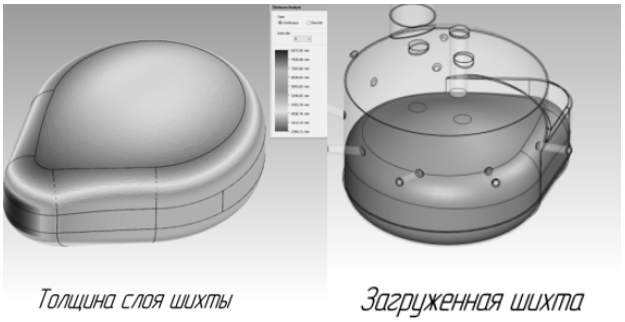



*Рис. 1*. Геометрическое представление области моделирования

**Результаты моделирования.** Конфигурации с $\alpha \le 10°$ нерациональны по критерию теплопередачи: при $\alpha = 10°$ факел распространяется практически горизонтально, не проникая в слой шихты. Продукты горения, поднимаясь к своду, формируют устойчивый застойный карман в нижней части «темного сектора» ($T \approx$ 800–950 °С) при перегреве свода до $T =$ 1620–1680 °С – на 130–180 °С выше нормативного значения. Результат: $\eta_q = 38$ %, $K_T = 1{,}67$. При $\alpha = 45°$ кислородная струя проникает в ванну ($M \approx 0{,}50$ у поверхности расплава), формируя обширную зону переокисления $S_{\{O_2\}} = 0{,}80$ м$^2$. При удельной скорости угара 0,40 кг/(м² · мин) [5] потери железа составляют $\approx 19$ кг/мин; за горелочный период 17,5 мин – 336 кг/плавку. $K_T =$ 1,72 – наихудшее значение по всей выборке.

Оптимальная конфигурация $\alpha =$ 28° с азимутальным смещением ГГУ в «темные секторы» демонстрирует качественно иную газодинамическую картину. Факел проникает в слой шихты на глубину 350–420 мм без прямого контакта с ванной: расстояние от нижней границы зоны $C_{\{O_2\}} > 5$ % до поверхности расплава составляет не менее 400 мм. Ключевым газодинамическим эффектом является формирование устойчивого тороидального вихревого течения продуктов горения: горячие газы поднимаются вдоль оси агрегата к своду, охлаждаются, отклоняются к стенкам и опускаются, обеспечивая интенсивный конвективный теплообмен по всему объему. Данный механизм согласуется с описанным в [7] для тангенциального расположения горелок и с результатами [4, 9] о снижении теплопотерь через свод на 12–18 % при формировании замкнутых вихревых структур. Сводные результаты 8 конфигураций приведены в табл. 2.




*Рис. 2*. Комплекс результатов ализа

Смещение азимутальной позиции ГГУ от симметричной схемы в «темные секторы» при фиксированном $\alpha = 28°$ улучшает $\eta_q$ на 4 п. п. и снижает $K_T$ с 1,35 до 1,28, подтверждая независимую значимость азимутального положения как параметра оптимизации. Угол $\alpha = 28°$ представляет компромисс между двумя противоположными требованиями и согласуется с границами, установленными в [6] ($\alpha_{min} \approx 15°$) и [7] ($\alpha_{max} \approx 35°$ для геометрии близкого типоразмера).

*Таблица 2*

**Сравнительные результаты параметрического CFD-исследования (8 конфигураций)**

| α, ° | Расположение | $S_{\{O_2\}}$, м² | $\eta_q$, % | $K_T$ | Примечание |
|---|---|---|---|---|---|
| 10 | Симметричное | 0,00 | 38 | 1,67 | Перегрев свода |
| 20 | Симметричное | 0,15 | 52 | 1,41 | – |
| 20 | «Темные секторы» | 0,08 | 55 | 1,38 | – |
| 28 | «Темные секторы» | 0,02 | 61 | 1,28 | Оптимум |
| 30 | Симметричное | 0,18 | 57 | 1,35 | – |
| 30 | «Темные секторы» | 0,12 | 59 | 1,30 | – |
| 45 | Симметричное | 0,80 | 43 | 1,72 | Критический угар |
| 10 | «Темныесекторы» | 0,00 | 41 | 1,59 | – |

**Обсуждение и оценка эффекта.** Снижение $S_{\{O_2\}}$ с 0,80 до 0,02 м² при переходе от $\alpha = 45°$ к оптимальной конфигурации соответствует уменьшению потерь металла с 336 до 8 кг/плавку (на 328 кг/плавку). В пересчете на 120-тонную плавку удельный угар снижается на 0,27 кг/т; при 10 000 плавок/год и цене стали 2000 руб./т экономический эффект от снижения угара составляет $\approx 5{,}4$ млн руб./год. Одновременное снижение удельного расхода электроэнергии на 25–30 кВт · ч/т добавляет 5–6 млн руб./год. Приведенные оценки основаны на CFD-расчетах, а не на экспериментальных данных, и должны рассматриваться как прогностические для промышленной верификации.

Основное ограничение подхода – упрощенная одностадийная кинетика горения (EDM): модель не воспроизводит детальный состав продуктов горения (CO, $H_2$, несгоревший $CH_4$). По данным [11], разница в максимальных значениях концентрации CO между EDM и ECFM-кинетикой достигает 25–30 %, однако интегральные характеристики поля скоростей и температур совпадают с точностью 8–12 %, достаточной для параметрического отбора конфигураций. Второе ограничени – статичность модели шихты: учет динамики плавления потребует связанного расчета CFD + зада-

ча Стефана, что выходит за рамки данной работы. Возможность анализа 8 конфигураций в течение одного рабочего дня вписывается в парадигму иерархического «цифрового двойника» агрегата: экспресс-CFD → полный CFD → промышленная апробация [8].

Таким образом, сформулируем следующие выводы:

1. Параметрическим CFD-исследованием установлено, что конфигурации с $\alpha \leq 10°$ нерациональны по критерию теплопередачи ($\eta_q = 38\ \%$; $K_T = 1{,}67$: перегрев свода на 130–180 °C, застойная зона в «темных секторах»), а $\alpha \geq 45°$ недопустимы по критерию угара металла ($S_{\{O_2\}} = 0{,}80$ м$^2$; потери Fe $\approx 19$ кг/мин; $K_T = 1{,}72$).

2. Оптимальной конфигурацией является α = 28° с азимутальным смещением ГГУ в «темные секторы»: $\eta_q = 61\ \%$; $S_{\{O_2\}} = 0{,}02$ м$^2$; $K_T = 1{,}28$; устойчивое тороидальное вихревое течение обеспечивает равномерный нагрев шихты по всему объему рабочего пространства.

3. Применение оптимальной схемы прогнозирует снижение угара металлошихты на 12–15 % и уменьшение удельного расхода электроэнергии на 25–30 кВт · ч/т; совокупный расчетный экономический эффект при производительности 10 000 плавок/год – не менее ~12 млн руб./год.

4. Ansys Discovery Live обеспечивает ускорение итерационного цикла проектирования в 14–28 раз по сравнению с классическим CFD (Ansys Fluent) при расхождении интегральных характеристик поля скоростей ≤ 12 %, что достаточно для концептуальной стадии отбора конфигураций ГГУ.

5. Полученная оптимальная конфигурация подлежит верификации в Ansys Fluent с детальным механизмом горения и последующей промышленной апробацией на пилотном агрегате.

Литература

1. Рациональные способы интенсификации плавки в современных дуговых сталеплавильных печах / Ю. А. Гудим, И. Ю. Зинуров, А. Д. Киселев [и др.] // Электрометаллургия. – 2005. – № 9. – С. 2–6.
2. Гудим, Ю. А. Производство стали в дуговых печах. Конструкции, технология, материалы / Ю. А. Гудим, И. Ю. Зинуров, А. Д. Киселев. – Новосибирск : Изд-во НГТУ, 2010. – 547 с.
3. К вопросу о рациональной загрузке шихтовых материалов и расположении топливосжигающих устройств в ДСП-120 / Г. В. Воронов, В. А. Гольцев, И. В. Глухов, И. В. Плесакин // Черная металлургия. Бюллетень НТИ. – 2017. – № 4. – С. 45–49.
4. Воронов, Г. В. Особенности аэродинамики и температурного поля в рабочем пространстве современной ДСП / Г. В. Воронов, В. А. Гольцев, И. В. Глухов // Известия вузов. – 2015. – № 58. – С. 645–651.
5. Сисев, А. А. Влияние режима продувки кислородом на угар металла в ДСП / А. А. Сисев, С. К. Носов // Электрометаллургия. – 2018. – № 4. – С. 12–17.
6. Кузьмин, А. Л. Физическое моделирование движения газов в рабочем пространстве ДСП при работе стеновых горелок / А. Л. Кузьмин, Н. А. Фомин, В. И. Столяров // Металлургия. – 2019. – № 8. – С. 34–40.
7. Zhu, H. CFD Simulation of Flow and Combustion in EAF with Oxy-fuel Burners / H. Zhu, X. Jiang, L. Qian // ISIJ International. – 2021. – Vol. 61, N 5. – P. 1432–1441.
8. Bölükbaşı, A. Optimization of Burner Positions in EAF Using Neural Network-Surrogate Models / A. Bölükbaşı, G. Özbayoğlu // Steel Research International. – 2022. – Vol. 93, N 3. – Art. 2100497.
9. Воронов, Г. В. Аэродинамика и тепловое состояние современной ДСП / Г. В. Воронов, В. А. Гольцев, И. В. Глухов // Проблемы черной металлургии и материаловедения. – 2016. – № 1. – С. 28–34.

10. Глухов, И. В. Компьютерное моделирование аэродинамики в рабочем пространстве ДСП / И. В. Глухов, Г. В. Воронов // Энерго- и ресурсосбережение : материалы Всерос. науч.-практ. конф., Екатеринбург, 2015 г. / Урал. федер. ун-т им. первого Президента России Б. Н. Ельцина. – Екатеринбург, 2015. – С. 88–91.
11. Глухов, И. . Сжигание природного газа с техническим кислородом в рабочем пространстве ДСП / И. В. Глухов, Г. В. Воронов // Теплотехника и информатика : сб. докл. IX Всерос. науч.-практ. конф., Екатеринбург, 13–14 мая 2021 г. / Урал. федер. ун-т им. первого Президента России Б. Н. Ельцина. – Екатеринбург, 2021. – С. 28–34.
12. Voronov, G. V. Physicochemical Properties of Natural Gas and Oxygen Combustion Products at Diffusion and Kinetic Burning / G. V. Voronov, I. V. Glukhov // Lecture Notes in Mechanical Engineering. Cham. – 2022. – P. 318–324.
13. Плесакин, И. В. Рекомендации по загрузке шихты и расположению ТСУ в ДСП-120 / И. В. Плесакин, Г. В. Воронов, И. В. Глухов // Теплотехника и информатика : сб. докл. VI Всерос. науч.-практ. конф., Екатеринбург, 2017 г. / Урал. федер. ун-т им. первого Президента России Б. Н. Ельцина. – Екатеринбург, 2017. – С. 98–102.

## ПОЛУЧЕНИЕ ЛЮМИНЕСЦЕНТНЫХ ПОРОШКОВ ОКСИДА ЛЮТЕЦИЯ, АКТИВИРОВАННОГО ИОНАМИ ЭРБИЯ, И ИЗУЧЕНИЕ ИХ СВОЙСТВ

**О. С. Невзорова**

*Учреждение образования «Гомельский государственный технический университет имени П. О. Сухого», Республика Беларусь*

Научный руководитель А. А. Бойко

*Наноструктурированные порошки оксида лютеция, легированного ионами эрбия, получены методом термохимического синтеза (горения) и являются перспективными для формирования лазерной керамики и сцинтилляторов. Источниками для синтеза были взяты азотнокислые соли лютеция и эрбия, полученные путем растворения оксидов лютеция и эрбия в азотной кислоте. В качестве комплексообразователя и горючего-восстановителя использована уксусная кислота, а диспергирующим агентом, применяемым для разделения агломератов, – поливиниловый спирт. Исследования морфологических и структурных характеристик с использованием методов сканирующей электронной микроскопии, рентгенофазового анализа и энергодисперсионной рентгеновской спектроскопии показали, что образцы порошков $Lu_2O_3 : Er^{3+}$, прокаленные при 850 °С, имеют квазисферическую форму частиц с размерами 48–86 нм. Полученные порошки проявляют интенсивную люминесценцию в видимой и ИК-областях спектра с центрами на 560 и 1530 нм при возбуждении на длине волны 378 нм.*

**Ключевые слова:** лантаноиды, наноструктурированные порошки, оксид лютеция, легирование, ионы эрбия, термохимический синтез.

Оптически прозрачная керамика на основе оксидов лантаноидов, легированная ионами редкоземельных элементов (РЗЭ), является перспективным материалом для использования в качестве активной среды твердотельных лазеров, люминесцентных преобразователей, сцинтилляторов [1]. Оксид лютеция $Lu_2O_3$ имеет кубическую кристаллическую структуру большую ширину запрещенной зоны (около 6,5 эВ), что обеспечивает высокий уровень излучения активных легирующих ионов. Для получения эффективной генерации лазерного излучения требуется хорошее оптическое качество керамики и тонкая микроструктура, которую может обеспечить применение наноструктурированных порошков [2]. Перспективным направлением синтеза люминесцентных порошков оксида лютеция, активированного ионами эрбия, является применение термохимических реакций (метод «золь – гель – горение») [3].