

УДК 621.745.44; 669.1
DOI: 10.18799/24131830/2024/12/4549
Шифр специальности ВАК: 2.4.6

Математическое моделирование перфорированного пода сталеплавильного агрегата непрерывного действия

К.В. Строгонов, А.В. Бурмакина, Д.Д. Львов[✉], А.К. Бастынец, В.А. Мурашов

Национальный исследовательский университет «МЭИ», Россия, г. Москва

[✉]LvovDD@mpei.ru

Аннотация. Актуальность. Объёмы производства стали в России и в мире за последние 20 лет выросли вдвое, стоимость стали в России в период с октября 2018 г. по март 2020 г. выросла с 45 тыс. р. до 105 тыс. р. Это обуславливает актуальность разработки энергоэффективных технологий производства стали, которые позволят снизить себестоимость продукции. Наиболее распространенная технология производства стали полного металлургического цикла предусматривает восстановление железа в доменных печах и характеризуется существенными выбросами загрязняющих веществ в окружающую среду. Так, при производстве кокса (технологически необходимое сырьё доменной плавки) газообразных выбросов выделяется около 1250 м³ на тонну стали, что составляет порядка 50 % от всех газовых выбросов в чёрной металлургии. Одним из наиболее перспективных направлений экологически чистого и энергоэффективного производства стали является внедоменное. На данный момент существует около сотни различных процессов восстановления железа, до промышленного применения доведены некоторые из них. **Цель:** разработать систему подачи топлива в перфорированный под, исключая тепловые потери в сталеплавильном агрегате за счет организации перфорированного пода, позволяющего возратить теплоту в рабочее пространство печи за счет подогрева восстановителя. **Методы:** численное моделирование методами Volume of Fluid (VOF) и Euler-Euler (EE). **Результаты.** Определена скорость подачи восстановительного газа, обеспечивающая его конверсию на углерод и водород на входе в рабочую зону печи. Было установлено, что температура поверхности перфорированного пода со стороны газа 380 °С, со стороны расплава не превышает 1313 °С, что существенно ниже температуры плавления огнеупорного материала.

Ключевые слова: энергоэффективность, восстановление железа, производство стали, барботаж, водород, природный газ

Благодарности: Работа выполнена в рамках проекта «Разработка и исследование конструктивных решений для использования водорода и повышения эффективности процесса восстановления железа при производстве стали» при поддержке гранта НИУ «МЭИ» на реализацию программы научных исследований «Приоритет 2030: Технологии будущего» в 2022–2024 гг.

Для цитирования: Математическое моделирование перфорированного пода сталеплавильного агрегата непрерывного действия / К.В. Строгонов, А.В. Бурмакина, Д.Д. Львов, А.К. Бастынец, В.А. Мурашов // Известия Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов. – 2024. – Т. 335. – № 12. – С. 59–71. DOI: 10.18799/24131830/2024/12/4549

UDC 621.745.44; 669.1
DOI: 10.18799/24131830/2024/12/4549

Mathematical modeling of a perforated continuous steel-smelting unit

K.V. Strogonov, A.V. Burmakina, D.D. Lvov[✉], A.K. Bastynets, V.A. Murashov

National Research University "MPEI", Moscow, Russian Federation

[✉]LvovDD@mpei.ru

Abstract. Relevance. The volume of steel production in Russia and in the world has doubled over the past 20 years, the cost of steel in Russia in the period from October 2018 to March 2020 increased from 45 to 105 thousand rubles. This determines the urgency of developing energy-efficient steel production technologies that will reduce the cost of production. The most common technology for the producing steel of the full metallurgical cycle involves iron reduction in blast furnaces and characterized by significant emissions of pollutants into the environment. One of the most promising areas of environmentally friendly and energy-efficient steel production is non-straw production. At the moment, there are about a hundred different iron recovery processes, some of them have been brought to industrial use. **Aim.** To develop a fuel supply system in a perforated hearth, eliminating heat losses in the steelmaking unit by organizing a perforated hearth, which allows heat to be returned to the working space of the furnace by heating the reducing agent. **Methods.** Numerical modeling by Volume of Fluid (VOF) and Euler-Euler (EE) methods. **Results.** The authors have determined the rate of supply of reducing gas, which ensures its conversion to carbon and hydrogen at the entrance to the working area of the furnace. It was found that the surface temperature of the perforated hearth on the gas side is 380°C, on the melt side does not exceed 1313°C, which is significantly lower than the melting point of the refractory material.

Keywords: energy efficiency, iron recovery, steel production, bubbling, hydrogen, natural gas

Acknowledgements: The work was carried out within the framework of the project "Development and research of constructive solutions for the use of hydrogen and improving the efficiency of the iron reduction process in steel production" with the support of a grant from the National Research University "MPEI" for the implementation of the research program "Priority 2030: Technologies of the Future" in 2022–2024.

For citation: Strogonov K.V., Burmakina A.V., Lvov D.D., Bastynets A.K., Murashov V.A. Mathematical modeling of a perforated continuous steel-smelting unit. *Bulletin of the Tomsk Polytechnic University. Geo Assets Engineering*, 2024, vol. 335, no. 12, pp. 59–71. DOI: 10.18799/24131830/2024/12/4549

Введение

Непрерывный рост индустриализации и населения нашей планеты сопровождается постоянным ежегодным увеличением спроса на изделия из стали, по прогнозам World Steel Association, в среднем на 1 % в мире. Производство стали, достигшее 1,9 млрд т в 2021 г., сопровождается ежегодным сокращением запаса коксующихся углей и ростом цен на них, и высокими выбросами вредных веществ в атмосферу около 1,5 т на тонну стали, в том числе и углекислого газа, высокая концентрация которого является одним из основных факторов повышения средней температуры поверхности Земли [1–3]. Доля металлургического сектора в структуре всех выбросов CO₂ составляет около 7 % (1,8 т CO₂/стали), что обеспечивает данному направлению 2 место в мировой структуре выбросов CO₂, при этом энергоёмкость такой продукции значительна и составляет 1482,3 кг у.т./т (43,443 ГДж/т) [4]. Всё это обуславливает разработку экологически чистого, энергоэффективного и ресурсосберегающего производства стали.

Наиболее энергоёмким является процесс восстановления железа. Так, энергоёмкость чугуна составляет 20,041 ГДж/т [4], т. е. примерно 46 % от всех энергетических затрат. В настоящее время существует две технологии производства стали: доменная и внедоменная. Доля доменной технологии в структуре мирового производства стали составляет 95 %, а внедоменной – 5 % [5].

С целью снижения энергетических затрат и воздействия на окружающую среду в мире постоянно разрабатываются процессы внедоменного восстановления железа [6, 7], и на данный момент существует

около сотни различных процессов, однако промышленно реализованных не много, наиболее известные: Midrex, HyL, Corex, Finex, POMELT, HIs melt, PERED [8]. Внедоменные процессы можно классифицировать на две группы: твердофазные и жидкофазные.

Согласно работе [9] мировое производство внедоменного чугуна в 2021 г. составило 119,2 млн т, что на 13,7 % больше, чем в 2020 г., и на 10,2 % больше по сравнению с предыдущим рекордом в 108,1 млн т в 2019 г. С 2016 г. во всем мире объем производства железа прямого восстановления твердофазным процессом вырос почти на 46,4 млн т., или почти на 64 %. Представленный выше анализ подтверждает перспективность развития данного направления.

Основная доля внедоменного чугуна, равная 91,75 %, производится с применением твердофазного процесса, при использовании технологии жидкофазного процесса – 8,25 % от мирового производства внедоменного чугуна. Наиболее популярной технологией прямого восстановления железа при твердофазном процессе является MIDREX, доля которой составляет 55,12 %, на втором месте располагается технология, базирующаяся на использовании вращающихся (ротационных) печей, – 22,49 %, третьей по популярности является технология NYL-3 – 11,48 %, а на четвертой PERED – 2,2 %, соответствующая диаграмма представлена на рис. 1. Среди технологий внедоменного восстановления железа при жидкофазном процессе промышленно реализованными являются COREX, доля которой в структуре внедоменных технологий восстановления железа составляет 4,70 %, и FINEX – 3,55 % [9–11].

Технология MIDREX впервые была промышленно реализована в 1969 г. и на данный момент является ведущей в области внедоменного производства чугуна. Согласно [9], в 2021 г. общее количество установок суммарной производительностью 99350000 т чугуна/год составляло 99 штук.

Для получения железа прямого восстановления также применяется целый ряд угольных технологий – SL/RN, Jindal, DRC, SILL, Tisco, Codir и др. В основном все они действуют на базе ротационных печей с использованием угля или пылеугольной смеси. Всего насчитывается 46 установок общей производительностью 26800000 т чугуна/год.

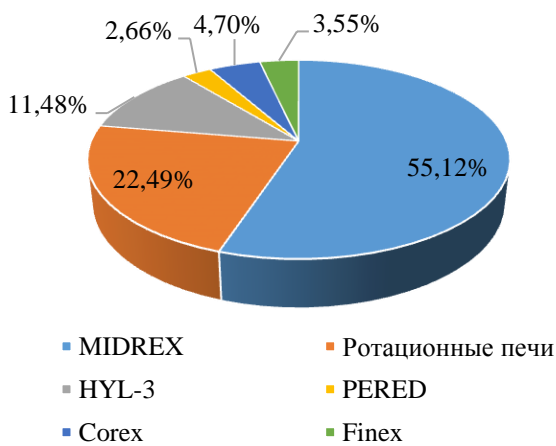


Рис. 1. Структура внедоменных технологий восстановления железа

Fig. 1. Structure of non-domain iron recovery technologies

Самой первой реализованной технологией внедоменного производства железа, освоенной в 1959 г., является HYL/ENERGION. Общее количество установок мощностью 25400000 т чугуна/год составляет 27 штук.

Установки PERED располагаются преимущественно на территории Ирана, и по состоянию за 2021 г. общее их количество составляет 5 штук, а производительность 3500000 т чугуна/год.

Наименее распространенными технологиями внедоменного производства железа при твердофазном процессе являются FINMET, CIRCORED и FIOR. Общее количество данных установок составляет 6 штук, а производительность 3100000 т чугуна/год.

В настоящее время технологии внедоменного производства железа при жидкофазном процессе активно развиваются и уже имеются действующие установки, такие как COREX и FINEX, общая производительность которых составляет 9834000 т чугуна/год.

Также одной из перспективных технологий, которая освоена в научно-исследовательском центре и готовится к реализации на промышленном уровне, является Hismelt. Пилотная установка производительностью 700000 т чугуна/год, работающая по технологии Hismelt, была построена и действовала с 2003 г. по апрель 2010 г. в Квинане (западная Австралия), однако из-за экономически невыгодной ситуации в данном регионе, связанной с низкими ценами и спросом на чугун, было принято решение о закрытии данного предприятия.

Помимо этого, известна отечественная технология РОМЕЛТ, освоенная с 1985 г. по 1998 г. на ПАО «НЛМК». На данный момент совместными силами НИТУ МИСиС и АО «ВО «Тяжпромэкспорт» установка производительностью 200000 т чугуна/год промышленно реализуется в Республике Союз Мьянма.

Таким образом, можно с уверенностью утверждать, что направление внедоменного производства чугуна будет активно развиваться и станет ведущей технологией при должном финансировании и различных стимулирующих факторах, таких как: повышение цен на коксующиеся угли и субсидирование предприятий, производящих «зеленый» чугун.

Классификация восстановительных процессов по типу протекания и топливу-восстановителю предложена в [12] (табл. 1). Из табл. 1 можно увидеть, что технологий жидкофазного процесса на природном газе на данный момент не предложено.

Таблица 1. Классификация рудовосстановительных процессов

Table 1. Classification of ore recovery processes

Топливо и восстановитель Fuel and reducing agent	Последовательность операций Sequence of operations	
	Восстановление-плавление Recovery-melting	Плавление-восстановление Melting-recovery
Уголь Coal	Доменная печь Blast furnace	COREX FINEX РОМЕЛТ/ROMELT Hismelt
Природный газ Natural gas	MIDREX HYL-3 Ротационные печи Rotary kilns PERED	Не известна Unknown
Тип процесса Process type	Твердофазный процесс Solid phase process	Жидкофазный процесс Liquid phase process

В работе [12] рассмотрена возможность использования природного газа в качестве восстановителя при жидкофазном процессе. Автор утверждает, что при попадании метана в расплав с температурой

более 1350 °С произойдет его конверсия на две основных составляющих для процесса восстановления, а именно на H₂ и C, т. е. образуется углеродводородная смесь (далее УВС). По отдельности данные компоненты при высоких температурах имеют высокую эффективность использования восстановления, что можно видеть на рис. 2, в связи с чем возможность использования метана в качестве восстановителя привлекает внимание исследователей. Основные химические реакции, протекающие при попадании метана в расплав железных руд, представлены в табл. 2.

Автором работы [11] было установлено, что при использовании метана теоретический минимум затраты энергии на восстановление и компенсацию дефицита теплоты в зоне восстановления составляет для сажеводородной смеси 0,335, а для чистого углерода 0,5509 кг у.т./кг железа. В связи с чем по технологическим, энергетическим и ресурсным критериям природный газ может быть выбран в качестве топливно-восстановительной смеси для перспективного технологического комплекса черной металлургии.

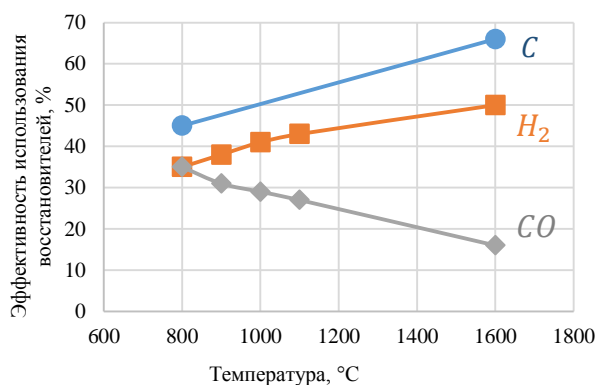


Рис. 2. Изменение эффективности восстановителей с ростом температуры

Fig. 2. Change in the effectiveness of reducing agents with increasing temperature

В работе [13] представлена экспериментальная тепловая схема извлечения железа из смеси руд при жидкофазном процессе. Авторами установлено, что максимально допустимый диаметр канала 4 мм в связи с необходимостью не допустить попадания расплава в канал и его засорения в процессе восстановления.

Таким образом, вопрос разработки научно-технических решений, позволяющих реализовать агрегат для непрерывного сталеплавильного процесса, является актуальным в настоящее время. В данной работе было проведено исследование влияния изменения скорости метана на входе в перфорированный под на теплообменные характеристики

пода и температуры газа при попадании в расплав. Важно отметить, что в процессе подачи углеродводородного восстановителя в расплав железорудного материала наблюдался процесс барботирования, который во многом определяет интенсивность теплообмена и протекания химических реакций.

Таблица 2. Основные химические реакции восстановления железа углеродводородной смесью

Table 2. Basic chemical reactions of iron reduction by carbon-hydrogen mixture

Компонент Component	Метан/Methane (CH ₄)	
	Водород Hydrogen (H ₂)	Углерод Carbon (C)
Fe _{общ} Fe _{general}	-	-
FeO	FeO + H ₂ = Fe + H ₂ O	2FeO + C = 2Fe + CO ₂ FeO + C = CO + Fe
Fe ₂ O ₃	3Fe ₂ O ₃ + H ₂ = 2Fe ₃ O ₄ + H ₂ O	2Fe ₂ O ₃ + 3C = 3CO ₂ + 4Fe Fe ₂ O ₃ + 3C = 3CO + 2Fe
SiO ₂	SiO ₂ + 2H ₂ → 2H ₂ O + Si	SiO ₂ + 2C = 2CO + Si
Al ₂ O ₃	Al ₂ O ₃ + 3H ₂ = 3H ₂ O + 2Al	2Al ₂ O ₃ + 3C = 3CO ₂ + 4Al Al ₂ O ₃ + 3C = 3CO + 2Al 2Al ₂ O ₃ + 9C = 6CO + Al ₄ C ₃
CaO	CaO + H ₂ = H ₂ O + Ca	CaO + 3C = CO + CaC ₂ 2CaO + 5C = CO ₂ + 2CaC ₂
MgO	MgO + H ₂ = H ₂ O + Mg	2MgO + C = CO ₂ + 2Mg MgO + C = CO + Mg
MnO	MnO + H ₂ = H ₂ O + Mn	2MnO + C = CO ₂ + 2Mn MnO + C = CO + Mn
TiO ₂	TiO ₂ + H ₂ = 2H ₂ O + Ti	TiO ₂ + C = CO + Ti
K ₂ O	K ₂ O + H ₂ = H ₂ O + 2K	2K ₂ O + C = K ₄ + CO ₂
Na ₂ O	Na ₂ O + H ₂ = Na ₂ O + 2K	2Na ₂ O + C = CO ₂ + 4Na
ZnO	ZnO + H ₂ = H ₂ O + Zn	ZnO + C = CO + Zn
S	S + H ₂ = H ₂ S	S + C = CS ₂
P ₂ O ₅	8P ₂ O ₅ + 15H ₂ = 10H ₃ PO ₄ + 6P	P ₂ O ₅ + 5C = 5CO + 2P

Объекты и методика исследования

Обзору перспективных технологий производства стали посвящены ряд источников [12, 14–16], общий подход сводится к тому, что процесс восстановления и производства стали должен быть непрерывным, включающим жидкофазное восстановление железа, производство и доводку стали в непрерывном потоке.

Барботажный режим и процессы, протекающие при восстановлении железа, подробно описаны в [17].

Жидкофазные процессы характеризуются высокими температурами, что обеспечивает высокие скорости протекания теплотехнических процессов и химических реакций, а при организации барботажа существенно увеличивается коэффициент теплоотдачи с 100–200 до 3000–4000 Вт/(м²·К), согласно работе [18], и поверхности соприкосновения сред, всё это обеспечивает максимальные скорости протекания процессов, а как следствие, производительность плавильных печей.

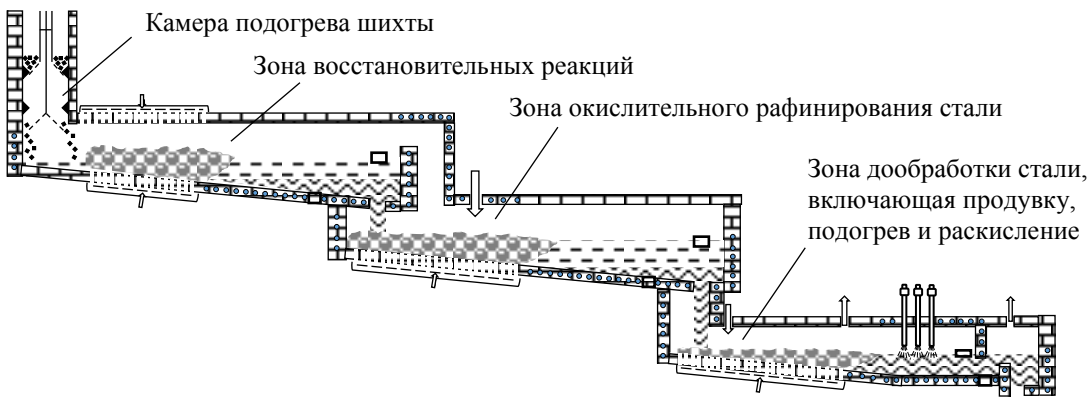


Рис. 3. Перспективная модель системы по производству стального листа
Fig. 3. Promising model of a steel sheet production system

Примером существенного повышения производительности может служить переход с мартеновского способа производства стали на конвертерный. Стандартное время плавки скрап-рудного процесса в мартеновских печах шихты составляет 5–6 часов. В конвертерном процессе общая продолжительность плавки в 100–350 тонных конвертерах составляет от 40 до 50 минут [19], где фактически реализован барботажный режим, в том числе известны кислородно-конвертерные процессы с донной продувкой расплава.

В этой связи перспективной технологией производства стали может являться непрерывный процесс, предложенный в работах [20–22], схема которого представлена на рис. 3.

По каскаду последовательно расположенных и наклонённых желобов течёт железосодержащий расплав, подвергаемый последовательной обработке. В зонах обработки металла поддерживается барботирующий слой расплава, организуется и поддерживается гарнисаж ограждений. Поступающий через перфорированный под холодный газ нагревается, тем самым возвращая энергию обратно в процесс, снижая потери в окружающую среду через ограждение. Кроме этого, непрерывно ведётся комплексная доводка стали с применением продувки инертным газом, подачей раскислителей, шлакообразующих и легирующих элементов, электроподогревом и вакуумированием.

Одной из основных идей данного подхода является нагрев природного газа до температур, при которых начинается его разложение на углерод и водород (до 500 °С). Таким образом, метан, попадая в расплав, температура которого поддерживается равной 1400 °С, преобразуется в углерод-водородную смесь, восстановительные свойства которой существенно выше, чем у оксида углерода (рис. 2).

В данной работе рассматривались процессы барботирования металлического расплава метаном

и теплообмена в футеровке. При исследовании теплообмена в огнеупорном слое задача решалась с помощью численного моделирования в программном пакете ANSYS Fluent в стационарной постановке при использовании метода Euler-Euler с моделью турбулентности k-ε RNG. Обоснование выбора данной модели заключается в том, что она менее чувствительна к размеру глобального элемента расчетной сетки, не исследуется влияние пограничного слоя на структуру потока, более устойчива к граничным условиям [23, 24]. Помимо этого, данная модель позволяет описать обе фазы двухфазного потока уравнениями сплошной среды (1)–(3). Метод Euler-Euler характеризуется следующими дифференциальными уравнениями, которые описывают состояние каждой фазы [25].

$$\frac{\partial}{\partial t} (a_q \cdot \rho_q) + \nabla \cdot (a_q \cdot \rho_q \cdot \vec{v}_q) = 0, \quad (1)$$

где a_q – объемная доля среды в ячейке; ρ_q – плотность среды q ; \vec{v}_q – вектор скорости среды q .

$$\begin{aligned} \frac{\partial}{\partial t} (a_q \cdot \rho_q \cdot \vec{v}_q) + \nabla \cdot (a_q \cdot \rho_q \cdot \vec{v}_q^2) = \\ -a_q \cdot \nabla p + \nabla \cdot \bar{\tau}_q + a_q \cdot \rho_q \cdot \vec{g} + \\ + \sum_{p=1}^n \vec{R}_{pq} + (\vec{F}_q + \vec{F}_{lift,q} + \vec{F}_{wl,q} + \vec{F}_{vm,q} + \vec{F}_{td,q}), \quad (2) \end{aligned}$$

где \vec{g} – вектор ускорения свободного падения; \vec{R}_{pq} – вектор силы поверхностного натяжения между фазами; \vec{F}_q – вектор силы внешнего воздействия; $\vec{F}_{lift,q}$ – вектор подъемной силы; $\vec{F}_{wl,q}$ – вектор силы трения стенки; $\vec{F}_{vm,q}$ – вектор силы виртуальной массы; $\vec{F}_{td,q}$ – вектор силы турбулентного рассеивания.

$$\begin{aligned} \frac{\partial}{\partial t} (a_q \cdot \rho_q \cdot h_q) + \nabla \cdot (a_q \cdot \rho_q \cdot h_q \cdot \vec{v}_q) = \\ = a_q \cdot \frac{\partial \rho_q}{\partial t} + \frac{\bar{\tau}_q}{\nabla u_q} - \nabla \cdot \bar{q}_q + \sum_{p=1}^n Q_{pq}, \quad (3) \end{aligned}$$

где h_q – энтальпия среды q , Дж/кг; \bar{q}_q – вектор плотности теплового потока, Вт/м²; $\bar{\tau}_q: \nabla \bar{u}_q$ – скалярное отношение тензоров, Вт/м²; Q_{pq} – теплоотдача между фазами p и q , Вт/(м²·К).

Процесс барботаж можно описать следующим образом: восстановительный газ, поступающий в продуваемый железорудный расплав, формируется под действием сил поверхностного натяжения в газовые пузыри, по форме близкие к сфере.

Сформировавшиеся пузыри, движущиеся в жидкости, качественно меняют её характеристики. Система становится двухфазной, содержащей как газовую, так и жидкую фазу. В системе устанавливается площадь взаимного контакта фаз, равная поверхности пузыря. Увеличивается объём системы – он становится равным сумме объемов фаз.

На пузырь действуют силы Архимеда, выталкивающие его из жидкости против сил тяжести, и силы поверхностного натяжения, удерживающих пузырь у отверстия. Момент отрыва пузыря характеризуется равновесием этих сил [26].

Сила Архимеда, действующая на пузырь, равна (4):

$$F_A = \frac{\pi \cdot D^3}{6} \cdot g \cdot (\rho_{ж} - \rho_{г}), \quad (4)$$

где D – отрывной диаметр пузыря, м; $\rho_{г}$ – плотность газа, кг/м³; $\rho_{ж}$ – плотность жидкости, кг/м³.

Сила поверхностного натяжения, действующая на пузырь, равна (5):

$$F_{пов} = G \cdot d_0, \quad (5)$$

где G – коэффициент поверхностного натяжения; d_0 – диаметр отверстия, м.

Из равенства этих сил можно определить отрывной диаметр пузыря (6):

$$D = \sqrt[3]{\frac{6 \cdot d_0 \cdot G}{\pi \cdot g \cdot (\rho_{ж} - \rho_{г})}}. \quad (6)$$

Численное моделирование процесса барботирования металлического расплава метаном проводилось в программном пакете ANSYS Fluent в нестационарной постановке при использовании метода осреднения системы уравнений Навье–Стокса по Рейнольдсу с моделью турбулентности k - ϵ RNG. Помимо этого, при моделировании использовалась неявная схема конечно-разностной интерполяции для устойчивости модели. Метод для исследования течения нескольких фаз Volume of fluid (VOF) основан на том факте, что две или более фазы не являются взаимопроницающими и для каждой среды, участвующей в процессе моделирования, вводится переменная, называемая объемной долей фазы. Таким образом, в каждой ячейке расчетной сетки сумма объемных долей сред равна 1, и в зависимости от преобладания той или иной фазы свойства глобального элемента усредняются по объему. Метод VOF

описывается дифференциальными уравнениями сохранения энергии, импульса и массы (7)–(9) [25]:

$$\frac{1}{\rho_q} \left[\frac{\partial}{\partial t} (a_q \cdot \rho_q) + \nabla \cdot (a_q \cdot \rho_q \cdot v_q) \right] = 0, \quad (7)$$

где U_f^{n+1} – объемный расход через ячейку, м³/с; V – объем ячейки, м³.

$$\begin{aligned} & \frac{\partial}{\partial t} (\rho \cdot v) + \nabla \cdot (\rho \cdot v \cdot v) = \\ & = -\nabla \cdot p + \nabla \cdot [\mu \cdot (\nabla v + \nabla v^T)] + \rho \cdot g + F, \end{aligned} \quad (8)$$

$$\begin{aligned} & \frac{\partial}{\partial t} (\rho \cdot E) + \nabla \cdot (v \cdot (\rho \cdot E + p)) = \\ & = \nabla \cdot (k_{eff} \cdot \nabla T) + S_h, \end{aligned} \quad (9)$$

где E – усредненная по массе энергия, Дж; k_{eff} – коэффициент теплопроводности, Вт/(м·К); S_h – энергия излучения, Дж.

В табл. 3 представлены настройки, задаваемые в основных модулях программного пакета ANSYS Fluent.

Таблица 3. Основные химические реакции восстановления железа углеродводородной смесью

Table 3. Basic chemical processes for iron reduction with a hydrocarbon mixture

Параметр/Parameter	Величина/Meaning						
Температура расплава Melt temperature, °C	1400						
Скорость расплава на входе, м/с Melt rate at the inlet, m/s	0,005						
Плотность расплава, кг/м ³ Melt density, kg/m ³	7000						
Теплоемкость расплава, Дж/(кг·К) Melt heat capacity, J/(kg·K)	842						
Теплопроводность расплава, Вт/(м·К) Melt thermal conductivity, W/(m·K)	25						
Вязкость расплава, кг/(м·с) Melt viscosity, kg/(m·s)	0,003						
Температура метана Methane temperature, °C	20						
Скорость метана на входе, м/с Methane rate at the inlet, m/s	1	5	10	30	50	80	110
Плотность периклазохромита, кг/м ³ Periclazochromite density, kg/m ³	2995						
Теплоемкость периклазохромита, Дж/(кг·К) Periclazochromite heat capacity, J/(kg·K)	1000						
Теплопроводность периклазохромита, Вт/(м·К) Periclazochromite thermal conductivity, W/(m·K)	2,5						
Коэффициент поверхностного натяжения расплава на границе с воздухом, Н/м Surface tension coefficient, N/m	1						

Объектом исследования является рабочее пространство агрегата с перфорированным подом, выполненного из периклазохромита, для непрерывно-

го сталеплавильного производства, эскиз которого представлен на рис. 4.

Численное 2D-моделирование подачи метана в рабочее пространство печи проводилось в программном комплексе ANSYS. Для определения размера ячейки сетки было проведено исследование влияния размера ячейки на температуру метана на выходе и средней температуры футеровки. Для наглядности графика размер ячейки на графике представлен в виде $1/\delta$, где δ – размер ячейки. Было установлено, что наименьшая погрешность вычислительного процесса от размеров элементов сетки в первом случае наблюдается при размере ячейки потока метана, равной 1 мм, дальнейшее уменьшение её размера сопровождалось изменением результата в пределах погрешности, равной 5 %, а временные ресурсы увеличивались в 1,5–2 раза. Во втором случае сеточная сходимость наблюдалась при размере ячейки футеровки, равной 10 мм, дальнейшее уменьшение размера ячейки футеровки приводило к изменению результата в пределах погрешности, равной 10 %, а временные затраты увеличивались в 1,5–2 раза (рис. 5).

Построение сетки проводилось в сеточном генераторе ANSYS Meshing. Моделирование выполнялось в модуле ANSYS Fluent. Расчетная сетка исследуемой модели треугольная, неструктурированная. Зона основного потока формировалась из тетраэдров. Характеристики полученной сетки приве-

дены в табл. 4, а её пример – на рис. 6. Граничные условия представлены на рис. 7.

Таблица 4. Основные характеристики расчетной сетки
Table 4. Main characteristics of the calculated grid

Параметр/Parameter	Величина/Value	
Количество элементов сетки, шт. Number of grid elements, sum	45000	
Глобальный размер сетки, мм Global grid size, mm	Для расплава For the melt	30
	Для метана в канале For methane in the channel	1
	Для периклазохромита For periklazochromitis	10

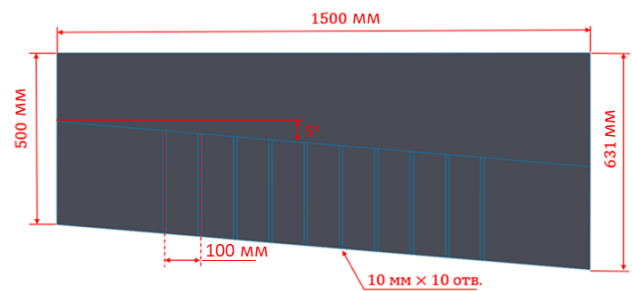


Рис. 4. Эскиз рабочего пространства агрегата непрерывного сталеплавильного

Fig. 4. Sketch of the workspace of the continuous steelmaking unit

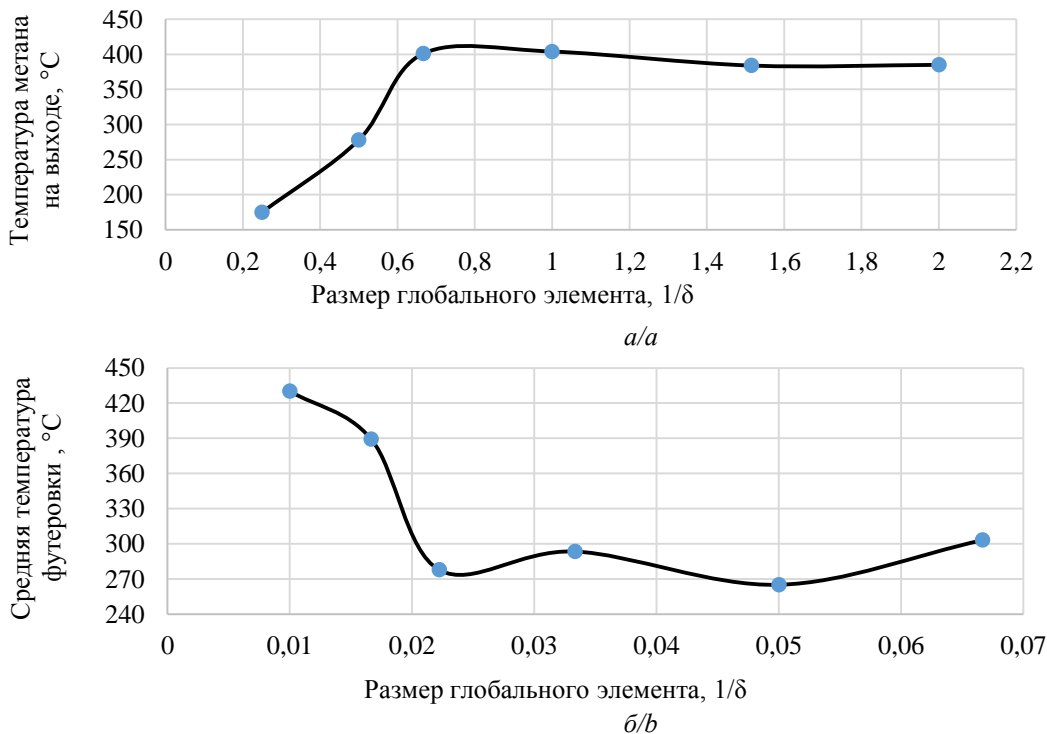


Рис. 5. Зависимость погрешности расчетов от размеров элементов сетки: а) для сетки метана; б) для сетки футеровки

Fig. 5. Dependence of the calculation error on the size of the grid elements for: a) methane grid; b) lining grid

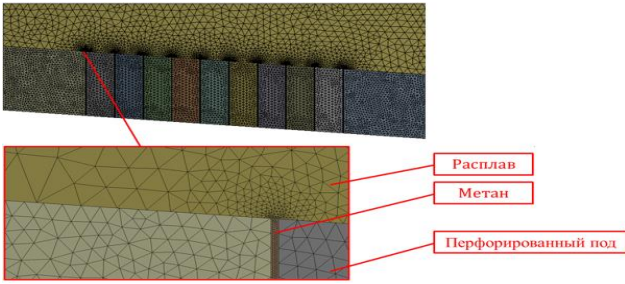


Рис. 6. Сетка рабочего пространства агрегата непрерывного сталеплавания

Fig. 6. Grid of the working space of the continuous steelmaking unit

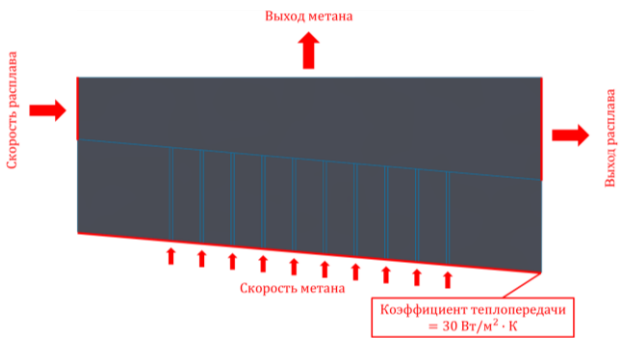


Рис. 7. Граничные условия для рабочего пространства агрегата непрерывного сталеплавания

Fig. 7. Boundary conditions for the working space of a continuous steelmaking unit

Каждое граничное условие описывается математическим уравнением:

1) на входе метана в перфорированный под:

$$V_y = V_{CH_4}, \frac{\partial p}{\partial n} = 0, \beta_{расп} = 0, \beta_{CH_4} = 1;$$

- 2) на входе расплава: $V_x = V_{расп}, \frac{\partial p}{\partial n} = 0, \beta_{расп} = 1, \beta_{CH_4} = 0;$
- 3) на выходе метана и расплава из системы: $\frac{\partial V_x}{\partial n} = 0, \frac{\partial V_y}{\partial n} = 0, \frac{\partial T}{\partial n} = 0, \frac{\partial \beta_{расп}}{\partial n} = 0, \frac{\partial \beta_{CH_4}}{\partial n} = 0, p = p_{out};$
- 4) на внешних стенках перфорированного пода: $\lambda \frac{\partial T}{\partial n} = \alpha \cdot (T_{ст} - T_{air}).$

Результаты исследования и их обсуждение

Результат численного моделирования процесса барботирования металлического расплава углерод-водородной смесью представлен на рис. 8. Можно заметить, что размер пузырьков превышает 100 мм, согласно работе [26], восстановление железа локализуется на межфазной поверхности газ-расплав, в связи с чем можно сделать вывод, что размер газового пузыря прямо пропорционально влияет на интенсивность восстановления железа, а это значит, что при скорости метана на входе в перфорированный под равной 5 м/с будет наблюдаться приемлемая степень восстановления железа. Также можно видеть, что чем выше пузырь метана поднимается от пода, тем больше он растягивается в длину и увеличивает свою площадь соприкосновения с расплавом, что положительно влияет на процесс восстановления железа. Помимо этого, можно заметить, что пузырьки движутся с периферии в центр, это связано с наличием зоны разрежения, которая образовалась вследствие заполнения объема расплава метаном и, соответственно, снижения давления в данной области.

Результаты исследования не противоречат общеизвестным данным, представленным в работе [27]. В данном исследовании автор рассматривает поведение пузырька в объеме чугуна.

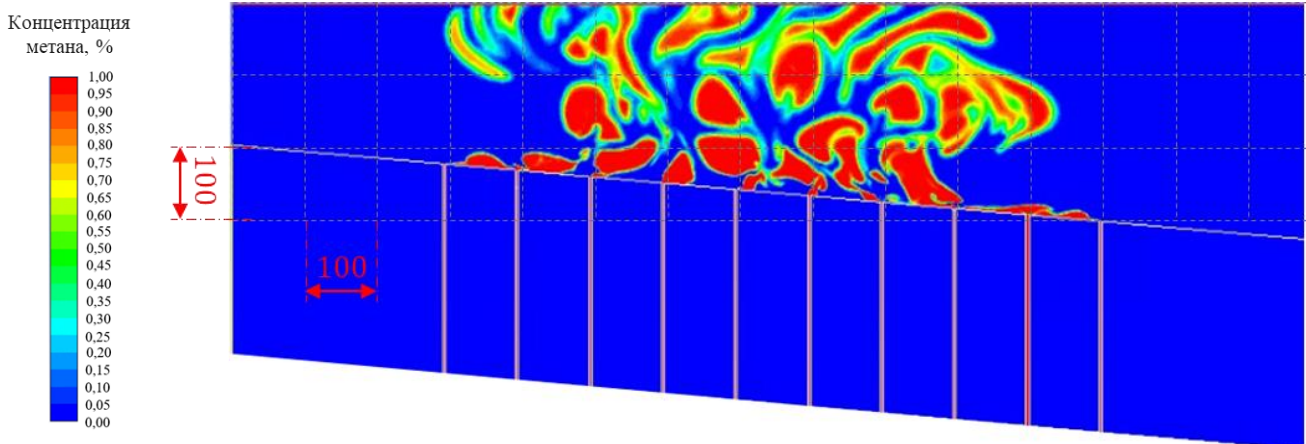


Рис. 8. 2D-модель барботаж при скорости метана на входе 5 м/с

Fig. 8. 2D model of bubbling at a methane inlet velocity equal to 5 m/s

На рис. 9 представлены результаты моделирования распределения температурного поля углеродородной смеси в расплаве и на футеровке. Задачей проведения данного исследования являлось определение скорости метана на входе в систему его подачи, обеспечивающей температуру восстановителя на выходе из канала, при которой не будет наблюдаться конверсия метана.

Таблица 5. Температура метана на выходе из каналов
Table 5. Methane temperature at the outlet of the channels

Номер канала Channel number	Температура газа на выходе из канала при заданной скорости метана на входе в канал, °C Gas temperature at a given methane velocity at the entrance to the channel, °C					
	м/с/m/s					
	1	5	10	30	50	110
1	858,16	374,40	168,69	55,40	61,89	35,62
2	832,71	355,26	138,74	48,47	35,19	25,07
3	833,68	357,50	109,55	46,40	32,83	24,25
4	826,92	349,49	100,38	48,81	32,84	27,20
5	822,86	354,86	108,87	52,67	40,89	25,62
6	820,51	347,90	98,12	59,29	37,95	27,41
7	833,26	337,60	101,34	57,35	34,75	32,51
8	862,92	471,98	108,73	52,07	41,97	34,76
9	837,91	457,18	84,62	56,07	42,65	32,62
10	1311,43	398,34	342,32	141,62	76,15	44,70
Средняя Average	884,03	380,45	136,13	61,82	43,71	30,98

В табл. 5 представлена температура газа на выходе из каналов (нумерация слева направо от 1 до 10), а на рис. 10 – зависимость средней температуры газа на

выходе из канала от скорости его подачи в перфорированный под. Горизонтальной линией указана температура в 500 °C, при которой начинается интенсивное разложение метана на углерод и водород [28]. Нагрев природного газа выше этой температуры приведёт к зарастанию каналов сажевыми частицами.

Таким образом, можно сделать вывод, что скорость метана на входе в систему подачи восстановителя не может быть менее 4 м/с (рис. 9, а) в связи с началом распада метана на углерод и водород в самом канале, что приведет к его засорению сажевыми частицами. Подача метана в рабочее пространство печи со скоростью 30 м/с и более (рис. 9, г-е) нецелесообразно в связи с тем, что при данных условиях не наблюдается регенерация теплоты.

Из анализа рис. 9 можно заметить зоны, в которых температура внутри рабочего пространства опускается ниже температуры плавления металла. Данная особенность определяется методом расчета температуры многокомпонентной среды в программном комплексе ANSYS Fluent. При использовании метода VOF не учитывается процесс поглощения теплоты плавления газом при кристаллизации металла. Температура многокомпонентной среды определяется путем осреднения температуры компонентов внутри ячейки по объему:

$$T_{см} = t_{расп} \cdot v_{расп} + t_{CH_4} \cdot v_{CH_4},$$

где $t_{расп}$ – температура расплава, К; t_{CH_4} – температура метана, К; $v_{расп}$ – концентрация расплава внутри ячейки, %; v_{CH_4} – концентрация метана внутри ячейки, %.

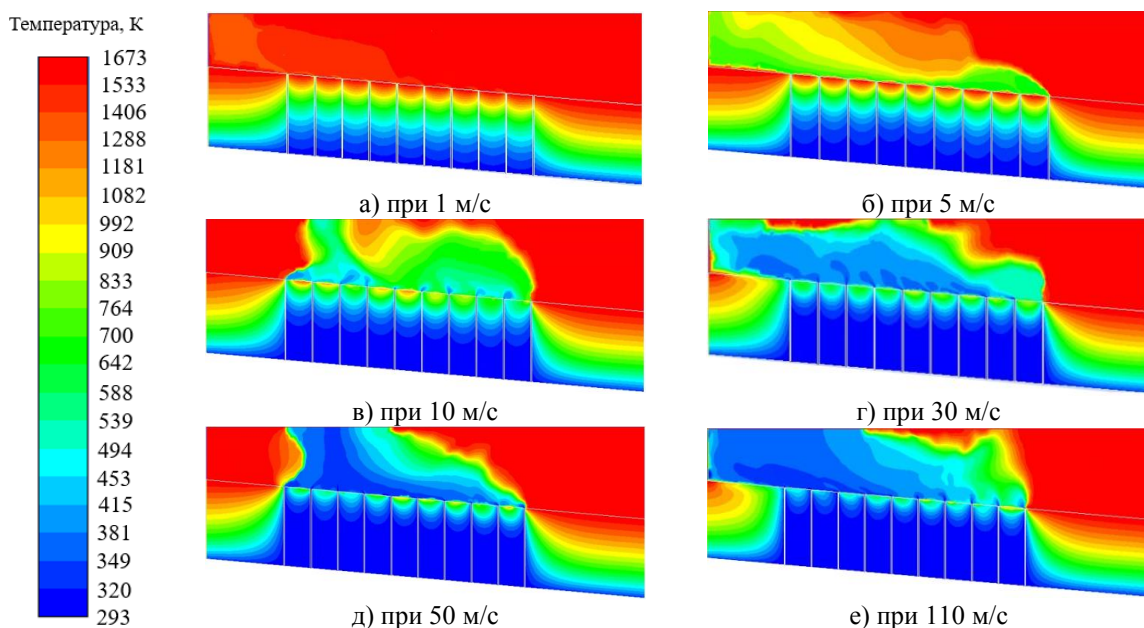


Рис. 9. Распределение температурного поля смеси в расплаве и на футеровке
Fig. 9. Distribution of the mixture temperature field in the melt and on the lining

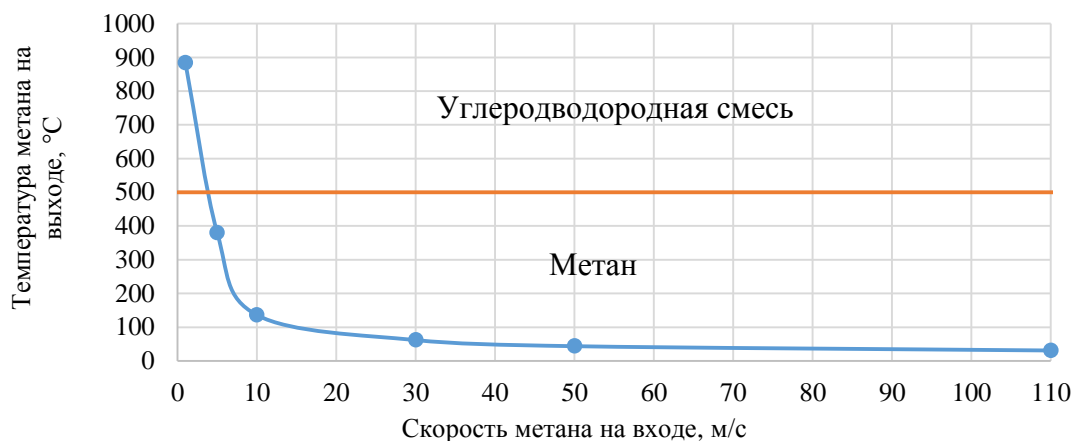


Рис. 10. Зависимость средней температуры газа на выходе из канала от скорости метана на входе в канал перфорированного пода

Fig. 10. Dependence of the average gas temperature at the outlet of the channel on the methane velocity at the entrance to the channel of the perforated hearth

Если в объеме ячейки преобладает в большей степени метан, температурное поле будет стремиться к температуре метана, если металл, то наоборот. При скорости подачи метана в перфорированный под более чем 5 м/с на выходе из каналов перфорированного пода концентрация метана составляет 100 %, поэтому в данной зоне значение температуры будет характеризовать только температуру восстановителя.

Необходимая скорость подачи метана составляет 5 м/с (рис. 9, б), в данном случае наблюдается допустимая температура метана на выходе из канала, которая не превышает 480 °C, что обеспечивает безопасную работу перфорированного пода. На расстоянии 60 мм и более температура углеводородной смеси лежит выше 1000 °C, таким образом углеводородная смесь образуется непосредственно в расплаве, обеспечивая восстановительные процессы с наибольшей эффективностью.

Исследования показали, что перфорированный под, выполненный из периклазохромита, имеет среднюю температуру 280 °C, при этом температура на поверхности со стороны расплава не превышает 1313 °C, что существенно ниже температуры размягчения огнеупорного материала, равной 1550 °C, и значительно ниже температуры плавления, равной 2800 °C. Такие условия работы огнеупорного ограждения должны обеспечить высокую стойкость перфорированного пода.

Выводы

1. Объемы производства стали в 2021 г. превысили 1,9 млрд т, ежегодный рост производства продолжается, при этом существенные энергетические затраты до 43 ГДж на тонну продукции и загрязняющее воздействие на окружающую

среду обуславливают разработку внедоменных процессов восстановления железа, доля которого хоть и не значительная, но в процентном соотношении увеличивается существенно больше, чем прирост производства стали.

2. В результате обзора литературы было установлено, что на данный момент ведущей технологией внедоменного восстановления железа является MIDREX, доля которой в структуре мирового производства внедоменного чугуна составляет 55,12 %, на втором месте расположился процесс, базирующийся на использовании ротационных печей, – 20,2 %, на третьем – HYL-3 с долей 11,48 %, на четвертом месте находится COREX – 4,70 %, на пятом – FINEX с долей 3,55 %, а наименее распространенной технологией является PERED с долей 2,66 %.
3. Установлено, что на данный момент нет технологий внедоменного восстановления железа при жидкофазном процессе, базирующейся на использовании в качестве восстановителя природного газа или водорода.
4. В статье описан новый непрерывный сталеплавильный агрегат, базирующийся на использовании природного газа в качестве источника для восстановления и компенсации энергетических затрат при жидкофазном процессе.
5. Проведено численное моделирование зоны барботажа расплава предложенного сталеплавильного агрегата, позволяющее качественно оценить процесс барботирования металлического расплава восстановительным газом и распределение температурного поля восстановительного газа в расплаве.
6. Установлено, что оптимальная скорость подачи природного газа на входе в канал должна быть

порядка 5 м/с для обеспечения возврата теплоты от футеровки обратно в расплав и температуры восстановительного газа на выходе из перфорированного пода, не превышающей 500 °С.

7. Установлено, что организация перфорированного пода исключает потери в окружающую среду через ограждение в зоне перфорации, позволяет

использовать энергию на нагрев подаваемого в расплав газа. Температура поверхности перфорированного пода со стороны газа – 380 °С, со стороны расплава не превышает 1313 °С, что существенно ниже температуры плавления огнеупорного материала.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Ходосов И.Е. Разработка и исследование процессов получения металлизированных материалов при использовании сырьевой базы Кузбасса: автореф. дис. ... канд. техн. наук. – Новокузнецк, 2016. – 22 с.
2. Comparative evaluation of energy efficiency and GHG emissions for alternate iron-and steelmaking process technologies / Y. Gordon, S. Kumar, M. Freislich, Yu. Yaroshenko // Творческое наследие В.Е. Грум-Гржимайло: история, современное состояние, будущее. – Екатеринбург: УрФУ, 2014. – Ч. 1. – С. 50–59.
3. The rise in global atmospheric CO₂, surface temperature, and sea level from emissions traced to major carbon producers / V. Ekwurzel, J. Boneham, M. Dalton, R. Heede, R. Mera, M. Allen, P. Frumhoff // Climatic Change. – 2017. – Vol. 144. – № 4. – P. 579–590. DOI: 10.1007/s10584-017-1978-0.
4. Данилов Н.И., Щелоков Я.М. Основы энергосбережения / под ред. Н.И. Данилова. – Екатеринбург: ГОУ ВПО УГТУ-УПИ, 2006. – 564 с.
5. Strogonov K., Tolkanov S., Korkots K. Thermostating cover as improving energy efficiency and technological steel mills // E3S Web of Conference International Science Conference SPbWOSCE-2018 “Business Technologies for Sustainable Urban Development”. – 2019. – № 110, 01003. DOI: 10.1051/e3sconf/201911001003.
6. Aerogel product applications for high-temperature thermal insulation / A. Fedyukhin, K. Strogonov, O. Soloveva, S. Solovov, I. Akhmetova, U. Berardi, M. Zaitsev, D. Grigorev // Energies. – 2022. – Vol. 15. – № 20. DOI: 10.3390/en15207792.
7. Мишин Ю.П. О конкурентоспособности Российской металлургии // Чистая сталь: от руды до проката. – М.: МОО “Ассоциация сталеплавильщиков”, 2020. – С. 6–9.
8. Сравнение энергозатрат в современных технологиях производства стали / О.Ю. Войнов, В.Г. Лисиенко, Ю.Н. Чесноков, А.В. Лаптева // Энерго и ресурсосбережение. Энергообеспечение. Нетрадиционные и возобновляемые источники энергии. – Екатеринбург: УрФУ, 2017. – С. 127–131.
9. MIDREX. World direction statistics, 2020. URL: https://www.midrex.com/wp-content/uploads/Midrex-STATSbookprint-2020.Final_.pdf (дата обращения: 18.01.2023).
10. COREX. Efficient and environmentally friendly smelting reduction, 2020. URL: https://www.primetals.com/fileadmin/user_upload/content/01_portfolio/1_ironmaking/corex/COREX.pdf (дата обращения: 18.01.2023).
11. The FINEX process economical and environmentally safe ironmaking, 2020. URL: https://www.primetals.com/fileadmin/user_upload/content/01_portfolio/1_ironmaking/finex/THE_FINEX_R_PROCESS.pdf (дата обращения: 18.01.2023).
12. Картавцев С.В. Интенсивное энергосбережение и технический прогресс черной металлургии: монография. – Магнитогорск: ГОУ ВПО «МГТУ», 2008. – 311 с.
13. Нешпоренко Е.Г., Картавцев С.В. Вопросы энергоресурсосбережения при извлечении железа из руд: монография. – Магнитогорск: ГОУ ВПО «МГТУ», 2007. – 153 с.
14. Иванцов Г.П., Васильев А.В., Смирнов В.И. Непрерывный сталеплавильный процесс / под ред. И.Д. Ветринской. – М.: Металлургия, 1967. – 147 с.
15. Казаков А.А. Непрерывные сталеплавильные процессы / под ред. Е.К. Полторацкой. – М.: Металлургия, 1977. – 272 с.
16. Бигеев А.М. Непрерывные сталеплавильные процессы / под ред. В.А. Кудрина. – М.: Металлургия, 1986. – 136 с.
17. Sborshchikov G., Petelin A., Terekhova A. Thermal operation of superlayer space in Romelt furnace // Izvestiya. Ferrous Metallurgy. – 2022. – Vol. 65. – № 4. – P. 240–245. DOI: 10.17073/0368-0797-2022-4-240-245.
18. Ключников А.Д., Кузьмин В.Н., Попов С.К. Теплообмен и тепловые режимы в промышленных печах. – М.: Энергоатомиздат, 1990. – 174 с.
19. Воскобойников В.Г., Кудрин В.А., Якушев А.М. Общая металлургия. 5-е изд., перераб. и доп. – М.: Металлургия, 1998. – 768 с.
20. Агрегат непрерывного получения стали: пат. № 2760199 Российская Федерация, С1; заявл. 30.12.2022, опубл. 22.11.2021, Бюл. № 33. – 8 с.
21. Continuous steelmaking unit of bubbling type / K. Strogonov, L. Kornilova, A. Popov, A. Zdarov // International Symposium on Sustainable Energy and Power Engineering. – 2021. – P. 63–72. DOI: 10.1007/978-981-16-9376-2_6.
22. Strogonov K., Zdarov A. Energy saving of high-temperature processes by intensive melt degassing // Journal of Physics: Conference Series: The Third Conference “Problems of Thermal Physics and Power Engineering”. – 2020. – Vol. 1683. – № 5. DOI: 10.1088/1742-6596/1683/5/052029.
23. Computer flow simulation and verification for turbine blade channel formed by the C-90-22 A Profile / S. Osipov, I. Shcherbatov, A. Vegeva, P. Bryzgunov, V. Makhmutov // Inventions. – 2022. – Vol. 7. – № 3. – P. 68. DOI: 10.3390/inventions7030068.
24. Research and development of criterial correlations for the optimal grid element size used for RANS flow simulation in single and compound channels / P. Bryzgunov, S. Osipov, I. Komarov, A. Rogalev, N. Rogalev // Inventions. – 2023. – Vol. 8. – № 1. – P. 4. DOI: 10.3390/inventions8010004.
25. Fluent A. Ansys fluent theory guide // Ansys Inc. – USA, 2011. – Vol. 15317. – P. 724–746.
26. Роменец В.А. Процесс Ромелт. – М.: МИСиС, ИД «Руда и Металлы», 2005. – 399 с.
27. Xu Y. A study of bubble behaviors in a liquid steel bath: дис. ... канд. техн. наук. – Стокгольм, 2015. – 32 с.

28. Попов С.К., Ванюшкин В.Д., Петин С.Н. Термохимическая переработка углеродсодержащих материалов. – М.: Изд-во МЭИ, 2022. – 72 с.

Информация об авторах

Константин Владимирович Строгонов, кандидат технических наук, доцент кафедры инновационных технологий наукоемких отраслей, Национальный исследовательский университет «МЭИ», Россия, 111250, г. Москва, ул. Красноказарменная, 14; StrogonovKV@mpei.ru; <https://orcid.org/0000-0003-3276-4403>

Дмитрий Дмитриевич Львов, аспирант, инженер 1-ой категории кафедры инновационных технологий наукоемких отраслей, Национальный исследовательский университет «МЭИ», Россия, 111250, г. Москва, ул. Красноказарменная, 14; LvovDD@mpei.ru; <https://orcid.org/0000-0002-3808-2094>

Анна Владимировна Бурмакина, кандидат технических наук, доцент кафедры инновационных технологий наукоемких отраслей, Национальный исследовательский университет «МЭИ», Россия, 111250, г. Москва, ул. Красноказарменная, 14; BurmakinaAV@mpei.ru; <https://orcid.org/0009-0002-2795-9564>

Вячеслав Андреевич Мурашов, инженер, магистрант кафедры инновационных технологий наукоемких отраслей, Национальный исследовательский университет «МЭИ», Россия, 111250, г. Москва, ул. Красноказарменная, 14; MurashovViacA@mpei.ru; <https://orcid.org/0009-0007-9576-8539>

Андрей Константинович Бастынец, магистрант кафедры инновационных технологий наукоемких отраслей, Национальный исследовательский университет «МЭИ», Россия, 111250, г. Москва, ул. Красноказарменная, 14; BastynetsAK@mpei.ru

Поступила в редакцию: 26.01.2024

Поступила после рецензирования: 25.04.2024

Принята к публикации: 21.10.2024

REFERENCES

1. Khodosov I.E. *Development and research of processes for obtaining metallized materials using the Kuzbass raw material base*. Cand. Dis. Abstract. Novokuznetsk, 2016. 22 p. (In Russ.)
2. Gordon Y., Kumar S., Freislich M., Yaroshenko Yu. Comparative evaluation of energy efficiency and GHG emissions for alternate iron-and steelmaking process technologies. *The creative heritage of V.E. Grum-Grzhimailo: history, current state, future*. Ekaterinburg, Ural Federal University, 2014. pp. 50–59.
3. Ekwurzel B., Boneham J., Dalton M., Heede R., Mera R., Allen M., Frumhoff P. The rise in global atmospheric CO₂, surface temperature, and sea level from emissions traced to major carbon producers. *Climatic Change*, 2017, vol. 144, pp. 579–590. DOI: 10.1007/s10584-017-1978-0.
4. Danilov N.I., Shchelokov Ya.M. *The basics of energy saving*. Ekaterinburg, UGTU-UPI Publ. 2006. 564 p. (In Russ.)
5. Strogonov K., Tolkanov S., Korkots K. Thermostating cover as improving energy efficiency and technological steel mills. *E3S Web of Conferens International Science Conference SPbWOSCE-2018 "Business Technologies for Sustainable Urban Development"*, 2019, no. 110, 01003. DOI: 10.1051/e3sconf/201911001003.
6. Fedyukhin A., Strogonov K., Soloveva O., Solovev S., Akhmetova I., Berardi U., Zaitsev M., Grigorev D. Aerogel product applications for high-temperature thermal insulation. *Energies*, 2022, vol. 15, no. 20. DOI: 10.3390/en15207792.
7. Mishin Yu.P. *On the competitiveness of the Russian metallurgy*. Pure steel: from ore to rolled products. Moscow, NGO "Association of Steelmakers" Publ., 2020. pp. 6–9. (In Russ.)
8. Voynov O.Yu., Lisienko V.G., Chesnokov Yu.N., Lapteva A.V. Comparison of energy consumption in modern steel production technologies. *Energy and resource conservation. Energy supply. Non-traditional and renewable energy sources*. Ekaterinburg, Ural Federal University Publ., 2017. pp. 127–131. (In Russ.)
9. *MIDREX. World direction statistics*, 2020. Available at: https://www.midrex.com/wp-content/uploads/Midrex-STATSbookprint-2020.Final_.pdf (accessed: 18 January 2023).
10. *COREX. Efficient and environmentally friendly smelting reduction*, 2020. Available at: https://www.primetals.com/fileadmin/user_upload/content/01_portfolio/1_ironmaking/corex/COREX.pdf (accessed: 18 January 2023).
11. *The FINEX process economical and environmentally safe ironmaking*, 2020. Available at: https://www.primetals.com/fileadmin/user_upload/content/01_portfolio/1_ironmaking/finex/THE_FINEX_R_PROCESS.pdf (accessed: 18 January 2023).
12. Kartavtsev S.V. *Intensive energy saving and technical progress of ferrous metallurgy*. Magnitogorsk, NMSTU Publ., 2008. 311 p. (In Russ.)
13. Neshporenko E.G., Kartavtsev S.V. *Issues of energy conservation in the extraction of iron from ores*. Magnitogorsk, NMSTU Publ., 2007. 153 p. (In Russ.)
14. Ivantsov G.P., Vasiliev A.V., Smirnov V.I. *Continuous steelmaking process*. Moscow, Metallurgiya Publ., 1967. 147 p. (In Russ.)
15. Kazakov A.A. *Continuous steelmaking processes*. Moscow, Metallurgiya Publ., 1977. 272 p. (In Russ.)
16. Bigeev A.M. *Continuous steelmaking processes*. Moscow, Metallurgiya Publ., 1967. 136 p. (In Russ.)
17. Sborshchikov G., Petelin A., Terekhova A. Thermal operation of superlayer space in Romelt furnace. *Izvestiya. Ferrous Metallurgy*, 2022, vol. 65, no. 4, pp. 240–245. DOI: 10.17073/0368-0797-2022-4-240-245.
18. Klyuchnikov A.D., Kuzmin V.N., Popov S.K. *Heat transfer and thermal regimes in industrial furnaces*. Moscow, Energoatomizdat Publ., 1990. 174 p. (In Russ.)

19. Voskoboynikov V.G., Kudrin V.A., Yakushev A.M. *General metallurgy*. Moscow, Metallurgiya Publ., 1998. 768 p. (In Russ.)
20. Strogonov K.V., Kornilova L.V. *Continuous steel production unit*. Patent RF, no. 2760199, 2022. (In Russ.)
21. Strogonov K., Kornilova L., Popov A., Zdarov A. Continuous steelmaking unit of bubbling type. *International Symposium on Sustainable Energy and Power Engineering*, 2021, pp. 63–72. DOI: 10.1007/978-981-16-9376-2
22. Strogonov K., Zdarov A. Energy saving of high-temperature processes by intensive melt degassing. *Journal of Physics: Conference Series: The Third Conference "Problems of Thermal Physics and Power Engineering"*, 2020, vol. 1683, no. 5. DOI: 10.1088/1742-6596/1683/5/052029.
23. Osipov S., Shcherbatov I., Vegera A., Bryzgunov P., Makhmutov B. Computer flow simulation and verification for turbine blade channel formed by the C-90-22 A profile. *Inventions*, 2022, vol. 7, no. 3, pp. 68. DOI: 10.3390/inventions7030068.
24. Bryzgunov P., Osipov S., Komarov I., Rogalev A., Rogalev N. Research and development of criterial correlations for the optimal grid element size used for RANS flow simulation in single and compound channels. *Inventions*, 2023, vol. 8, no. 1, pp. 4. DOI: 10.3390/inventions8010004.
25. Fluent A. *Ansys fluent theory guide*. USA, Ansys Inc., 2011. Vol. 15317, pp. 724–746.
26. Romenets V.A. *The Romelt process*. Moscow, Ruda i metally Publ., 2005. 399 p. (In Russ.)
27. Xu Y. *A study of bubble behaviors in a liquid steel bath*. Cand. Dis. Stockholm, 2015. 32 p.
28. Popov S.K., Vanyushkin V.D., Petin S.N. *Thermochemical processing of carbon-containing materials*. Moscow, MPEI Publ., 2022. 72 p. (In Russ.)

Information about the author

Konstantin V. Strogonov, Cand. Sc., Associate Professor, National Research University "MPEI", 14, Krasnokazarmennaya street, Moscow, 111250, Russian Federation; StrogonovKV@mpei.ru; <https://orcid.org/0000-0003-3276-4403>

Dmitry D. Lvov, Postgraduate Student, 1st Category Engineer, National Research University "MPEI", 14, Krasnokazarmennaya street, Moscow, 111250, Russian Federation; LvovDD@mpei.ru; <https://orcid.org/0000-0002-3808-2094>

Anna V. Burmakina, Cand. Sc., Associate Professor, National Research University "MPEI", 14, Krasnokazarmennaya street, Moscow, 111250, Russian Federation; BurmakinaAV@mpei.ru; <https://orcid.org/0009-0002-2795-9564>

Vyacheslav A. Murashov, Engineer, Master Student, National Research University "MPEI", 14, Krasnokazarmennaya street, Moscow, 111250, Russian Federation; MurashovViacA@mpei.ru; <https://orcid.org/0009-0007-9576-8539>

Andrey K. Bastynets, Master Student, National Research University "MPEI", 14, Krasnokazarmennaya street, Moscow, 111250, Russian Federation. BastynetsAK@mpei.ru

Received: 26.01.2024

Revised: 25.04.2024

Accepted: 21.10.2024