

УДК 669.162.212

## КОМПЛЕКСНАЯ МАТЕМАТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ РАСПРЕДЕЛЕНИЯ МНОГОКОМПОНЕНТНОЙ ШИХТЫ В ДОМЕННОЙ ПЕЧИ

© **Иванча Николай Григорьевич** (itecon.05@gmail.com);

**Муравьева Ирина Геннадиевна**, д-р техн. наук (irinamuravyova@gmail.com);

**Шумельчик Евгений Игоревич**, канд. техн. наук (ievgen.shumelchik@gmail.com);

**Вишняков Валерий Иванович** (vishnyakov.v.i.0705@gmail.com);

**Семенов Юрий Станиславович**, канд. техн. наук (yuriy.semenov.isi@gmail.com)

Институт черной металлургии им. З.И.Некрасова НАН Украины (ИЧМ). Украина, г. Днепр

Статья поступила 05.10.2017 г.

Представлены результаты разработки комплексной математической модели формирования многокомпонентных порций шихтовых материалов, их загрузки в бункер БЗУ, выгрузки из бункера и распределения на поверхности засыпи и показаны технологические возможности ее применения. Результаты математического моделирования могут быть использованы для усовершенствования применяемых режимов загрузки и их корректировки при вводе в шихту новых компонентов. Показано, что использование математической модели обеспечивает возможность обоснованного выбора рациональных параметров режима загрузки многокомпонентной шихты и снижает уровень риска принятия неэффективных решений.

**Ключевые слова:** доменная печь; доменная плавка; математическая модель; шихтовые материалы; программа загрузки; БЗУ; рудная нагрузка; многокомпонентная шихта; скиповая загрузка; конвейерная загрузка; поверхность засыпи; окатыши; агломерат; кокс; гарнисаж.

Рациональное распределение шихтовых материалов в доменной печи (ДП), в полной мере соответствующее параметрам теплового, дутьевого и шлакового режимов и текущему состоянию доменной плавки в целом – задача, которая остается актуальной как для технологов-практиков, так и для исследователей [1, 2]. Более того, с совершенствованием технологии и интенсификацией доменной плавки задача эта непрерывно усложняется, поэтому необходимо рассматривать новые аспекты технологии. Рациональное распределение железорудных материалов и кокса по сечению ДП обеспечивает не только эффективное распределение газового потока. Поскольку железорудная часть шихты на большинстве ДП включает не менее трех–четырёх компонентов, их распределение во многом определяет развитие процессов восстановления и плавления шихты, шлакообразования, формирования гарнисажа, а также влияет на стойкость футеровки, обеспечение и поддержание требуемой дренажной способности горна. Помимо различных топливных, железосодержащих, флюсующих, гарнисажеобразующих и промывочных добавок в состав шихты ДП могут входить по два и более видов кокса и железорудных материалов. Многокомпонентность шихты, вызванная в основном истощением запасов природного минерального сырья и

связанным с этим ухудшением качества сырья и топлива, увеличением количества используемых вторичных ресурсов, является одной из наиболее сложных проблем, с которой сталкиваются технологи-доменщики в последнее время. Нивелирование негативных последствий проблемы многокомпонентности шихты для доменной плавки может быть достигнуто при наличии средств и методов контроля распределения всех компонентов (кокса, агломерата, окатышей и добавок), а также технологических приемов и способов их загрузки с учетом свойств и особенностей поведения в процессе доменной плавки.

В процессе формирования многокомпонентных порций и их загрузки в ДП в результате неоднократных перегрузок расположение компонентов в объеме порции существенно изменяется, компоненты смешиваются, образуются массивы несмешанных материалов и смесей различного состава. Вследствие перераспределения компонентов в объеме порции последовательность выгрузки компонентов из бункера бесконусного загрузочного устройства (БЗУ) существенно отличается от последовательности их загрузки в бункер. В связи с этим текущий компонентный состав выходного потока шихты, поступающей из бункера на распределительный лоток, не определен, что существенно снижает информативность и технологическую

ценность расчетов распределения шихтовых материалов в ДП. Вместе с тем, формирование параметров распределения компонентов на поверхности засыпи осуществляется на всех стадиях формирования порций шихтовых материалов, доставки их на колошник и выгрузки в печь. В зависимости от способа доставки шихты на колошник формирование порций шихтовых материалов осуществляется путем выгрузки компонентов шихты в определенной последовательности и с заданным распределением масс компонентов на конвейере или в скипах, в соответствии с технологическими требованиями к структуре порции. Эти требования должны содержать параметры, на основе которых однозначно определяется распределение компонентов по объему порции.

В настоящее время инструментальных средств, обеспечивающих контроль и определение характеристик распределения каждого из компонентов шихты на колошнике, не существует. В связи с этим для решения указанной задачи в ИЧМ разработана комплексная математическая модель формирования многокомпонентных порций шихтовых материалов, их загрузки в бункер БЗУ, выгрузки из бункера и распределения на поверхности засыпи. Модель обеспечивает определение текущего компонентного состава потока, формирующегося при выгрузке многокомпонентных порций из бункера БЗУ, и полного состава смесей компонентов шихты в различных кольцевых зонах колошника. Математическое и алгоритмическое обеспечение модели разработано на основе установленных фундаментальных зависимостей истечения шихтовых материалов из бункеров [3–11] и движения их по тракту БЗУ [1, 2, 12–14], а также результатов многочисленных экспериментальных исследований, выполненных ИЧМ на объектах доменного производства в промышленных условиях [1, 2, 12–16]. В зависимости от компонентного состава порций шихты и их структуры в процессе моделирования выгрузки порций из бункера БЗУ используются закономерности «гидравлического» или «нормального» видов истечения сыпучих материалов либо их комбинации. Определение характеристик распределения компонентов шихты на колошнике ДП включает также математическое моделирование процессов движения потока шихтовых материалов по тракту БЗУ (движение материалов в центральной трубе, падение на лоток, движение по лотковому распределителю), а также их движения в колошниковом пространстве и формирования слоев на поверхности засыпи.

*Исходные данные комплексной модели:* структура цикла загрузки (цикла подач); состав и структура порций шихтовых материалов; заданное распределение масс порций по позициям лотка; скорость схода шихты; характеристики компонентов шихты (углы откоса, насыпная масса); исходный профиль засыпи; ширина потока шихты; время выгрузки материалов; уровень засыпи.

*Выходные данные* – показатели распределения шихтовых материалов в кольцевых зонах колошника: масс и объемов компонентов шихты (с учетом вытеснения кокса); рудных нагрузок; масс компонентов шихты в кольцевых зонах колошника с привязкой к угловым позициям лотка. Результаты моделирования визуализируются в виде изображений профилей поверхности засыпи и слоев шихтовых материалов, таблиц и графиков показателей распределения шихтовых материалов.

Модель предназначена для применения на ДП с БЗУ (для печей с конусными загрузочными устройствами модель находится в завершающей стадии разработки), оснащенных скиповыми и конвейерными системами шихтоподачи (рис. 1).

В модели учтено влияние комплекса процессов перемещения массивов шихтовых материалов и смешивания компонентов в процессе движения и перегрузок многокомпонентных порций шихты, начиная со стадии выгрузки их на доменный конвейер или загрузки в скипы до выгрузки на поверхность засыпи, на формирование характеристик распределения компонентов шихты в ДП, включая перераспределение компонентов в объеме скипа при повороте его в разгрузочных кривых (рис. 2).

На рис. 3 показан результат расчета распределения рудной нагрузки и последующей его корректировки, а на рис. 4 и 5 приведены результаты расчетов, выполненных с помощью комплексной математической модели, которые показывают влияние параметров формирования смешанных порций на распределение основных железорудных компонентов шихты и добавок различного назначения.

Фрагмент интерфейса комплексной математической модели формирования многокомпонентных порций шихтовых материалов, их загрузки в бункер БЗУ, выгрузки из бункера и распределения на поверхности засыпи показан на рис. 6.

Разработанная математическая модель содержит базы данных конструктивных параметров ДП, загрузочных устройств различного типа, скипов, а также базы данных режимов загрузки и

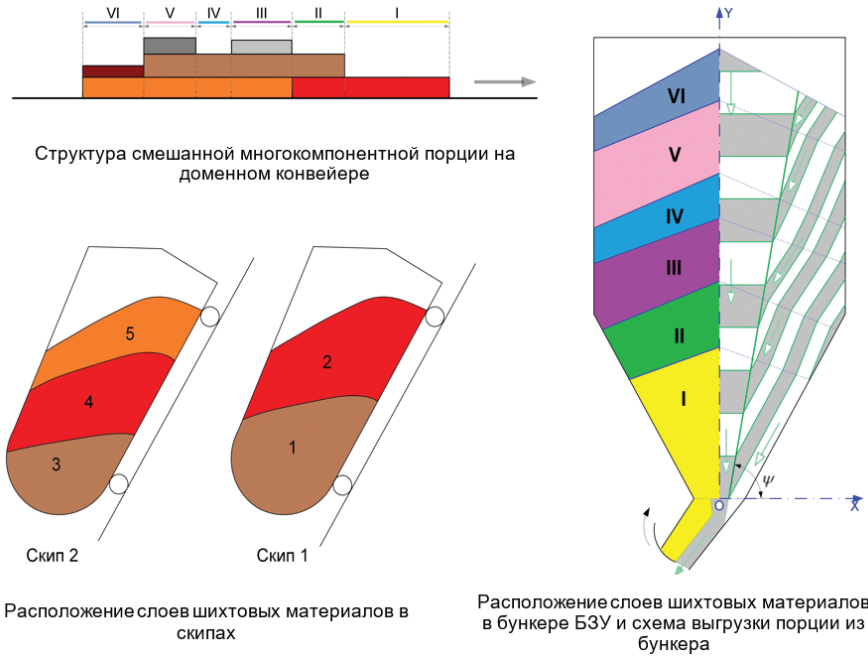


Рис. 1. Расчетные схемы формирования многокомпонентных порций шихтовых материалов, их загрузки в бункер БЗУ и выгрузки из бункера

характеристик шихтовых материалов. Предусматривается возможность ввода различных скоростей схода шихты в кольцевых зонах колошника при наличии профиломера на ДП. Один из наиболее важных результатов, который может быть получен с помощью модели, – количественная оценка массы каждого компонента шихты, поступающей в рассматриваемую кольцевую зону при выгрузке шихтовых материалов в задействованном угловом положении лотка БЗУ, и конечный состав смеси компонентов шихты в каждой зоне колошника. Это позволяет анализировать влияние количественных характеристик применяемой программы загрузки шихтовых материалов на показатели распределения отдельных компонентов как железорудной, так и топливной частей шихты, а также рудной нагрузки. Кроме того, это создает возможность выбора и корректировки программы на основе результатов прогнозных расчетов до ввода ее в систему управления загрузкой, что значительно уменьшает продолжительность раз-

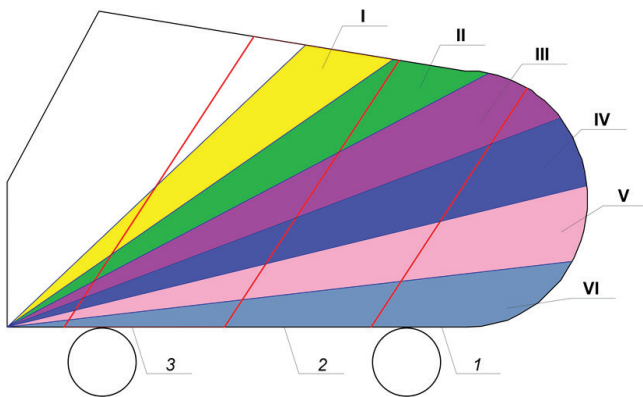


Рис. 2. Условная схема послойной разбивки объема шихтовых материалов в скипе при загрузке его в скиповой яме и выгрузке в бункер БЗУ

время загрузки шихтовых материалов на показатели распределения отдельных компонентов как железорудной, так и топливной частей шихты, а также рудной нагрузки. Кроме того, это создает возможность выбора и корректировки программы на основе результатов прогнозных расчетов до ввода ее в систему управления загрузкой, что значительно уменьшает продолжительность раз-

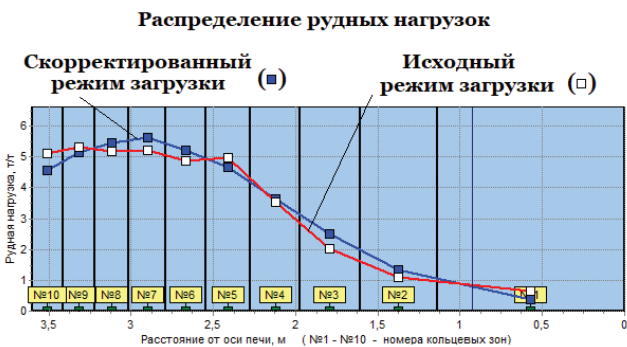
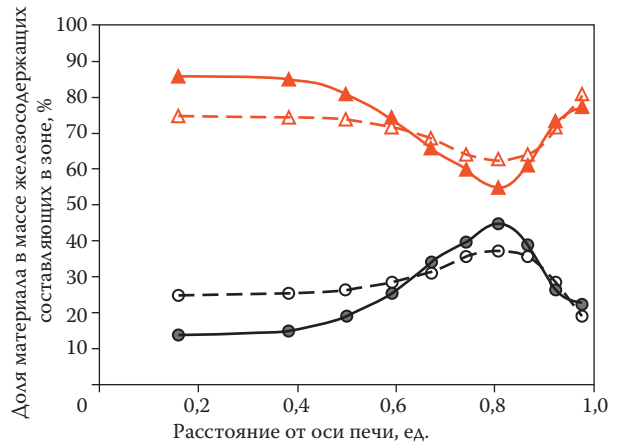


Рис. 3. Распределение рудной нагрузки по радиусу колошника



- Окатыши (система загрузки с конвейерной доставкой шихты на колошник)
- Окатыши (система загрузки со скиповой доставкой шихты на колошник)
- ▲ Агломерат (система загрузки с конвейерной доставкой шихты на колошник)
- △ Агломерат (система загрузки со скиповой доставкой шихты на колошник)

Рис. 4. Распределение агломерата и окатышей по радиусу колошника

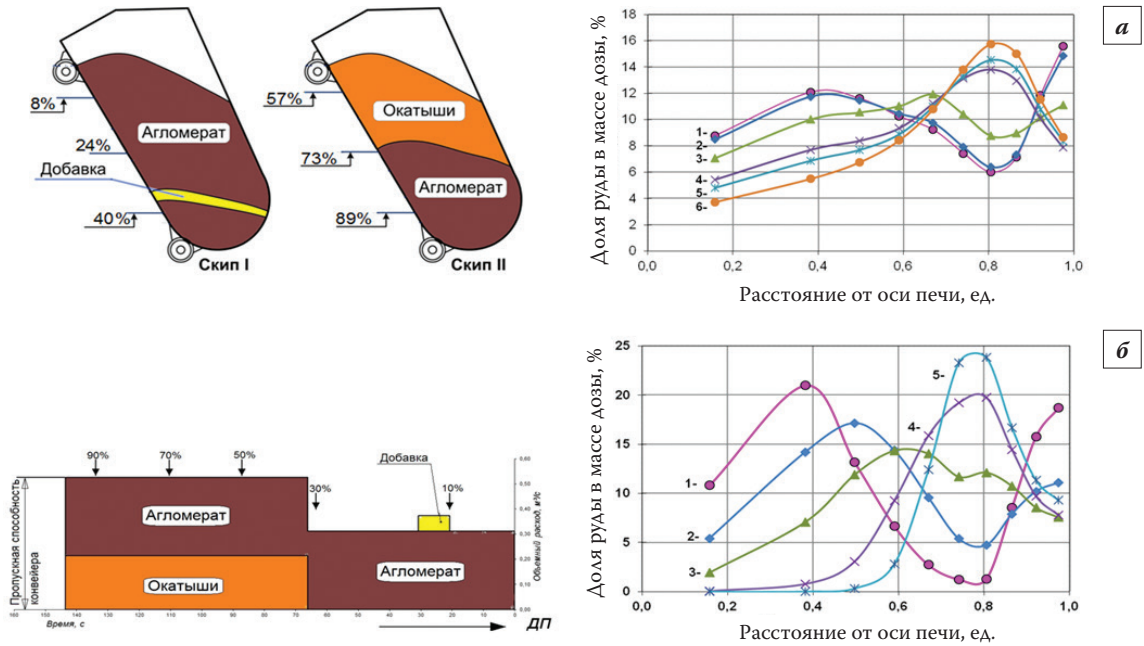


Рис. 5. Влияние расположения дозы добавок в объеме порции на их распределение по радиусу колошника: а – система загрузки со скиповой доставкой шихты на колошник; 1–6 – индексы расположения дозы добавок в скипах железорудной порции подачи вида РР↓КК↓ (шаг изменения расположения дозы добавок – 16...17% от массы порции); б – система загрузки с конвейерной доставкой шихты на колошник; 1–5 – индексы расположения дозы добавок в железорудной порции на конвейере (шаг изменения расположения дозы добавок – 20% от массы порции)

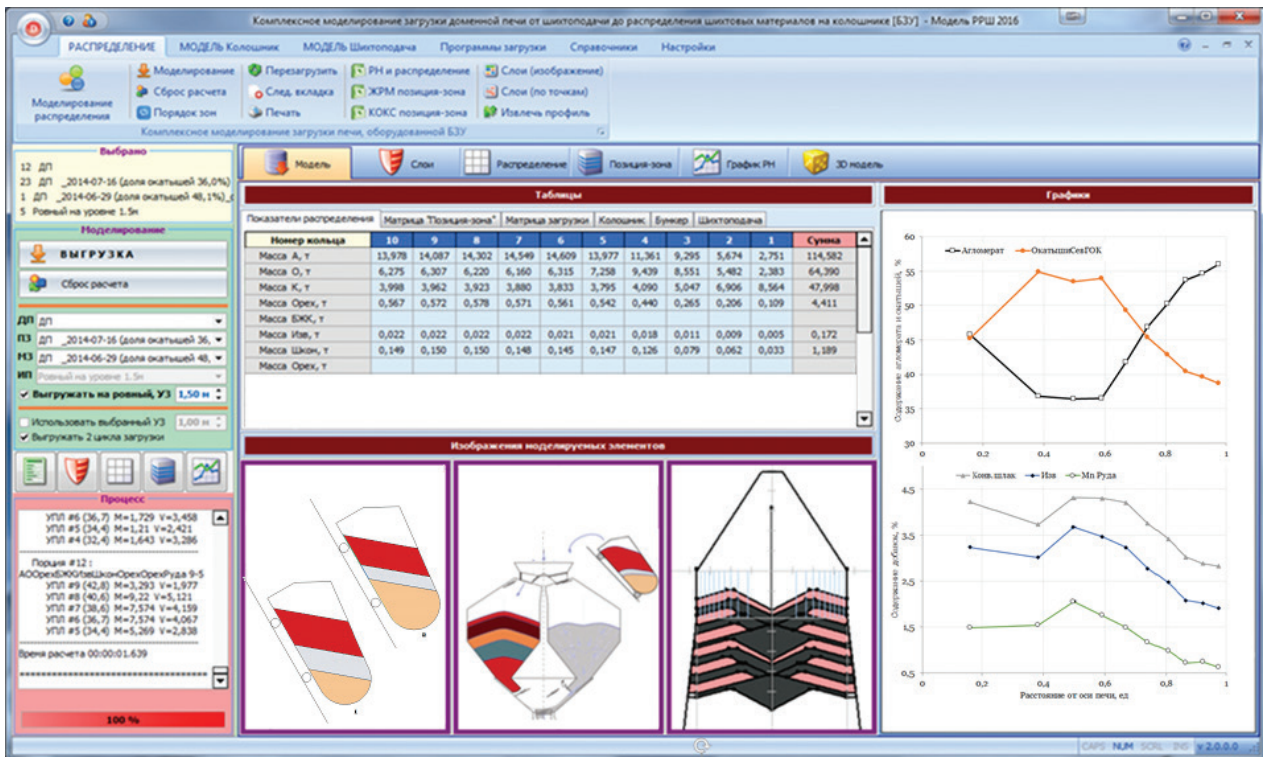


Рис. 6. Фрагмент интерфейса комплексной математической модели формирования многокомпонентных порций шихтовых материалов, их загрузки в бункер БЗУ, выгрузки из бункера и распределения на поверхности засыпи (система со скиповой доставкой шихты на колошник)

работки рациональных программ распределения шихты и снижает уровень риска принятия неэффективных решений.

Расчетный состав смеси компонентов шихты в заданной зоне колошника является исходной информацией для получения прогнозной оценки

свойств образующихся расплавов (содержание FeO, вязкость и др.). Сопоставление прогнозных свойств расплавов с характеристиками, заданными технологическими требованиями, позволяет выполнить оценку эффективности применяемых режимов загрузки и шлакового режима и обоснованно принимать оперативные управляющие решения по корректировке их параметров.

На основе обобщения результатов математического моделирования с использованием комплексной модели формирования порций шихтовых материалов, их загрузки в ДП и распределения на колошнике, определения высокотемпературных свойств шихтовых материалов и их смесей, расчетной и экспериментальной оценок свойств образующихся расплавов и технологических требований по их распределению в сечении ДП, результатов экспериментальных исследований и промышленных испытаний разработаны теоретические основы и практические пути совершенствования технологии загрузки ДП, оснащенных БЗУ, многокомпонентными смешанными порциями шихтовых материалов [17].

Основные составляющие разработанной технологии – научно обоснованные, реализующие технологические требования и приемы формирования и загрузки различных порций компонентов шихты:

- железорудных смешанных порций;
- коксовых смешанных порций при использовании различных видов кокса в шихте;
- смешанных порций, содержащих добавки различного назначения;
- многокомпонентных смешанных порций, состоящих из железорудных материалов и кокса.

Комплексная модель формирования порций шихтовых материалов, их загрузки в ДП и распределения на колошнике используется в качестве составной части разработанной в ИЧМ интеллектуальной системы поддержки принятия решений по управлению доменной плавкой [18].

**Заключение.** Представлены результаты разработки и технологические возможности комплексной математической модели формирования многокомпонентных порций шихтовых материалов, их загрузки в бункер бесконусного загрузочного устройства, выгрузки из бункера и распределения на поверхности засыпи. Использование модели значительно сокращает продолжительность выбора и опробования ра-

циональных параметров режима загрузки многокомпонентной шихты и снижает уровень риска принятия неэффективных решений. Результаты математического моделирования использованы для разработки теоретических и практических положений технологии загрузки доменных печей многокомпонентными смешанными порциями шихтовых материалов. Функциональные возможности разработанной модели определяют целесообразность ее использования в составе интеллектуальных систем анализа и управления процессами доменной плавки для выбора оптимального состава шихты и управления загрузкой ДП с определением технологических ограничений по использованию отдельных компонентов шихты и генерацией управляющих воздействий на процесс плавки.

#### Библиографический список

1. **Большаков В.И.** Технология высокоэффективной энергосберегающей доменной плавки. К. : Наук. думка, 2007. 412 с.
2. **Большаков В.И.** Теория и практика загрузки доменных печей. М. : Металлургия, 1990. 256 с.
3. **Калинин А.П., Загайнов С.А., Ярошенко Ю.Г.** Математическая модель оценки качественных характеристик потока при их циклической загрузке и выгрузке из бункера // Изв. вузов. Черная металлургия. 1985. № 8. С. 95–98.
4. **Малахов Г.М.** Выпуск руды из обрушенных блоков. М. : Металлургиздат, 1952. 288 с.
5. **Панич Ю.В., Пайкин М.З.** Математическая модель загрузки и истечения сыпучих материалов из накопительных емкостей с целью усреднения руд // Обогащение руд. 1977. № 3. С. 6–10.
6. **Куликов В.В.** Выпуск руды. М. : Недра, 1982. 262 с.
7. **Алферов К.В., Зенков Р.А.** Бункерные установки. М. : Машгиз, 1955. 308 с.
8. **Квапил Р.** Движение сыпучих материалов в бункерах. М. : Госгортехиздат, 1961. 81 с.
9. **Гячев Л.В.** Движение сыпучих материалов в трубах и бункерах. М. : Машиностроение, 1968. 184 с.
10. **Фиалко Г.М.** Параметры процесса разгрузки бункеров обогатительных фабрик // Изв. вузов. Горный журнал. 1983. № 6. С. 122–124.
11. **Большаков В.И., Иванча Н.Г., Вишняков В.И.** Разработка математических моделей загрузки многокомпонентных порций шихтовых материалов в бункер бесконусного загрузочного устройства и выгрузка их из бункера: Сб. научн. тр. ИЧМ «Фундаментальные и прикладные проблемы черной металлургии». 2012. Вып. 26. С. 42–51.
12. **Большаков В.И., Зарембо А.Ю.** Особенности истечения шихтовых материалов из бункера бесконусного загруз-

зочного устройства: Сб. ст. «Металлургия и коксохимия». 1985. Вып. 88. С. 31–34.

13. **Большаков В.И., Семенов Ю.С., Иванча Н.Г. и др.** Исследования параметров потока шихтовых материалов и их распределения на колошнике современной доменной печи // *Металлургическая и горнорудная промышленность*. 2012. № 3. С. 87–92.

14. **Большаков В.И., Зарембо А.Ю., Иванча Н.Г. и др.** Освоение системы загрузки современной доменной печи // *Обзорная информация*. М. : Черметинформация, 1989. 53 с.

15. **Большаков В.И., Шулико С.Т., Иванча Н.Г. и др.** Влияние режимов загрузки смешанных порций шихтовых материалов на выход из строя воздушных фурм доменной

печи // *Металлургическая и горнорудная промышленность*. 2007. № 4. С. 6–12.

16. Доменное производство «Криворожстали» / Монография под ред. В.И.Большакова. Днепропетровск : КГГМК «Криворожсталь» – ИЧМ НАНУ, 2004. 378 с.

17. **Иванча Н.Г., Муравьева И.Г., Семенов Ю.С. и др.** Совершенствование технологии, работы оборудования и систем управления доменной плавкой // *Черная металлургия* : Бюл. НТИЭИ. 2017. № 6. С. 31–40.

18. **Муравьева И.Г., Тогобицкая Д.Н., Семенов Ю.С. и др.** Интеллектуальная система поддержки принятия решений по управлению доменной плавкой: Сб. науч. работ «Компьютерное моделирование, анализ, управление, оптимизация». 2017. № 1. С. 25–30.

## INTEGRATED MATHEMATICAL MODEL OF DISTRIBUTION OF MULTI-COMPONENT BURDEN MATERIALS IN BF

© **Ivanча N.G., Muraviova I.G., Shumelchik E.I., Vishnyakov V.I., Semenov Yu.S.**

The results of the development of a complex mathematical model for the formation of multicomponent batches of charge materials, their charging into the hopper, discharging from the hopper and distribution on the surface of the backfill are presented. The results of mathematical modeling allow analyzing the influence of the applied charge material distribution program on the distribution of individual components, both iron ore and fuel part of the charge, which makes it possible to select and adjust the program based on the results of the forecast calculations before entering it into the charging control system. Using the results of mathematical modeling, the theoretical and practical positions of the technology for charging blast furnaces equipped with BLT with multicomponent mixed batches of charge materials have been developed.

**Keywords:** blast furnace; blast furnace process; mathematical model; charge materials; charging program; BLT; ore charging; multicomponent charging; skip charging; conveyor charging; surface of a backfill; pellets; agglomerate; coke; skull.

### ЭКСПРЕСС-ИНФОРМАЦИЯ

## ЕВРАЗ НТМК первым в России применил технологию утилизации конвертерного пара

ЕВРАЗ НТМК начал пусконаладочные работы на уникальной установке утилизации конвертерного пара. Установка позволит снизить себестоимость выплавки стали и ежегодно экономить 20 млн м<sup>3</sup> природного газа. Подобное техническое решение применяется в России впервые.

Установка улавливает пар, который образуется в процессе выплавки стали в конвертере, и использует его для нагрева сетевой воды в двух теплообменных аппаратах до 115 °С. Это позволяет снизить температуру нагрева воды в водогрейных котлах теплоэлектроцентрали и снизить потребление природного газа.

Установка предназначена для работы в межсезонье и зимний период, действует в автоматическом режиме, все параметры выводятся на мониторы компьютеров производственных и энергетических служб.

Помимо энергетического эффекта установка позволяет снизить нагрузку на окружающую среду, уменьшить уровень шума, минимизировать потери химически очищенной воды до 286 тыс. м<sup>3</sup> в год.

Затраты на реализацию проекта составили более 170 млн руб.

*Татьяна Казакова*

*Управление по связям с общественностью*

*Региональный центр корпоративных отношений «Урал»*

*07 февраля 2018 г*