

Increasing the Energy Efficiency of Blast-Furnace Smelting by Choosing Rational Parameters for Loading a Multicomponent Charge

**Ivanča N.G., Muraviova I.G., Vishniakov V.I., Shcherbachov V.R.,
Ermolina K.P.**

Iron and Steel Institute of Z.I.Nekrasov National Academy of Sciences of Ukraine
Dnipro, Ukraine

Abstract. The purpose of this study was to develop a calculation tool for researchers and technologists - metallurgists, providing the ability to quickly assess the distribution of charge materials in a blast furnace when it is loaded with a multicomponent charge. The goal is achieved by analyzing and summarizing the multidimensional matrix of values for the content of the charge components in the annular zones of the blast furnace, obtained using a mathematical model of its loading under various modes, changing the content of pellets in the charge and the moment the pellets are unloaded onto the main conveyor. The most important results of the studies carried out are the substantiation of the possibility of obtaining and applying calculated dependencies to determine the characteristics of the distribution of charge components with an accuracy acceptable for technological practice, as well as the established relationship between the content of the component in the charge and the value of the set point for the start of unloading it onto the conveyor with the content of this component in the annular zones of the top. Estimated composition of mixtures of charge materials formed in different zones of a blast furnace makes it possible to predict the properties of melts formed from them and to correct them in order to achieve the required level of energy efficiency in melting a multicomponent charge by promptly choosing rational parameters of the loading mode.

Keywords: multicomponent charge, mixtures of iron ore materials, conveyor, distribution of components along the radius, calculated dependencies.

DOI: <https://doi.org/10.52254/1857-0070.2022.2-54.05>

UDC: 669.162.261.669.162.24.083.133

Sporirea eficienței energetice a topiturii în furnal prin selectarea parametrilor raționali a regimului de încărcare a încărcăturii multicomponente

Ivancea N.G., Muraviova I.G., Vişniakov V.I., Şcerbachov V.R., Ermolina K.P.

Institutul Z. I. Nekrasov de Metalurgie feroasă, Academia Națională de Științe a Ucrainei,
or. Dnepr, Ucraina

Rezumat. Scopul acestei cercetări este de a dezvolta un instrument de calcul pentru cercetători și tehnologi - metalurgiști, care ar oferi posibilitatea unei evaluări rapide a distribuției materialelor de încărcare în spațiul de lucru al furnalului atunci, când acesta este încărcat cu materiale de încărcare multicomponente, inclusiv, în special, materiale de încărcare de calitate scăzută, fracțiuni de materiale de încărcare substandard (cut-off), precum și diverși aditivi de restaurare a combustibilului. Scopul stabilit este atins prin analiza și generalizarea rezultatelor simulării matematice a procesului de încărcare a furnalului cu transportare pe bandă rulantă a materialelor de încărcare și cu mașină de încărcare fără con, pe baza cărora a fost obținută matricea multidimensională a valorilor conținutului materialelor de încărcare în zece zone ale inelului furnalului, în funcție de programul de încărcare, de raza medie a zonei, de conținutul materialelor de încărcare și de setarea descărcării acestora pe banda rulantă principală. Cel mai important rezultat al cercetării efectuate este argumentarea posibilității de obținere și utilizare a dependențelor de calcul pentru determinarea caracteristicilor de distribuție a componentelor individuale ale încărcăturii pe grătarul furnalului înalt cu o precizie acceptabilă pentru practica tehnologică. Rezultatele importante includ, de asemenea, relațiile stabilite între conținutul de componente din încărcătură și valoarea punctului de reglare pentru descărcarea acestora pe transportorul principal și conținutul relativ al acestei componente într-o anumită zonă inelară a focarului. Semnificația rezultatelor obținute constă în crearea unui instrument de calcul pentru evaluarea conținutului relativ al componentelor încărcăturii în diferite puncte ale razei cuptorului, care oferă posibilitatea de a prezice ulterior compoziția amestecurilor de materiale de încărcare formate în diferite zone inelare ale furnalului.

Cuvinte-cheie: încărcătură cu mai multe componente, amestecuri de minereu de fier, transportor, distribuția pe rază a componentelor, dependențe calculate.

Повышение энергоэффективности доменной плавки за счет выбора рациональных параметров режима загрузки многокомпонентной шихты

Иванча Н.Г., Муравьева И.Г., Вишняков В.И., Щербачев В.Р., Ермолина К.П.

Институт черной металлургии им. З.И. Некрасова Национальной академии наук Украины,
г. Днепр, Украина

Аннотация. Целью настоящего исследования являлась разработка расчетного инструмента для исследователей и технологов - металлургов, обеспечивающего возможность оперативной оценки распределения шихтовых материалов в рабочем пространстве доменной печи при загрузке ее многокомпонентной шихтой, включающей, в том числе, шихтовые материалы пониженного качества, некондиционные (отсеваемые) фракции шихтовых материалов, а также различные топливно - восстановительные, гарнисажеобразующие и промывочные добавки. Поставленная цель достигается путем анализа и обобщения результатов математического моделирования процесса загрузки доменной печи с конвейерной доставкой шихты на колошник и бесконусным загрузочным устройством, на основе которых получена многомерная матрица значений содержания компонентов шихты в десяти кольцевых зонах доменной печи в зависимости от вида программы загрузки, среднего радиуса зоны, содержания компонентов в шихте и уставки начала выгрузки их на главный конвейер. Наиболее важным результатом проведенных исследований является выполненное на примере окатышей, загружаемых в составе железорудной порции, обоснование возможности получения и применения расчетных зависимостей для определения характеристик распределения отдельных компонентов шихты на колошнике доменной печи с приемлемой для технологической практики точностью. К важным результатам следует отнести также установленные взаимосвязи содержания компонента в шихте и величины уставки начала выгрузки его на главный конвейер с относительным содержанием этого компонента в конкретной кольцевой зоне колошника. Значимость полученных результатов заключается в создании расчетного инструмента для оценки относительного содержания компонентов шихты в различных точках радиуса колошника, что обеспечивает возможность последующего прогноза состава смесей шихтовых материалов, формирующихся в различных кольцевых зонах доменной печи, свойств, образующихся из них расплавов и их корректировки. Это позволит обеспечить требуемый уровень энергоэффективности плавки путем оперативного выбора рациональных параметров режима загрузки в условиях работы доменных печей на многокомпонентной шихте.

Ключевые слова: многокомпонентная загрузка, железорудные смеси, конвейер, радиусное распределение компонентов, расчетные зависимости.

I. ВВЕДЕНИЕ И ПОСТАНОВКА ЗАДАЧИ

Устойчивая тенденция увеличения стоимости сырья и топлива, сформировавшаяся в последние годы, предопределяет работу доменных печей в изменяющихся шихтовых условиях, характеризующихся использованием материалов пониженного качества, применением многокомпонентной шихты с одновременным использованием двух и более видов каждого из основных компонентов (агломерата, окатышей и кокса), вводом в состав шихты некондиционных (отсеваемых) фракций шихтовых материалов, а также использованием различных топливно - восстановительных, гарнисажеобразующих и промывочных добавок. Как показано в работах Большакова В.И. [1], Доброскока В.А. [2], Бухвальдера Й., Лонарди Э., Кёлера С. [3], Шепетовского Э.А. [4] и других исследователей для сокращения потребления дефицитных энергоносителей и обеспечения требуемого уровня энергоэффективности

доменной плавки перспективным является совершенствование технологии загрузки доменных печей путем поиска и внедрения рациональных параметров формирования и режимов загрузки порций многокомпонентной шихты. Результаты ранее выполненных исследований и опыт промышленного опробования различных технологических приемов загрузки многокомпонентной шихты показали, что смешивание железорудных шихтовых материалов и кокса перед загрузкой в доменную печь, ввод в состав шихты добавок требуемого назначения с образованием на колошнике доменной печи смешанного слоя шихтовых материалов, а также ввод отсеваемых фракций шихтовых материалов в доменную шихту и загрузка их в составе многокомпонентных смешанных порций является одним из наиболее эффективных путей уменьшения энергоемкости доменной плавки и себестоимости чугуна, при условии обоснованного выбора рациональных параметров формирования смешанных порций шихты и режима их загрузки [1 - 4].

Эффективность использования многокомпонентной шихты определяется уровнем реализации технологических требований к распределению компонентов в различных зонах доменной печи, которые обеспечивают наиболее рациональные тепловой и газодинамический режимы, а также режимы восстановления и шлакообразования, соответствующие составу шихты в указанных зонах. Например, практический опыт ввода окатышей в доменную шихту и результаты многочисленных исследований, выполненных под руководством Большакова В.И. [4], показали преимущества их загрузки в смеси с агломератом в виде смешанных порций с заданной структурой, а также негативные последствия загрузки этих компонентов в виде отдельных порций.

В связи с усиливающимся дефицитом качественного железорудного сырья, коксующихся углей и, соответственно, кокса в доменном производстве широкое распространение получили технологические приемы ввода различных нетрадиционных железосодержащих материалов (в том числе, отсеваемых фракций агломерата и окатышей), топливных и углеродсодержащих добавок в состав шихты, активно разрабатывавшиеся Доброскоком В.А., Бухвальдером Й. [2, 3], Никитиным Л.Д., Бугаевым С.Ф. [5], Ярошевским С.Л., Ноздрачевым В.А., Кузиным А.В. [6, 7] и другими. Информация о распределении компонентов доменной шихты по сечению печи важна не только при выборе либо корректировке программ загрузки, но и при выполнении аналитических исследований процессов в объеме доменной печи. Компонентный состав находящихся в различных зонах печи смесей железосодержащих материалов может быть определен с использованием комплексной математической модели, включающей модели ряда процессов: формирования многокомпонентных порций шихтовых материалов, движения их по тракту загрузки (в том числе, в загрузочном устройстве) и в рабочем пространстве доменной печи, а также распределения шихты на поверхности засыпи. Основные положения комплексной математической модели процесса загрузки доменной печи изложены в отдельной статье (*Complex Mathematical Model of the Distribution of Multicomponent Charge in a Blast Furnace*) / [Иванча Н.Г., Муравьева И.Г.,

Шумельчик Е.И., Вишняков В.И., Семенов Ю.С.] – *Metallurgist*, May 2018, Volume 62, Issue 1–2, pp. 95–100). Получение информации о распределении компонентов шихты в зонах печи с помощью комплексной математической модели является трудоемким процессом, требующим поддержки пользователя и корректировки на различных стадиях процесса моделирования. Для практических целей – оценки показателей распределения технологами – более целесообразным является использование расчетных зависимостей, обеспечивающих возможность определения показателей распределения компонентов инженерными методами с приемлемой для практики точностью, что позволит получить, как количественные показатели содержания отдельных компонентов в заданных зонах доменной печи, так и определить тенденции их изменения при направленном изменении параметров режима загрузки.

Анализ ранее выполненных исследований в области разработки математических моделей и методов расчета характеристик распределения показал, что значительная часть работ посвящена распределению железорудной и углеродсодержащей частей шихты в целом, без оценки распределения входящих в них компонентов [8 - 19], в том числе, работа Эйджревела А. [17], в которой анализируется влияние переменного содержания окатышей в шихте на ход доменной плавки. Результаты этих работ обобщаются в виде геометрических характеристик слоев и позволяют получить распределение рудных нагрузок по радиусу колошника доменной печи. В некоторых из них, например [18, 19], исследованы процессы выбивания кокса, его перераспределения при выгрузке железорудного материала на слой кокса и формирования смешанных слоев этих материалов на колошнике, уделяется также внимание исследованию загрузки осевых порций кокса и оптимизации их параметров.

Исследования распределения мелкого кокса, загружаемого в составе железорудных порций, можно отнести к работам по изучению распределения отдельных компонентов в слое шихты [20, 21]. Работу Мацуи И., Сато А., Ояма Т., Мацуо Т. [22] следует отметить, как содержащую весьма интересные, с точки зрения практики, результаты. На масштабных физических моделях получены результаты, показывающие

изменение содержания окатышей, загруженных в составе железорудной порции совместно с агломератом, в выходном потоке из бункера и по радиусу колошника в зависимости от расположения дозы окатышей в порции.

Следует также отметить использование метода дискретных элементов (DEM) в работе [23] для оценки сегрегации шихтовых материалов по крупности при загрузке бункера бесконусного загрузочного устройства (БЗУ) и изменения содержания отдельных фракций в потоке шихтового материала, выгружаемого из бункера. При помощи этого метода Кумаром Р., Пэтелем Ч.М., Яна А.К. [24], Чибве Д.К. [25] и рядом других исследователей к настоящему времени разработаны алгоритмы, обеспечивающие возможность определения последовательности выхода отдельных компонентов из бункера и их массового соотношения в потоке. В комплексе с математическими моделями движения шихтовых материалов по лотку БЗУ, в колошниковом пространстве и распределения их на поверхности засыпи в печи модели этого класса могут обеспечить получение характеристик распределения компонентов шихты по радиусу колошника. Содержание компонентов в выходном потоке шихтовых материалов из бункера БЗУ может быть получено при помощи математических моделей (разработанных Накано К., Исеи И., Сунахара К. [26, 27] в сотрудничестве с коллегами), основанных на разделении всего объема шихты в бункере на массивы, для которых задается определенная последовательность выхода этих массивов из бункера, многократно подтвержденная экспериментально.

Представленная работа отличается от выполненных ранее обоснованием возможности и решением задачи получения расчетных зависимостей для оценки характеристик распределения компонентов железорудной и углеродсодержащей частей шихты, которые характеризуют состав смесей, формирующихся в различных зонах колошника.

Целью работы является получение расчетных зависимостей, обеспечивающих возможность определения показателей распределения компонентов шихты в различных сечениях доменной печи.

II. МЕТОДЫ И РЕЗУЛЬТАТЫ РЕШЕНИЯ

Процесс формирования порций шихтовых материалов современной доменной печи, оснащенной БЗУ, сводится к реализации заданной структуры порции, которая определяет распределение масс компонентов по ее объему на конвейере или в скипах. В состав железорудных смешанных порций, как правило, входят агломерат, окатыши, а также добавки различного назначения. В настоящей работе возможность получения расчетных зависимостей для определения показателей распределения компонентов доменной шихты по радиусу колошника доменной печи показана на примере распределения окатышей, загружаемых в составе железорудной порции.

Варьирование расположения дозы окатышей в объеме железорудных смешанных порций является инструментом, при помощи которого решается ряд технологических задач, в частности, обеспечение требуемых свойств расплавов в пристеночной зоне печи для формирования самообновляющегося гарнисажного слоя, снижения интенсивности износа футеровки и предотвращения прогара фурм.

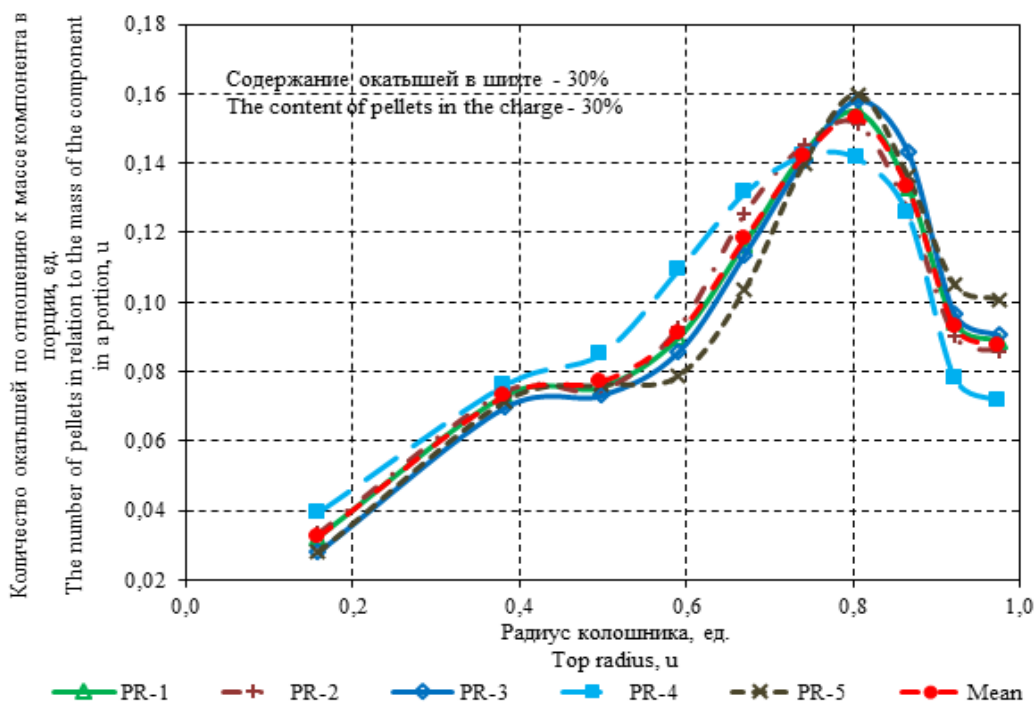
В системах загрузки с конвейерной доставкой шихты на колошник изменение расположения дозы окатышей в объеме порции достигается изменением величины уставки начала выгрузки окатышей на главный конвейер. Эта уставка в системе загрузки с конвейерной доставкой шихты на колошник задается в виде значения массы шихтовых материалов, которая должна быть загружена в бункер БЗУ до начала загрузки в него дозы окатышей.

С целью получения расчетных зависимостей для определения содержания окатышей в различных кольцевых зонах колошника, оценки характера распределения окатышей и возможностей управления их распределением в системах загрузки с конвейерной доставкой шихты на колошник выполнено математическое моделирование процесса загрузки и распределения шихтовых материалов на доменной печи объемом 5000 м³ при изменении массы дозы окатышей от 11 т до 77 т и перемещении этой дозы в объеме железорудной порции массой 110 т с шагом 10 т. Оценка характеристик распределения окатышей по радиусу колошника осуществлялась путем

определения относительного содержания этого компонента в 10 равных по площади кольцевых зонах колошника. В процессе моделирования варьировались пять различных видов программ распределения (PR - 1, PR - 2, PR - 3, PR - 4, PR - 5) масс порций рабочих подач, то есть, порций, формирующих распределение рудной нагрузки в цикле загрузки, исключая подачи специального назначения (промывочные подачи, подачи, предназначенные для активизации осевого газового потока и т. д.). Используемые при моделировании программы распределения масс порций рабочих подач отличались, в первую очередь, различным количеством угловых положений лотка БЗУ, задействованных при выгрузке порций, а также количеством шихтовых материалов, выгружаемых в этих положениях, что, в конечном итоге, выражалось в различиях распределения рудных нагрузок по радиусу колошника. Вместе с тем, используемые программы распределения порций шихты обеспечивали реализацию технологических требований к

распределению рудных нагрузок для работы доменной печи в штатном режиме.

На основе результатов математического моделирования была получена многомерная матрица значений содержания окатышей в десяти кольцевых зонах доменной печи в зависимости от вида программы распределения, среднего радиуса зоны, содержания окатышей в шихте и уставки начала выгрузки окатышей на главный конвейер. Анализ полученной матрицы показал, что в рабочем диапазоне значений содержания окатышей в шихте (20 – 50%) и величины уставки начала выгрузки окатышей на главный конвейер (20 – 50% массы порции) влияние программы распределения масс порций рабочих подач можно считать незначительным. В качестве примера на рисунке 1 показано изменение содержания окатышей в кольцевых зонах колошника при различных программах загрузки, фиксированных значениях содержания окатышей в шихте и величины уставки начала выгрузки окатышей.



PR - 1 ÷ PR - 5 – программы распределения масс порций шихтовых материалов.

Рис. 1. Распределение окатышей по радиусу колошника при различных программах загрузки (величина уставки начала выгрузки окатышей на конвейер – 30% массы железорудной порции).

PR - 1 ÷ PR - 5 – programs for distributing the masses of portions of charge materials.

Fig. 1. Distribution of pellets along the radius of the top at various loading programs (the setpoint value for the start of pellet unloading onto the conveyor is 30% of the weight of the iron ore portion).

Выявленная особенность формирования распределения компонентов смешанных железорудных порций - относительно малое влияние программы загрузки на параметры их распределения - позволила сократить число аргументов зависимостей, определяющих содержание окатышей в заданной кольцевой зоне колошника, исключив программы распределения порций без существенной потери точности расчетов, с использованием средних значений матрицы, полученных

методом математического моделирования процесса загрузки шихтовых материалов с использованием различных программ распределения масс порций рабочих подач.

Содержание окатышей в шихте и величина уставки начала выгрузки дозы окатышей на конвейер оказывают определяющее влияние на формирование состава смеси основных железорудных материалов в конкретной кольцевой зоне колошника. Влияние этих параметров показано на рисунках 2 и 3.

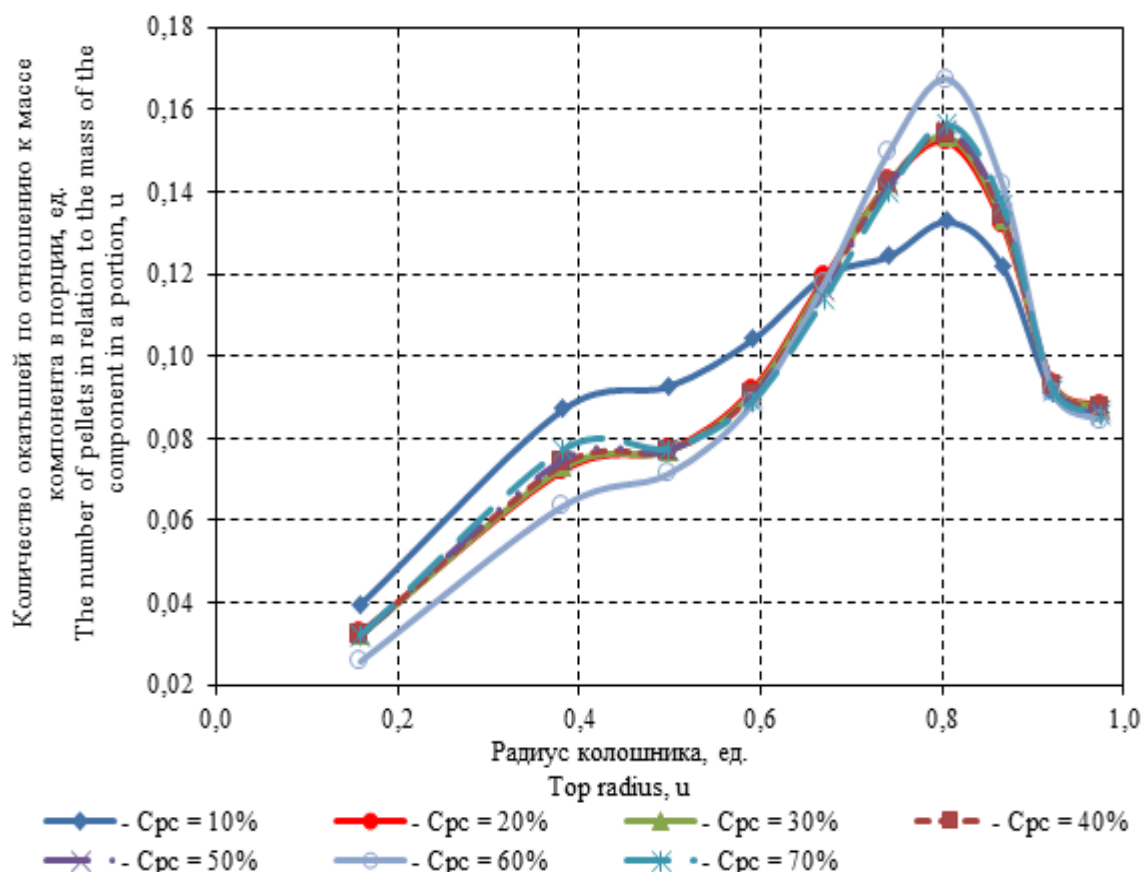


Рис. 2. Распределение окатышей по радиусу колошника в зависимости от содержания окатышей в шихте C_{pc} (величина уставки начала выгрузки окатышей на конвейер – 30% массы железорудной порции).

Fig. 2. Distribution of pellets along the radius of the top depending on the content of pellets in the charge C_{pc} (setting value for the beginning of pellet unloading onto the conveyor is 30% of the weight of the iron ore portion).

В процессе анализа матрицы значений содержания окатышей в кольцевых зонах колошника при различных параметрах формирования порций и их распределения, полученных при помощи комплексной модели процесса загрузки, было установлено, что с достаточно высоким коэффициентом достоверности аппроксимации (0,944), зависимость количества окатышей от

координаты средней линии рассматриваемой зоны вида $C_{pi} = f(r_i)$ может быть представлена кубической функцией

$$C_{pi} = A \cdot r_i^3 + B \cdot r_i^2 + C \cdot r + D, \quad (1)$$

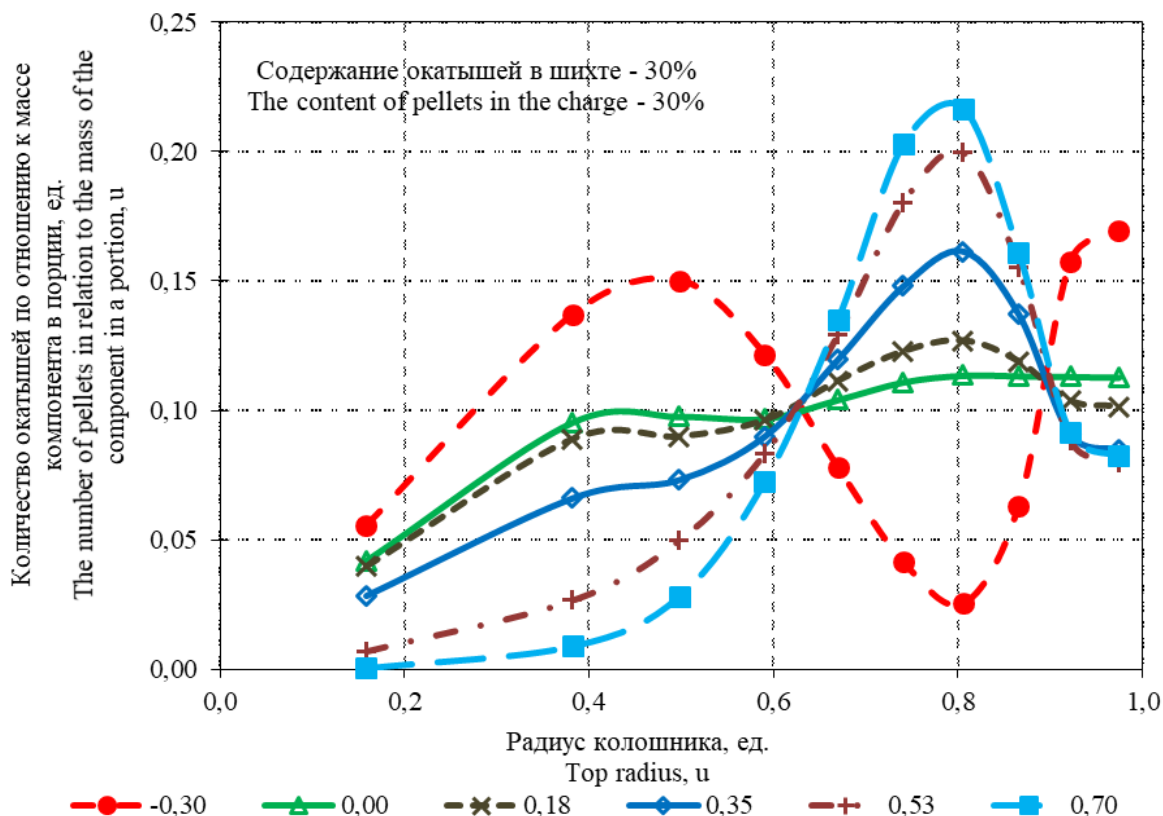
где C_{pi} – относительное (относительно массы дозы окатышей в порции) содержание окатышей в рассматриваемой точке радиуса

колошника доменной печи с конвейерной доставкой шихты на колошник, ед.;

A, B, C, D – численные коэффициенты.

При этом, очевидно, что значения коэффициентов уравнения (1) A, B, C и D

должны учитывать влияние содержания окатышей в шихте и величины уставки начала выгрузки дозы окатышей на конвейер.



- 0.30 ÷ 0.70 – относительная величина уставки начала выгрузки дозы окатышей на конвейер (по отношению к массе порции).

- 0.30 ÷ 0.70 – the relative value of the setting for the start of unloading the dose of pellets onto the conveyor (in relation to the mass of the portion).

Рисунок 3 – Распределение окатышей по радиусу колошника в зависимости от уставки начала выгрузки дозы окатышей на конвейер.

Fig. 3. The distribution of pellets along the radius of the top, depending on the setting for the start of unloading the dose of pellets onto the conveyor.

Анализ значений коэффициентов A, B, C и D позволил установить их зависимость от величины уставки начала выгрузки дозы окатышей на конвейер в виде линейной функции с коэффициентом достоверности аппроксимации не менее 0,924.

$$A_j = a_A \cdot m_{spj} + b_A, \quad (2)$$

$$B_j = a_B \cdot m_{spj} + b_B, \quad (3)$$

$$C_j = a_C \cdot m_{spj} + b_C, \quad (4)$$

$$D_j = a_D \cdot m_{spj} + b_D \quad (5)$$

где $a_A, b_A, a_B, b_B, a_C, b_C, a_D, b_D$ – численные коэффициенты функций аппроксимации.

Далее, по результатам анализа значений коэффициентов $a_A, b_A, a_B, b_B, a_C, b_C, a_D, b_D$ и их связи с содержанием окатышей в шихте было установлено, что эта связь с достаточно высокой степенью точности может быть выражена линейной функцией (коэффициент достоверности аппроксимации составлял не менее 0,95). Связь коэффициентов $a_A, b_A, a_B, b_B, a_C, b_C, a_D$ и b_D с общим содержанием окатышей в порции может представлена в виде уравнений

$$a_A = a_{a_A} \cdot C_{pc} + b_{a_A}, \quad (6)$$

$$b_A = a_{b_A} \cdot C_{pc} + b_{b_A}, \quad (7)$$

$$a_B = a_{a_B} \cdot C_{pc} + b_{a_B}, \quad (8)$$

$$b_B = a_{b_B} \cdot C_{pc} + b_{b_B}, \quad (9)$$

$$a_c = a_{a_c} \cdot C_{pc} + b_{a_c}, \quad (10)$$

$$b_B = a_{b_c} \cdot C_{pc} + b_{b_c}, \quad (11)$$

$$a_D = a_{a_D} \cdot C_{pc} + b_{a_D}, \quad (12)$$

$$b_D = a_{b_D} \cdot C_{pc} + b_{b_D}, \quad (13)$$

где $a_{a_A}, b_{a_A}, a_{b_A}, b_{b_A}, a_{a_B}, b_{a_B}, a_{b_B}, b_{b_B}, a_{a_c}, b_{a_c}, a_{b_c}, b_{b_c}, a_{a_D}, b_{a_D}, a_{b_D}, b_{b_D}$ – коэффициенты линий аппроксимации линейной функции, описывающей изменение коэффициентов кубического уравнения для определения содержания окатышей в зонах печи в зависимости от содержания окатышей в порции.

В окончательном виде формула (1) для определения содержания окатышей в заданной кольцевой зоне колошника с учетом всех введенных коэффициентов выглядит следующим образом

$$C_{p_i} = \left[(a_{a_A} \cdot C_{pc} + b_{a_A}) \cdot m_{sp_j} + (a_{b_A} \cdot C_{pc} + b_{b_A}) \right] \cdot r_i^3 + \left[(a_{a_B} \cdot C_{pc} + b_{a_B}) \cdot m_{sp_j} + (a_{b_B} \cdot C_{pc} + b_{b_B}) \right] \cdot r_i^2 + \left[(a_{a_c} \cdot C_{pc} + b_{a_c}) \cdot m_{sp_j} + (a_{b_c} \cdot C_{pc} + b_{b_c}) \right] \cdot r_i + \left[(a_{a_D} \cdot C_{pc} + b_{a_D}) \cdot m_{sp_j} + (a_{b_D} \cdot C_{pc} + b_{b_D}) \right] \quad (14)$$

Коэффициент достоверности аппроксимации распределения окатышей с помощью функции трех аргументов достаточно высок и составляет 0,919.

III. ОБСУЖДЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ

Сравнение результатов определения характеристик распределения окатышей с помощью комплексной модели с результатами расчета с использованием выражения (14), показало, что погрешность определения относительного содержания окатышей в рассматриваемой кольцевой зоне колошника при помощи предложенного выражения, в среднем, составляет $\pm 0,03$ ед., при среднеквадратическом отклонении 0,01 ед. Указанный уровень погрешности позволяет

использовать упрощенные зависимости расчета показателей распределения окатышей по радиусу колошника для оценки характера их распределения и влияния на него изменений параметров формирования железорудных порций.

Аналогичные уравнения получены для оценки характеристик распределения других компонентов шихты: агломерата и добавок различного назначения. Использование полученных зависимостей дает возможность исследователям и технологам получить оценку влияния параметров режима загрузки на распределение компонентов шихты по радиусу колошника без выполнения трудоемкой процедуры математического моделирования процесса, определить состав смесей шихтовых материалов в различных зонах доменной печи, что, свою очередь, позволяет оценить состав и свойства образующихся расплавов и внести необходимые корректировки в применяемые режимы плавки для получения требуемых ее технико – экономических показателей.

IV. ВЫВОДЫ

Показано, что распределение массы конкретного компонента шихты по радиусу колошника доменной печи с БЗУ и конвейерной доставкой шихты на колошник с достаточной для практики точностью может быть описано уравнением третьей степени, включающим основные параметры формирования многокомпонентных порций – содержание компонента в шихте и величину уставки начала его выгрузки на конвейер.

Получены зависимости для определения характеристик распределения шихтовых материалов в различных зонах доменной печи, которые без трудоемкого математического моделирования обеспечивают возможность оперативной оценки параметров распределения компонентов шихты с приемлемой для практики точностью.

Предложено использовать полученные зависимости в качестве расчетного инструмента для оперативной оценки распределения компонентов шихты на колошнике, что позволит осуществлять обоснованный выбор рациональных параметров режимов загрузки многокомпонентной шихты в доменную печь с реализацией наиболее экономичных технологических режимов плавки, обеспечивающих снижение энергозатрат на

производство чугуна и его себестоимости, а также повышение энергоэффективности металлургического передела в целом.

References

- [1] Bol'shakov V.I. *Tekhnologiya vysokoeffektivnoy energosberegayushchey domennoy plavki*. [High-efficiency energy-saving blast smelting technology]. Kiev, 2007. 412 p.
- [2] Dobroskok V.A. Spetsial'nye sistemy zagruzki domennykh pechey [Special loading systems for blast furnaces]. *Chyornye metally - Steel and iron*, 2007, no. 9, pp. 13–21. (In Russian).
- [3] Bukhval'der J., Dobroskok V.A., Lonardi E., Goffin R., Tillen G., Kyoler S. Sovremennye tekhnologii zagruzki domennykh pechey [Modern blast furnace loading systems]. *Chyornye metally - Steel and iron*, 2008, no. 9, pp. 21–25. (In Russian).
- [4] Shepetovskiy E.A. Ratsional'noe formirovanie stolba shikhty v domennoy pechi [Rational formation of charge column in a blast furnace]. *Stal' – Steel*, 2003, no. 5, pp. 11–15. (In Russian).
- [5] Nikitin L.D., Dolinskiy V.A., Bugayov S.F., Mar'yasov M.F., Denisov Yu.M., Chudnova N.T., Fyodorov I.P. Formirovanie racional'noj struktury stolba shihtovykh materialov v domennoy pechi [Formation of a rational structure of a column of charged materials in a blast furnace]. *Metallurg - Metallurgist*, 2004, no.2, pp. 26–28. (In Russian).
- [6] Yaroshevskiy S.L., Nozdrachev V.A., Chebotareyov A.P., Rudenko V.A., Feshchenko S.A., Kuznetsov A.M., Padalka V.P., Hlaponin N.S., Kuzin A.V. Effektivnost' ispol'zovaniya koksa fraktsii menee 40 mm v domennoy plavke [Efficiency of using coke fraction less than 40 mm in blast-furnace smelting]. *Metallurg - Metallurgist*, 2000, no.12, pp. 32–35. (In Russian).
- [7] Litvinov L.F., Yaroshevskiy S.L., Kuznetsov A.M., Padalka V.P., Hlaponin N.S., Kuzin A.V. Effektivnost' tekhnologii domennoy plavki pri zagruzke v pech' koksovogo oreshka v smesi s zhelezorudnoy shihtoy [Efficiency of using coke fraction less than 40 mm in blast-furnace smelting]. *Metall i lit'yo Ukrainy - Metal and casting of Ukraine*, 2004, no.12, pp. 5–9. (In Russian).
- [8] Gupta P.K., Rao A. S., Sekhar V.R., Ranjan M. and Naha T.K. Burden distribution control and its optimization under high pellet operation. *Ironmaking & Steelmaking*, 2010, vol. 37, pp. 235-239.
- [9] Fojtik D., Tuma J., Faruzel P. Computer modelling of burden distribution in the blast furnace equipped by a bell-less top charging system. *Ironmaking & Steelmaking*, 2021, vol. 48, pp. 1226-1238. <https://doi.org/10.1080/03019233.2021.1952829>
- [10] Li, M.; Wei, H.; Ge, Y.; Xiao, G.; Yu, Y. A Mathematical Model Combined with Radar Data for Bell-Less Charging of a Blast Furnace. *Processes*, 2020, 8, 239. <https://doi.org/10.3390/pr8020239>
- [11] Saxen H., Helle M., Li H. (2019). Mathematical model of burden distribution in the blast furnace. In F. Kongoli, P. Assis, M.C. Gomez-Marroquin, S. Kitayama, H. Konishi, A. Murao, S. Nomura, H. Ono, H. Saxen, K. Seto, J.I. Tani Eds.), *Sustainable Industrial Processing Summit (SIPS)*, 2019, vol. 8: *Usui Intl. Symp. / Advanced Sustainable Iron and Steel Making* (pp. 243-248). Montreal, Canada:
- [12] Hinnelä J., Saxén H., Pettersson F. A Modeling of the Blast Furnace Burden Distribution by Evolving Neural Networks. *Ind. Eng. Chem. Res.*, 2003, vol. 42, no. 11, pp. 2314–2323. Publication Date: April 29, 2003. <https://doi.org/10.1021/ie0203779>.
- [13] Park J.I., Jung J.H., Jo M.K., Oh H.S., Han J.W. Mathematical modeling of the burden distribution in the blast furnace shaft. *Publication: Metals and Materials International*, 2011, vol. 17 (3), pp. 485-496.
- [14] Shi P.Y., Zhou P., Fu D., Zhou C.Q. Mathematical model for burden distribution in blast furnace. *Iron-making & Steelmaking*, 2016, vol. 43:1, pp. 74-81. DOI:10.1179/1743281215Y.0000000052
- [15] Chen J., Zuo H., Xue Q., Wang J. A review of burden distribution models of blast furnace. *Powder Technology*, December, 2021. DOI:10.1016/j.powtec.2021.117055
- [16] Nag S., Gupta A., Paul S., Gavel D. J., B. Aich, Prediction of Heap Shape in Blast Furnace Burden Distribution, *ISIJ International*, 2014, vol. 54, pp. 1517-1520.
- [17] Agrawal A. Blast Furnace Performance Under Varying Pellet Proportion. *Trans. Indian Inst. Met.*, 2019, vol. 72, pp. 777–787. doi: 10.1007/s12666-018-1530-6.
- [18] Mitra T. *Modeling of Burden Distribution in the Blast Furnace*. Doctor of Technology Thesis. Thermal and Flow Engineering Laboratory Faculty of Science and Engineering Åbo Akademi University. Turku/Abo, Finland, 2016. 89 p.
- [19] Li Z., Kuang S., Liu S., Gan J., Yu A., Li Y., Mao X. Numerical investigation of burden distribution in ironmaking blast furnace. *Powder Technol.*, 2019, vol. 353, pp. 385–397. doi: 10.1016/j.powtec.2019.05.047.
- [20] Yu X., Shen Y. Model study of central coke charging on ironmaking blast furnace performance: Effects of charring pattern and nut coke. *Powder Technol.*, 2020, vol. 361, pp. 124–135. doi:10.1016/j.powtec.2019.10.012
- [21] Kashihara Y., Iwai Y., Ishiwata N., Oyama N., Matsuno H., Horikoshi H., Yamamoto K., Kuwabara M. Development of New Charging Technique for Mixing Coke in Ore Layer at Blast Furnace with Center Feed Type Bell-less Top. *ISIJ International*, 2017, vol. 57, no. 4, pp. 665–672.
- [22] Matsui Y., Sato A., Oyama T., Matsuo T. All Pellets Operation in Kobe No. 3 Blast Furnace under Intensive Coal Injection. *ISIJ International*, January 2003, vol. 43 (2), pp. 166-174. DOI:10.2355/isijinternational.43.166
- [23] Mio H., Kadowaki M., Matsuzaki S., Kunitomo K. Development of particle flow simulator in the

- charging process of blast furnace by discrete element method. *Minerals Engineering*, 2012, vol. 33, pp. 27-33.
- [24] Kumar R., Patel C.M., Jana A.K., Gopireddy S.R. Prediction of hopper discharge rate using combined discrete element method and artificial neural network. *Advanced Powder Technology*, 2018, vol. 29 (11), pp. 2822-2834.
<https://doi.org/10.1016/j.apt.2018.08/002>
- [25] Chibwe D. K. *Optimized burden delivery for blast furnace operations*. A thesis submitted in fulfillment of the requirements for the Degree of doctor of philosophy. Faculty of Engineering and Built Environment at The University of Newcastle. Newcastle, Australia, 2019. 295 p.
- [26] Nakano K., Isei Y., Natsui T., Watanabe K., Kishino T. Technical Report Tracking Technique of Burden Materials for Blast Furnace with Bell-less Top by Using RFID. *Nippon Steel technical report*, March 2020, no. 123, pp. 83-89.
- [27] Nakano K., Sunahara K., Inada T. Advanced Supporting System for Burden Distribution Control at Blast Furnace Top. *ISIJ International*, 2010, vol. 50, no. 7, pp. 994-999.

Сведения об авторах.



Иванча Николай Григорьевич, старший научный сотрудник отдела технологического оборудования и систем управления Института черной металлургии Национальной академии наук Украины
 E-mail: ing.witc@gmail.com



Вишняков Валерий Иванович, научный сотрудник отдела технологического оборудования и систем управления Института черной металлургии Национальной академии наук Украины
 E-mail: vishnyakov.v.i.0705@gmail.com



Муравьева Ирина Геннадьевна, д.т.н., старший научный сотрудник отдела технологического оборудования и систем управления Института черной металлургии Национальной академии наук Украины
 E-mail: irinamuravyova@gmail.com



Щербачев Вадим Родионович, ведущий инженер отдела технологического оборудования и систем управления Института черной металлургии Национальной академии наук Украины
 E-mail: vadim0072vadim@gmail.com



Ермолина Екатерина Петровна, ведущий инженер отдела технологического оборудования и систем управления Института черной металлургии Национальной академии наук Украины
 E-mail: ketrinerm11@gmail.com