

УДК 669.162.1

Дзюба А.В., Савинов А.С., Харченко А.С., Сибгатуллин С.К., Сысоев В.И., Харченко Е.О., Павлов А.В.

ПРОГНОЗИРОВАНИЕ ТЕМПЕРАТУРЫ ЗАМАСЛЕННОЙ ОКАЛИНЫ, УПАКОВАННОЙ В МЕТАЛЛИЧЕСКИЙ КОНТЕЙНЕР, ПРИ ДВИЖЕНИИ В ДОМЕННОЙ ПЕЧИ ОТ КОЛОШНИКА К ГОРНУ

Аннотация. Математическим моделированием получена система уравнений, позволяющая прогнозировать температуру замасленной окалины, упакованной в металлический контейнер, при движении ее от колошника до горна печи. Характеристики окалины, упакованной в металлический контейнер: содержание железа 69,5%; теплоемкость 681-1246 Дж/(кг·°C) в зависимости от содержания в окалине воды и масла в температурном интервале 100–1500°C; насыщенная плотность окалины, помещенной в металлический контейнер – 2089 кг/м³; радиус металлического контейнера – 0,041 м.

Решающее действие на температуру замасленной окалины при её движении от колошника к горну имеет характер теплообмена по высоте доменной печи. Для условий ее загрузки в зону рудного гребня колошника печи объемом 1370 м³ определили, что масло начнет испаряться из металлического контейнера на расстоянии 88% от её рабочей высоты и продлится до уровня 77%.

Ключевые слова: замасленная окалина, утилизация техногенных отходов, тепло-физические свойства, теплопередача, температура, доменная печь

Введение

Одним из направлений повышения экологичности процесса производства и обработки черных металлов является рециклинг техногенных отходов в производство. В частности, проблема утилизации образующихся на металлургическом предприятии железосодержащих мелкодисперсных отходов в основном решается путем их использования в качестве компонентов агломерационной шихты [1-4]. Трудности вызывает рециклинг по этой схеме замасленной прокатной окалины, содержащей до 20-30% масел [5-7]. Способы ее утилизации, предполагающие предварительную химическую или термическую обработку, брикетирование не нашли широкого применения. В этой связи актуальной представляется разработка способа утилизации замасленной окалины прямой загрузкой в доменную печь без предварительного обезмасливания [8-10].

Согласно патенту [10] для загрузки замасленной окалины в доменную печь вместо малопрочных брикетов, с применением замасленной окалины, можно использовать металлическую упаковку в виде контейнера, плавящегося при температуре не менее 1500°C. Данный способ имеет преимущество перед теми, которые подразумевают предварительное обезмасливание и дальнейшее брикетирование или агломерацию, так как устраняет недостатки, связанные с дополнительным оборудованием, временем подготовки, дополнительным хранением и утилизацией извлеченных органических соединений, очищением загрязненной воды. Однако данный способ не был реализован в производстве, в связи с чем целесообразно моделирование ряда процессов, в частности прогнозирование температуры замасленной окалины в доменной печи.

Материалы и методы исследования

Исследуемая замасленная окалина (рис. 1) содержала 69,5% железа (табл. 1). Содержание масла, не связанного химически с поверхностью частиц окалины, определенного экстракцией органическим растворителем, и влаги составляло от 10 до 20%.



Рис. 1. Образец замасленной окалины

Таблица 1

Средний химический состав образцов замасленной окалины

Элемент/оксид	Fe _{общ}	SiO ₂	CaO	MgO	Al ₂ O ₃	MnO	S	ZnO
Массовая доля, %	69,5	1,18	0,95	0,10	0,20	1,14	0,116	0,14

Образцы замасленной окалины упаковали в металлический контейнер, изготовленный из стали 3, размерами 85×83,4 мм, объемом 420 см³ (рис. 2).

Для математического прогнозирования движения замасленной окалины, упакованной в металлический контейнер, рассчитали изменение температуры шихты и газа по высоте доменной печи объемом 1370 м³ с суточной производительностью в среднем за год 3800 т.

© Дзюба А.В., Савинов А.С., Харченко А.С., Сибгатуллин С.К., Сысоев В.И., Харченко Е.О., Павлов А.В., 2024



Рис. 2. Металлический контейнер объёмом 420 см³, наполненный замасленной окалиной

Некоторые параметры работы печи были следующими:

- теоретическая температура горения – 1960°C;
- температура колошникового газа в зоне рудного гребня – 204°C;
- выход фурменного газа – 1645 м³/т чугуна;
- состав колошникового газа, %:
 - CO₂ – 18,61;
 - CO – 25,6;
 - H₂ – 10,8;
- уровень засыпи – 1 м.

На основе метода конечных разностей [11] получены зависимости изменения температуры окускованной замасленной окалины при движении от колошника до горна доменной печи за счет ее нагрева газом и шихтой. Для этого в расчетах использовали характеристики замасленной окалины, определенные в лаборатории кафедры металлургии и химических технологий (МиХТ) [12-13]:

- теплоемкость – 681-1246 Дж/(кг·°C) в зависимости от содержания в окалине воды и масла в температурном интервале 100–1500°C;
- насыпная плотность окалины, помещенной в металлический контейнер – 2089 кг/м³;
- радиус металлического контейнера – 0,041 м.

Результаты

Получены зависимости температуры контейнера с замасленной окалиной от расположения его в различных горизонтах по высоте доменной печи для условий его нагрева потоком газа (система уравнений

(1) и передачи тепла от шихты (система уравнений (2)).

$$\begin{cases} T_{3.0.г}(H_n) = (1,64H^2 - 58,56H + 1484) \cdot \frac{W_{Г.н.}}{100}; \\ T_{3.0.г}(H_{33г}) = (-5,4H + 1053) \cdot \frac{W_{Г.33г}}{100}; \\ T_{3.0.г}(H_B) = (1,22H^2 - 242,45H + 12028) \cdot \frac{W_{Г.В.}}{100}, \end{cases} \quad (1)$$

$$\begin{cases} T_{3.0.ш}(H_n) = (1,79H^2 - 60,13H + 1430) \cdot \frac{W_{Ш.н.}}{100}; \\ T_{3.0.ш}(H_{33г}) = (-5,02H + 999) \cdot \frac{W_{Ш.33г}}{100}; \\ T_{3.0.ш}(H_B) = (-0,62H^2 + 84,89H - 2248) \cdot \frac{W_{Ш.В.}}{100}, \end{cases} \quad (2)$$

где $T_{3.0.г}(H_n)$, $T_{3.0.г}(H_B)$, $T_{3.0.г}(H_{33г})$ – температура замасленной окалины соответственно в нижней, верхней ступени интенсивного теплообмена и зоне замедленного теплообмена при условии нагрева только газом; $T_{3.0.ш}(H_n)$, $T_{3.0.ш}(H_{33г})$, $T_{3.0.ш}(H_B)$ – температура замасленной окалины соответственно в нижней, верхней ступени интенсивного теплообмена и зоне замедленного теплообмена при условии нагрева только шихтой;

H – расстояние от оси фурменного очага до горизонта, в котором расположен контейнер с замасленной окалиной, выраженное в % от рабочей высоты печи; $W_{Г.н.}$, $W_{Г.В.}$, $W_{Г.33г}$ – теплоёмкость потока газа для условий соответственно нижней, верхней ступени интенсивного теплообмена и зоны замедленного теплообмена (составляет 100% от общей теплоёмкости потоков газа и шихты в данной ступени теплообмена для условий нагрева только потоком газа);

$W_{Ш.н.}$, $W_{Ш.В.}$, $W_{Ш.33г}$ – теплоёмкость потока шихты для условий соответственно нижней, верхней ступени интенсивного теплообмена и зоны замедленного теплообмена (составляет 100% от общей теплоёмкости потоков газа и шихты в данной ступени теплообмена для условий нагрева только потоком шихты).

Поскольку в доменной печи нагрев замасленной окалины будет осуществляться одновременно от шихты и газа в соотношении теплоёмкостей их потоков ($W_{ш}$ и $W_{г}$) в локальной зоне по радиусу колошника, где размещаются контейнеры, то уравнения (1) и (2) можно преобразовать в результирующее уравнение (3):

$$\begin{cases} T_{3.0.}(H_n) = (1,64H^2 - 58,56H + 1484) \cdot \frac{W_{Г.н.}}{100} + (1,79H^2 - 60,13H + 1430) \cdot \frac{W_{Ш.н.}}{100}; \\ T_{3.0.}(H_{33г}) = (-5,4H + 1053) \cdot \frac{W_{Г.33г}}{100} + (-5,02H + 999) \cdot \frac{W_{Ш.33г}}{100}; \\ T_{3.0.}(H_B) = (1,22H^2 - 242,45H + 12028) \cdot \frac{W_{Г.В.}}{100} + (-0,62H^2 + 84,89H - 2248) \cdot \frac{W_{Ш.В.}}{100}. \end{cases} \quad (3)$$

Теплоёмкости потоков шихты и газа рассчитали для условий их движения в зоне рудного гребня при фактической температуре, давлении и составе газа по известным формулам [14-17]:

$$W_{ш} = c_{ш} \cdot P_{ш}; \quad (4)$$

$$W_{г} = c_{г} \cdot V_{г}, \quad (5)$$

где $c_{ш}$ – теплоёмкость единицы веса шихты;
 $P_{ш}$ – интенсивность движения шихты в весовом измерении;
 $c_{г}$ – теплоёмкость единицы объёма газа;
 $V_{г}$ – объёмная интенсивность газового потока.

Рассчитали высоты кольцевых зон рудного гребня верхней ($H_{в}$) и нижней ($H_{н}$) ступеней интенсивного теплообмена по формулам, полученным из закономерностей теплообмена [14-17]:

$$H_{в} = \frac{3 \cdot w_{ш}^B \cdot c_v}{a_v^B \cdot (1 - m_{ср})}; \quad (6)$$

$$H_{н} = \frac{3 \cdot w_{ш}^H \cdot c_{кажв}}{a_v^H \cdot (m_{н} - 1)}, \quad (7)$$

где $w_{ш}^B$ – теплоемкость потока шихты кольцевой зоны рудного гребня верхней ступени интенсивного теплообмена, кДж/(т·К);
 $w_{ш}^H$ – теплоемкость потока шихты кольцевой зоны рудного гребня нижней ступени интенсивного теплообмена, кДж/(т·К);
 c_v – теплоемкость насыпного 1 м³ шихты кольцевой зоны рудного гребня верхней ступени интенсивного теплообмена, кДж/(м³·К);
 $c_{кажв}$ – кажущаяся теплоемкость 1 м³ шихты кольцевой зоны рудного гребня нижней ступени интенсивного теплообмена, кДж/(м³·К);
 a_v^B – объемный коэффициент теплопередачи кольцевой зоны рудного гребня верхней ступени интенсивного теплообмена, кДж/(м³·К);
 a_v^H – объемный коэффициент теплопередачи кольцевой зоны рудного гребня нижней ступени интенсивного теплообмена, кДж/(м³·К);
 $m_{ср}$ – среднее значение отношения теплоемкостей потоков шихты и газа в верхней ступени теплообмена;
 $m_{н}$ – отношения теплоемкостей потоков шихты и газа в нижней ступени теплообмена.

Для существующих условий работы доменной печи объемом 1370 м³ в исследуемый период среднее соотношение теплоёмкостей потоков шихты и газа $\frac{W_{ш}}{W_{г}}$ в зоне рудного гребня для условий верхней и нижней ступеней интенсивного теплообмена соответственно составляло 0,9 и 1,8. В зоне замедленного теплообмена

1,0. Исходя из суммы теплоёмкостей потоков шихты и газа, равной единице, теплоёмкости потоков газа и шихты равны: $W_{г.н.} = 36\%$, $W_{г.зст} = 50\%$, $W_{г.в.} = 53\%$, $W_{ш.н.} = 64\%$, $W_{ш.зст.} = 50\%$, $W_{ш.в.} = 47\%$.

Высота кольцевых зон рудного гребня верхней и нижней ступеней интенсивного теплообмена составила 4,74 и 3,7 м соответственно. Изменение температуры шихты и газа по высоте доменной печи приведено на рис. 3.

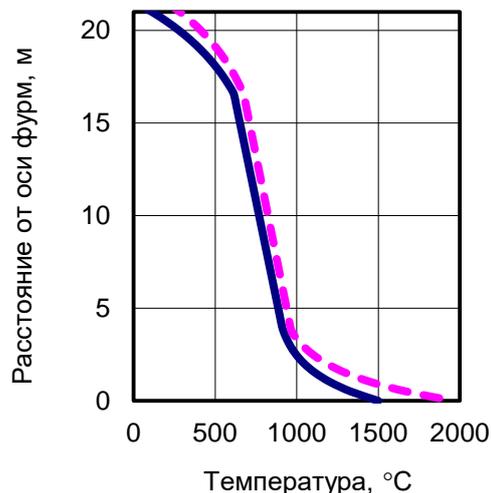


Рис. 3. Температура шихты (—) и газа (---) по высоте доменной печи

Таким образом, решением системы уравнений (3) для исследуемых условий работы доменной печи объемом 1370 м³ является изменение температуры замасленной окалины, упакованной в металлический контейнер, представленное на рис. 4.

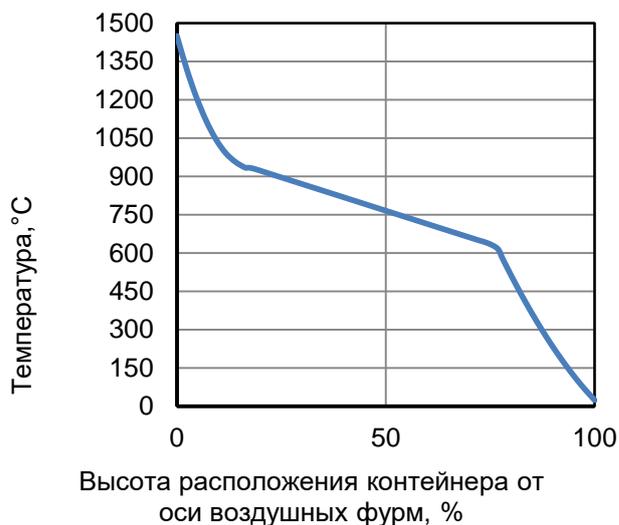


Рис. 4. Прогнозная температура окускованной замасленной окалины и образовавшихся из неё продуктов при движении от колошника в направлении горна печи

Анализ рис. 4 свидетельствует о том, что на горизонте H в интервале 77-88% от общего расстояния от оси фурменного очага до уровня засыпи температура контейнера с замасленной окалиной составит 230-600°C, что соответствует началу и концу испарения масла из замасленной окалины. Согласно рис. 3 и 4 решающее влияние на температуру замасленной окалины при её движении от колошника к горну имеет характер теплообмена по высоте доменной печи. От поверхности шихты до уровня, соответствующего 600°C, изменение температуры замасленной окалины отличается от изменения температуры остальных материалов, так как в замасленной окалине присутствуют вода и масло, теплоёмкость которых значительно превышает теплоёмкость железорудного сырья. В зонах более 600°C температура окалины и образовавшихся из неё продуктов идентична средней температуре окружающих материалов.

Заключение

1. Математическим моделированием получена система уравнений, позволяющая прогнозировать температуру окускованной замасленной окалины и образовавшихся из неё продуктов при движении от колошника в направлении горна печи.

2. Решающее действие на температуру замасленной окалины при её движении от колошника к горну имеет характер теплообмена по высоте доменной печи.

3. В доменной печи объемом 1370 м³ на расстоянии по высоте 77-88% от оси воздушных фурм температура контейнера с замасленной окалиной составит 230-600°C, что соответствует началу и концу испарения масла из замасленной окалины.

Список источников

1. Леонтьев Л.И., Григорович К.В., Костина М.В. Фундаментальные исследования как основа создания новых материалов и технологий в области металлургии. Часть 1 // Известия высших учебных заведений. Черная металлургия. 2016. Т. 59. № 1. С. 11-22.
2. Вдувание комбинированного топлива из маслоотходов и замасленной окалины в доменную печь / И.Ф. Курунов, А.Л. Петелин, Д.Н. Тихонов, С.Ф. Ерохин // Металлург. 2004. № 7. С. 33 – 35.
3. Танутров И.Н., Свиридова М.Н., Савеня А.Н. Новая технология совместной переработки техногенных отходов // Известия высших учебных заведений. Цветная металлургия. 2013. № 1. С. 21-26.
4. Танутров И.Н. Технологическое моделирование совместного выщелачивания замасленной прокатной окалины и красного шлама / И.Н. Танутров, М.Н. Свиридова, Ю.А. Чесноков, Л.А. Маршук // Известия высших учебных заведений. Черная металлургия. 2020. Т. 63. № 11-12. С. 891-898.
5. Ровин С.Л., Ровин Л.Е. Новая концепция рециклинга дисперсных железосодержащих отходов //

- Труды X Международной научно-практической конференции «Прогрессивные литейные технологии», Москва, 2020. М.: НИТУ «МИСиС», 2020. С. 238-243.
6. Харченко А.С. Закономерности поступления компонентов шихты по крупности из бункера БЗУ в колошниковое пространство печи в зависимости от условий загрузки // Вестник Магнитогорского государственного технического университета им. Г.И. Носова. 2018. Т. 16, № 3. С. 46-56.
 7. Совершенствование хода доменного процесса повышением расхода природного газа по газодинамике в верхней ступени теплообмена / С.К. Сибатуллин, А.С. Харченко, В.А. Бегинюк, В.Н. Селиванов, В.П. Чернов // Вестник Магнитогорского государственного технического университета им. Г.И. Носова. 2017. Т. 15, № 1. С. 37-44.
 8. Основы теории и технологии доменной плавки / А.Н. Дмитриев, Н.С. Шумаков, Л.И. Леонтьев, О.П. Онорин. Екатеринбург: УрО РАН, 2005. 545 с.
 9. Рациональные технологические решения при производстве чугуна в доменных печах ПАО «ММК» / А.С. Харченко, С.К. Сибатуллин., А.В. Павлов, А.А. Полинов // Черные металлы. 2021. № 12. С. 10-15.
 10. Патент № RU 2131929 C1 Российская Федерация, МПК C21B 5/00. Способ получения чугуна с использованием доменного производства на металлургическом предприятии: № 98111633/02: заявл. 1998.06.26: опубл. 1999.06.20 / В.Н. Селиванов, Ю.С. Юсфин, П.И. Черноусов, Р.В. Сейфулов., В.И. Губанов.
 11. Кузнецов Г.В., Шеремет М.А. Разностные методы решения задач теплопроводности: учебное пособие. Томск: Изд-во ТПУ, 2007. 172 с.
 12. Дзюба А. В. Выявление теплоёмкости замасленной окалины в интервале температур 80–900°C / А.В. Дзюба, А.С. Савинов, А.С. Харченко, С.К. Сибатуллин, В.И. Сысоев, Н.И. Муравьев, А.В. Павлов // Современные проблемы электрометаллургии стали: материалы XIX Международной конференции, Аша, 10–12 сентября 2024 года. Челябинск: Южно-Уральский государственный университет (национальный исследовательский университет), 2024. С. 60-65.
 13. Определение теплопроводности замасленной прокатной окалины / Дзюба А.В., Сысоев В.И., А.С. Савинов, А.С. Харченко, И.В. Решетова, Н.С. Щелоков // Материалы XXII Менделеевского съезда по общей и прикладной химии. В 7 т. М., 2024. Т. 6. С. 246.
 14. Spirin N.A., Onorin O.P., Istomin A.C. Prediction of blast furnace thermal state in real-time operation // Solid State Phenomena. 2020. V. 299. P. 518–523.
 15. Цифровая трансформация пирометаллургических технологий: состояние, научные проблемы и перспективы развития / Н.А. Спиринов, В.В. Лавров, В.Ю. Рыболовлев, Д.А. Шнайдер и др. // Известия

- высших учебных заведений. Чёрная металлургия. 2021. № 8 (64). С. 508-598.
16. Павлов А.В. Совершенствование технологии доменной плавки с использованием модельных систем поддержки принятия решений: дис. ... канд. техн. наук: 05.16.02 / А. В. Павлов; [Место защиты: Магнитогорский государственный технический университет имени Г.И. Носова]. Магнитогорск, 2016. 162 с.
17. Информационно-моделирующая система контроля тепловых потерь в нижней части доменной печи / Н.А. Спиринов, И.А. Гуринов, В.В. Лавров, А.С. Истомин, Л.А. Зайнуллин // Металлург. 2024. № 2. С. 71-75.

Сведения об авторах

Харченко Александр Сергеевич – доктор технических наук, доцент, заведующий кафедрой металлургии и химических технологий института металлургии, машиностроения и материалообработки, ФГБОУ ВО «Магнитогорский государственный технический университет им. Г.И. Носова», г. Магнитогорск, Россия.

Савинов Александр Сергеевич – доктор технических наук, доцент, заведующий кафедрой механики института металлургии, машиностроения и материалообработки, ФГБОУ ВО «Магнитогорский государственный технический университет им. Г.И. Носова», г. Магнитогорск, Россия.

Сибатуллин Салават Камилевич – доктор технических наук, профессор, профессор кафедры металлургии и химических технологий института металлургии, машиностроения и материалообработки, ФГБОУ ВО «Магнитогорский государственный технический университет им. Г.И. Носова», г. Магнитогорск, Россия.

Дзюба Андрей Викторович – аспирант кафедры металлургии и химических технологий института металлургии, машиностроения и материалообработки, ФГБОУ ВО «Магнитогорский государственный технический университет им. Г.И. Носова», г. Магнитогорск, Россия.

Сысоев Виктор Иванович – кандидат технических наук, заведующий лабораторией кафедры металлургии и химических технологий института металлургии, машиностроения и материалообработки, ФГБОУ ВО «Магнитогорский государственный технический университет им. Г.И. Носова», г. Магнитогорск, Россия.

Харченко Елена Олеговна – кандидат технических наук, старший преподаватель кафедры металлургии и химических технологий института металлургии, машиностроения и материалообработки, ФГБОУ ВО «Магнитогорский государственный технический университет им. Г.И. Носова», г. Магнитогорск, Россия.

Павлов Александр Владимирович – кандидат технических наук, начальник доменного цеха ПАО «ММК», г. Магнитогорск, Россия.

INFORMATION ABOUT THE PAPER IN ENGLISH

FORECASTING THE TEMPERATURE OF OILED SCALE PACKED IN A METAL CONTAINER WHEN MOVING IN A BLAST FURNACE FROM THE BLAST-FURNACE MOUTH TO THE IRON RECEIVER

Kharchenko Aleksander S. – Doctor of Technical Sciences, Associate Professor, Head of Department of Metallurgy and Chemical Technologies, Institute of Metallurgy, Mechanical Engineering and Material Processing, Nosov Magnitogorsk State Technical University, Magnitogorsk, Russia.

Savinov Aleksander S. – Doctor of Technical Sciences, Associate Professor, Head of the Department of Mechanics, Institute of Metallurgy, Mechanical Engineering and Material Processing, Nosov Magnitogorsk State Technical University, Magnitogorsk, Russia.

Sibagatullin Salavat K. – Doctor of Technical Sciences, Professor, Professor, Professor, Department of Metallurgy and Chemical Technologies, Institute of Metallurgy, Mechanical Engineering and Material Processing, Nosov Magnitogorsk State Technical University, Magnitogorsk, Russia.

Dzyuba Andrey V. – graduate student Department of Metallurgy and Chemical Technologies, Institute of Metallurgy, Mechanical Engineering and Material Processing, Nosov Magnitogorsk State Technical University, Magnitogorsk, Russia.

Sysoev Victor I. – Candidate of Technical Sciences, Head of Laboratory Department of Metallurgy and Chemical Technologies, Institute of Metallurgy, Mechanical Engineering and Material Processing, Nosov Magnitogorsk State Technical University, Magnitogorsk, Russia.

Kharchenko Elena O. – Candidate of Technical Sciences, Senior Lecturer Department of Metallurgy and Chemical Technologies, Institute of Metallurgy, Mechanical Engineering and Material Processing, Nosov Magnitogorsk State Technical University, Magnitogorsk, Russia.

Pavlov Alexander V. – Candidate of Technical Sciences, Head of the blast furnace shop, MAGNITOGORSK IRON & STEEL WORKS PJSC, Magnitogorsk, Russia.

Abstract. A system of equations was obtained using mathematical modeling to predict the temperature of oily scale packed in a metal container as it moves from the furnace throat to the hearth. Characteristics of scale packed in a metal container: iron content 69.5%; heat capacity 681-1246 J/(kg·°C) depending on the content of water and oil in the scale in the temperature range of 100–1500°C; bulk density of scale placed in a metal container 2089 kg/m³; radius of the metal container – 0.041 m. For the conditions of its loading into the ore crest zone of the furnace throat with a volume of 1370 m³, it was determined that oil will begin to evaporate from the metal container at a distance of 88% of its working height and will continue to the level of 77%.

Keywords: oily scale; disposal of industrial waste; thermal and physical properties; heat transfer; temperature; blast furnace

Ссылка на статью:

Прогнозирование температуры замасленной окалины, упакованной в металлический контейнер, при движении в доменной печи от колошника к горну / Дзюба А.В., Савинов А.С., Харченко А.С., Сибатгуллин С.К., Сысоев В.И., Харченко Е.О., Павлов А.В. // Теория и технология металлургического производства. 2024. №4(51). С. 24-29.

Kharchenko A.S., Savinov A.S., Sibatullin S.K., Dzyuba A.V., Sysoev V.I., Kharchenko E.O., Pavlov A.V. Forecasting the temperature of oiled scale packed in a metal container when moving in a blast furnace from the blast-furnace mouth to the iron receiver. *Teoria i tehnologiya metallurgicheskogo proizvodstva*. [The theory and process engineering of metallurgical production]. 2024, vol. 51, no. 4, pp. 24-29.