

УДК 669.162.263

СОВЕРШЕНСТВОВАНИЕ ТЕХНОЛОГИИ, РАБОТЫ ОБОРУДОВАНИЯ И СИСТЕМ УПРАВЛЕНИЯ ДОМЕННОЙ ПЛАВКОЙ

*Н. Г. ИВАНЧА, И. Г. МУРАВЬЕВА, д-р техн. наук; Ю. С. СЕМЕНОВ, канд. техн. наук;
А. С. НЕСТЕРОВ, канд. техн. наук; Е. И. ШУМЕЛЬЧИК, канд. техн. наук
(Институт черной металлургии им. З.И. Некрасова НАН Украины, г. Днепр, Украина)*

Использование имеющихся резервов повышения эффективности и улучшения технико-экономических показателей процесса выплавки чугуна предполагает непрерывное совершенствование технологии за счет разработки и реализации новых способов и приемов контроля и управления доменной плавкой, выбора рациональных технологических режимов и режимов работы оборудования, а также повышения интеллектуального потенциала и совершенствования алгоритмов функционирования автоматизированных систем управления технологическим процессом (АСУТП). В течение последних лет

сотрудниками Института черной металлургии (ИЧМ) им. З.И. Некрасова Национальной академии наук Украины выполнен ряд теоретических и прикладных научно-исследовательских работ и перспективных разработок в области доменного производства с опытно-промышленным опробованием и внедрением полученных результатов на предприятиях металлургической промышленности.

Одним из традиционных направлений работы ИЧМ является разработка технологических заданий (ТЛЗ) на проектирование систем загрузки при строительстве и реконструкции доменных

печей (ДП), а также технологических требований к системам управления загрузкой с учетом сырьевых условий и особенностей технологии плавки [1]. Разрабатываемые ТЛЗ включают предложения по структурной схеме системы шихтоподачи, рекомендации по выбору оборудования системы загрузки, включая загрузочное устройство, рациональные параметры оборудования и режимы его работы, обеспечивающие реализацию высокоэффективных экономичных режимов загрузки ДП (рис. 1). При разработке ТЛЗ учитываются современные технологические требования к процессу загрузки ДП, включая обусловленные многокомпонентностью шихты, необходимостью загрузки некондиционных фракций шихтовых материалов, гарнисажеобразующих и промывочных материалов и смесей. ИЧМ разработано ТЛЗ на

проектирование системы загрузки ДП № 3 Енакиевского металлургического завода (ЕМЗ) с установкой загрузочного устройства фирмы Paul Wurth — объекта, который по конструктивным решениям, в том числе в части оборудования и средств автоматизации, является одним из лучших в Украине. Следует отметить, что задувка и раздувка ДП № 3 в 2011 г. также осуществлялись с технологическим сопровождением ИЧМ, которое включало расчет задувочной шихты и разработку программы ее загрузки, контроль загрузки задувочной шихты, проведение предпусковых исследований, технологическую наладку оборудования системы загрузки для обеспечения реализации заданных режимов ее работы, корректировку шлакового и дутьевого режимов, режима загрузки в период раздувки [2].

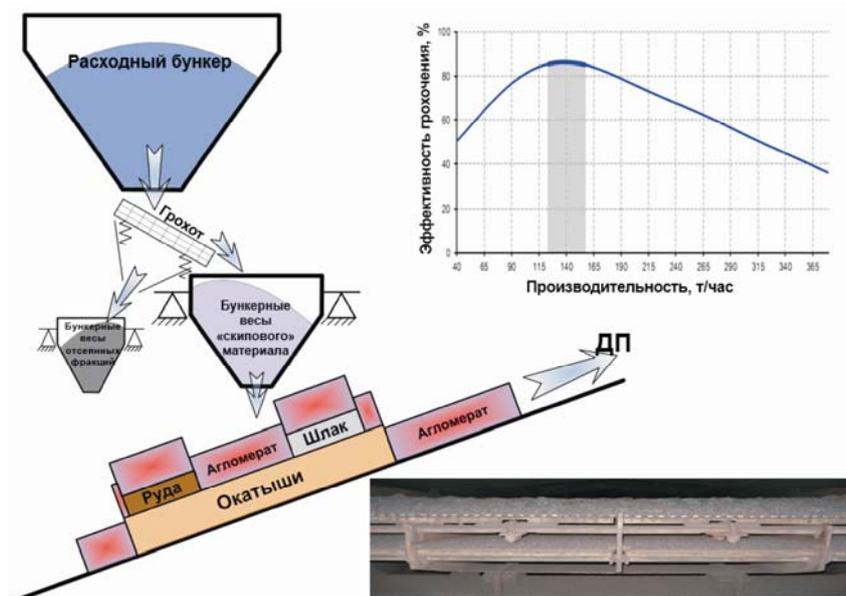


Рис. 1. Структурные схемы систем шихтоподачи и выбор рациональных режимов работы оборудования

В процессе предпусковых исследований оборудования систем загрузки и распределения шихты в промышленных условиях определяются рабочие характеристики оборудования, фактические параметры движения шихтовых материалов по тракту загрузки, характеристики формирования профиля и распределения компонентов шихты на поверхности засыпи. Исследования характеристик распределения задувочной шихты проводятся непосредственно на поверхности засыпи с установкой пробоотборников и измерительных приспособлений, а также бесконтактными методами при помощи лазерных инструментов (рис. 2). На основании полученных результатов осуществляется выбор рациональных

режимов работы оборудования, корректируются настройки используемых математических моделей, разрабатываются программы загрузки ДП в задувочный и раздувочный периоды, проводится технологическая настройка работы оборудования, в том числе настройка шихтовых затворов, выбор и формирование матрицы углов наклона лотка бесконусного загрузочного устройства (БЗУ) с привязкой к фактическому уровню засыпи, определение рациональных параметров грохочения шихтовых материалов с обеспечением высокой эффективности, корректировка циклограммы работы оборудования системы загрузки.

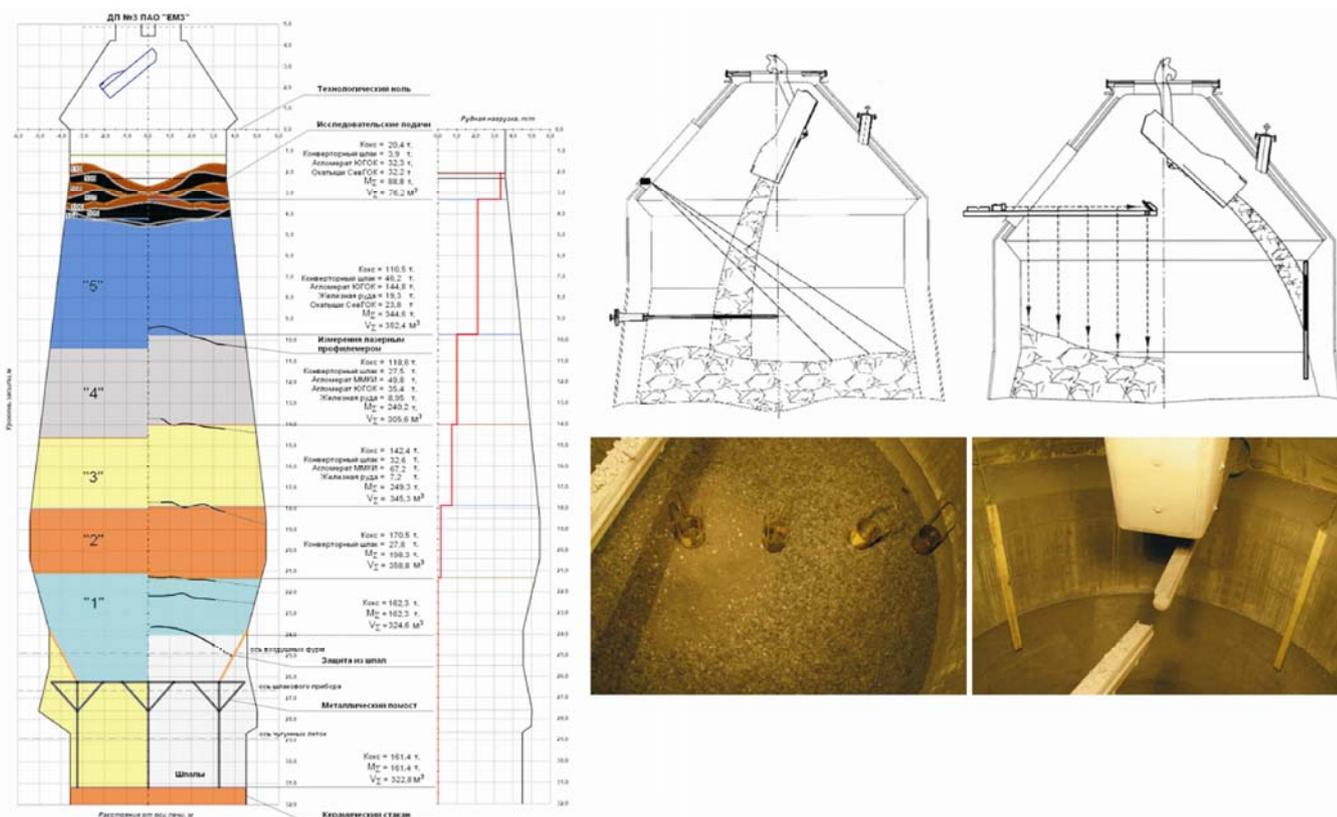


Рис. 2. Расчет задувочной шихты, предпусковые исследования оборудования системы загрузки и распределения шихтовых материалов на колошнике

Одной из наиболее актуальных проблем, с которой сталкиваются технологи-доменщики в последнее время, является многокомпонентность шихты, вызванная в основном истощением природных минеральных ресурсов и связанным с этим ухудшением качества сырья и топлива. Помимо различных топливных, железосодержащих, флюсующих, гарнисажеобразующих и промывочных добавок в состав шихты ДП могут входить по два и более вида кокса и железорудных материалов. 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 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 ИЧМ разработана комплексная математическая модель формирования многокомпонентных порций шихтовых материалов, их загрузки в бункер БЗУ, выгрузки из бункера [3] и распределения на поверхности засыпи [4]. 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, а также результатов многочисленных экспериментальных исследований, выполненных ИЧМ на объектах доменного производства в промышленных условиях. Модель предназначена для применения на ДП с БЗУ (модель для печей с конусными загрузочными устройствами находится в стадии разработки), оснащенных скиповыми и конвейерными системами шихтоподачи (рис. 3).

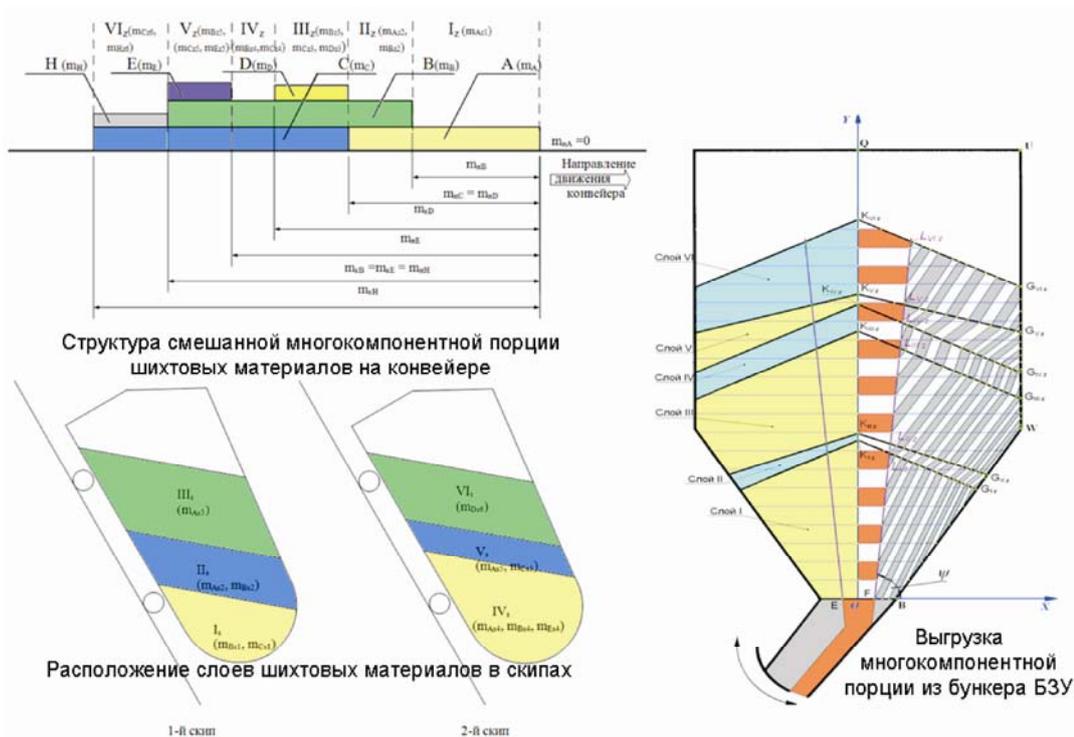


Рис. 3. Расчетная схема формирования многокомпонентных порций шихтовых материалов, их загрузки в бункер БЗУ и выгрузки из бункера

В модели учтено влияние комплекса процессов перемещения массивов шихтовых материалов и смешивания компонентов в процессе движения многокомпонентных порций шихты, начиная со стадии выгрузки их на доменный конвейер или загрузки в скипы до выгрузки в колошниковом пространстве, на формирование характеристик распределения компонентов шихты на поверхности засыпи. 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 рис. 4 и 5 приведены результаты расчетов, выполненных при помощи комплексной математической модели, которые показывают влияние параметров формирования смешанных железорудных порций на распределение основных железорудных компонентов шихты и добавок различного назначения.

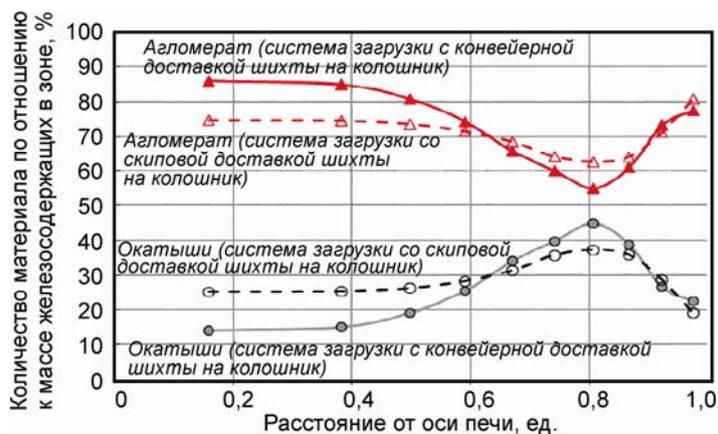


Рис. 4. Распределение агломерата и окатышей по радиусу колошника

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.

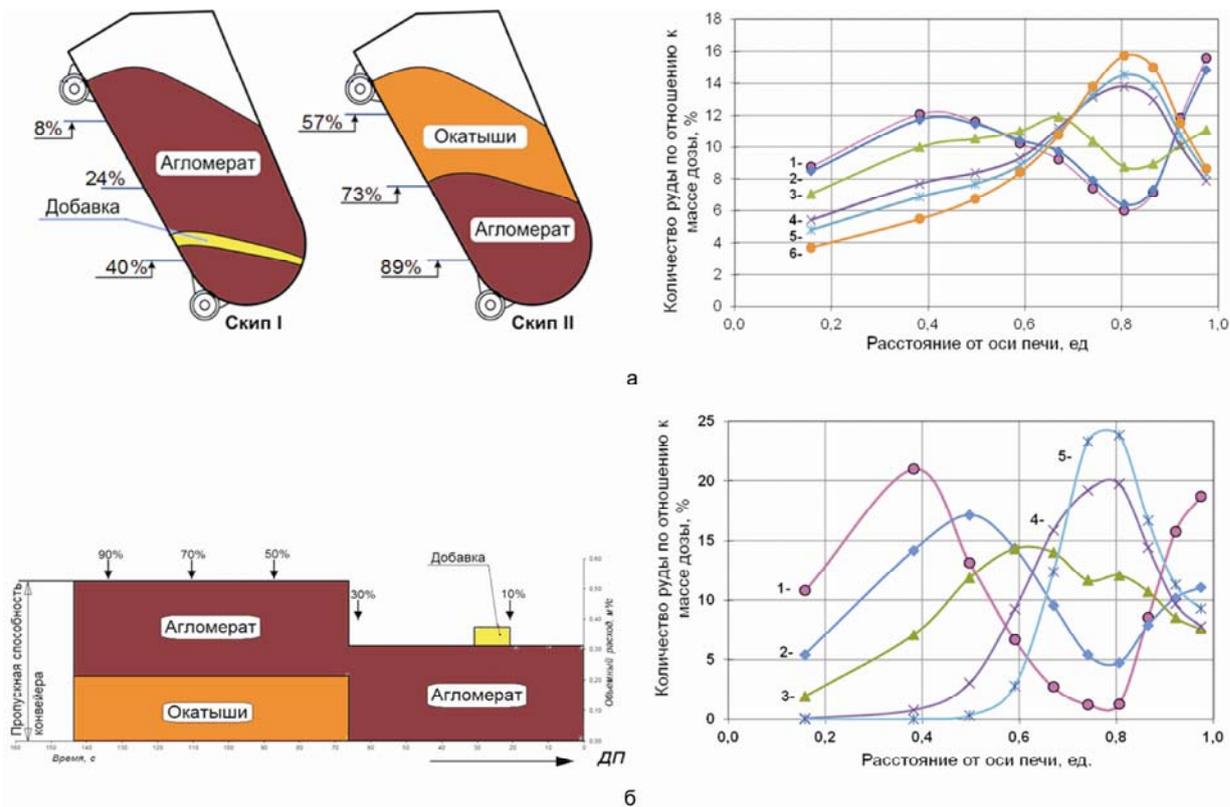


Рис. 5. Влияние расположения дозы добавок в объеме порции на их распределение по радиусу колошника: а — система шихтоподачи со скиповой доставкой шихты на колошник; 1–6 — индекс расположения дозы добавок в скипах железорудной порции подачи вида $PP\downarrow KK\downarrow$ (шаг изменения расположения дозы добавок — 16–17 % от массы порции); б — система шихтоподачи с конвейерной доставкой шихты на колошник; 1–5 — индекс расположения дозы добавок в железорудной порции на конвейере (шаг изменения расположения дозы добавок — 20 % от массы порции)

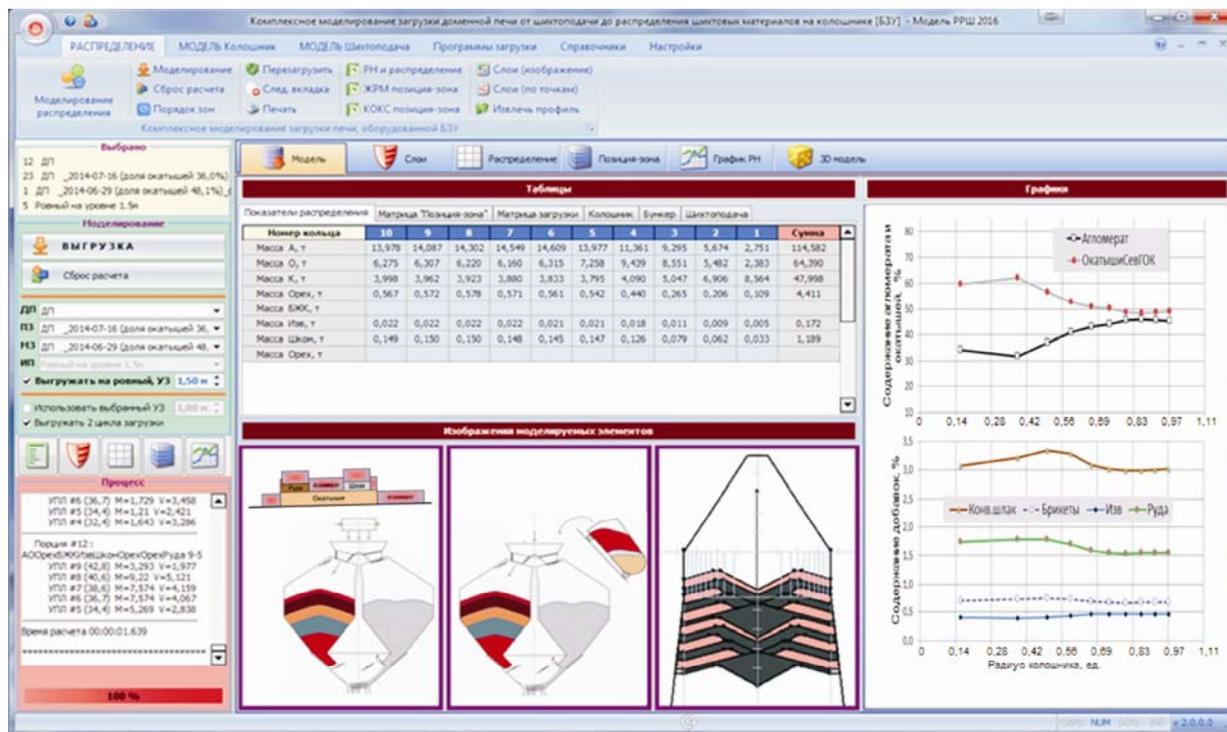


Рис. 6. Фрагмент интерфейса комплексной математической модели формирования многокомпонентных порций шихтовых материалов, их загрузки в бункер БЗУ, выгрузки из бункера и распределения на поверхности засыпи

На основании 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 оценки свойств образующихся расплавов и технологических требований к их распределению по сечению ДП, результатов экспериментальных исследований и промышленных испытаний разработаны теоретические и практические положения технологии загрузки ДП, оснащенных БЗУ, многокомпонентными смешанными порциями шихтовых материалов [5].

На рис. 7 представлена блок-схема разработанной технологии загрузки ДП, оснащенных БЗУ, многокомпонентными смешанными порциями шихтовых материалов, основными составляющими которой являются научно обоснованные и реализующие технологические требования приемы формирования и загрузки различных видов порций:

- 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.



Рис. 7. Блок-схема технологии загрузки доменных печей, оснащенных БЗУ, многокомпонентными смешанными порциями шихтовых материалов

Положения технологии, касающиеся формирования и загрузки железорудных смешанных порций, включают рациональные структуры этих порций и метод расчетного определения параметров их формирования, в том числе массы головной части из агломерата, обеспечивающей минимизацию содержания окатышей в пристеночной зоне, что способствует уменьшению агрессивного воздействия первичных шлаковых расплавов на огнеупорную футеровку шахты, а также препятствует износу холодильников и прогару воздушных фурм [6].

Для загрузки ДП при использовании в шихте двух и более видов кокса разработаны техноло-

гические приемы и параметры формирования коковых смешанных порций, обеспечивающие стабилизацию процесса плавки при одновременном использовании кокса различного качества (в том числе пекового кокса) за счет рационального распределения различных видов кокса по радиусу колошника.

В части формирования и загрузки смешанных порций, включающих добавки различного назначения, технология предусматривает выбор характера распределения конкретного вида добавок в соответствии с разработанными технологическими требованиями, использование полученных зависимостей для расчетной оценки рас-

пределения добавок в текущих условиях и выбор рациональных параметров формирования смешанных порций, в состав которых включен данный вид добавок, с определением величины управляющего воздействия, влияющего на характер распределения [7].

Разработанная технология содержит рекомендации по выбору структуры многокомпонентных смешанных порций, состоящих из агломерата, окатышей и кокса, рациональных диапазонов параметров формирования порций этого вида и периодичности их загрузки в составе цикла, обеспечивающие стабильное использование преимуществ смешивания железорудных материалов с коксом перед загрузкой в ДП, проявляющихся в уменьшении удельного расхода кокса и возможности использования увеличенного количества шихтовых материалов пониженного качества без существенного ухудшения показателей плавки. Основные положения разработанной технологии использовались при разра-

ботке режимов загрузки ДП ряда металлургических предприятий.

Для технологов доменных цехов разработана модельная система выбора и корректировки программ загрузки ДП, оборудованной БЗУ, которая представляет собой упрощенную версию комплексной модели, но при этом является достаточно эффективным инструментом, обеспечивающим возможность оперативной корректировки параметров режима загрузки [8]. При помощи модельной системы осуществляется расчет характеристик распределения масс и объемов железорудных материалов и кокса и, соответственно, рудных нагрузок по радиусу колошника. Система успешно используется для оценки и выбора рациональных параметров режима загрузки на ДП № 3 ЕМЗ. Фрагмент интерфейса модельной системы выбора и корректировки программ загрузки ДП, оборудованной БЗУ, показан на рис. 8.

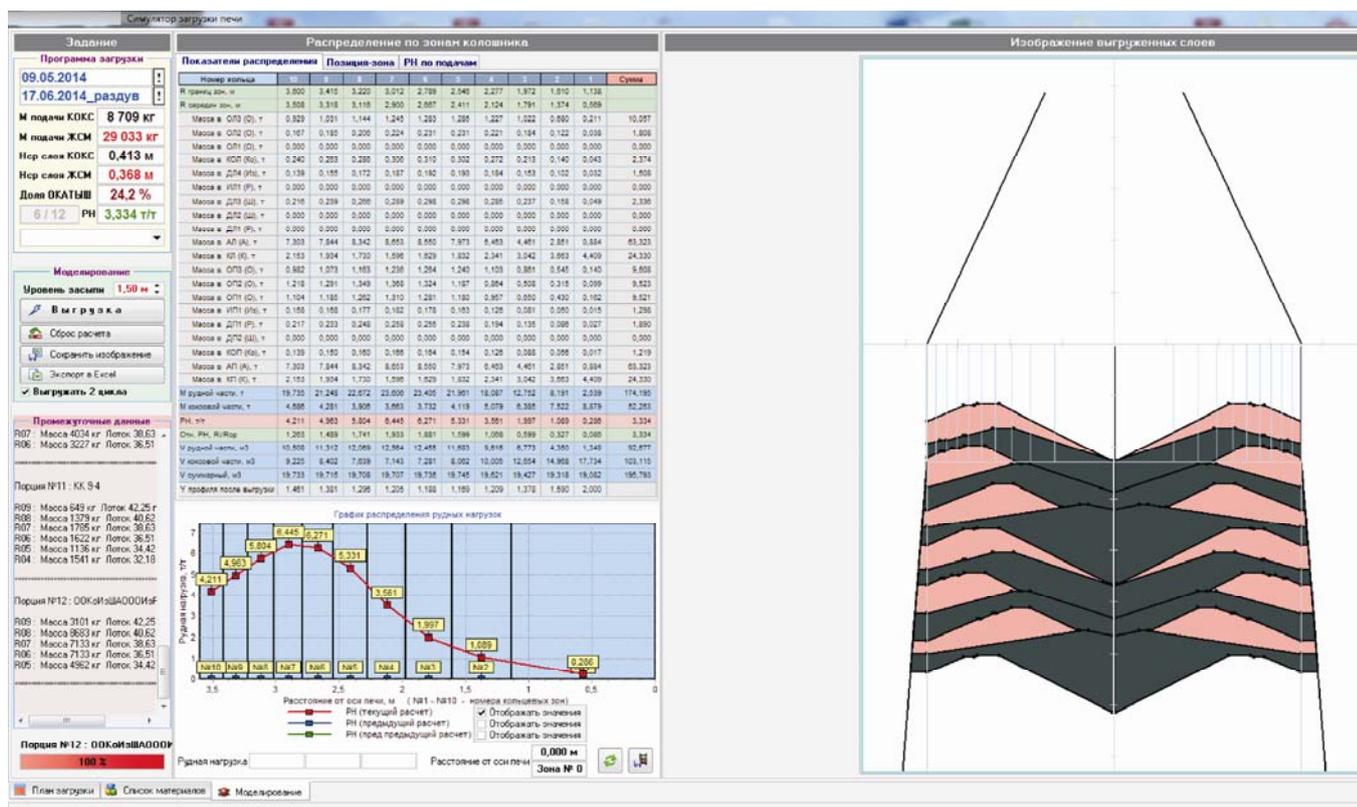


Рис. 8. Фрагмент интерфейса модельной системы выбора и корректировки программ загрузки доменной печи, оборудованной БЗУ

Сотрудники ИЧМ имеют обширный опыт разработки рациональных режимов загрузки ДП в различных технологических условиях работы [9, 10], в том числе при вдувании в горн пылеугольного топлива с применением различных средств контроля распределения газового потока, в частности с использованием информации

об изменении температур газового потока над поверхностью засыпи [11].

Опыт ввода пылеугольного топлива в доменном цехе ЕМЗ в 2016 г. показал, что в характерных для этого предприятия технологических условиях для формирования рационального распределения газового потока по радиусу печи и

достижения заданных технико-экономических показателей плавки используемая программа загрузки ДП должна обеспечивать выполнение следующих технологических требований:

- предотвращение излишней “подгрузки” периферийной зоны железорудными материалами, которая может приводить к “верхним подвисяниям” и неровному сходу шихты;
- обеспечение устойчивого центрального газового потока в сочетании с узкой осевой отдушиной;
- обеспечение взаимного перетока газов между периферией и центром.

Распределение температур газового потока над поверхностью засыпи шихты ДП, соответствующее сформулированным требованиям, приведено на рис. 9.

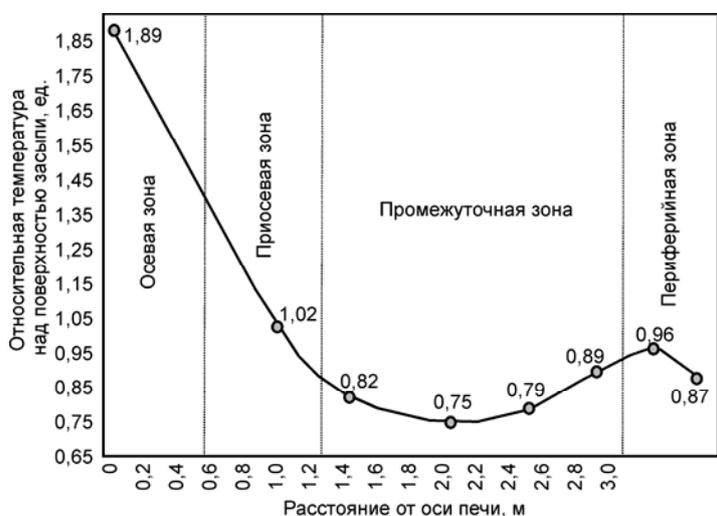
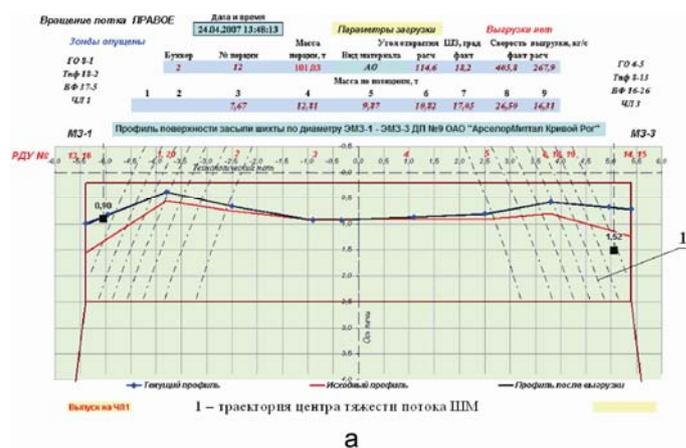


Рис. 9. Рациональное распределение температуры газового потока над поверхностью засыпи по радиусу колошника ДП № 3 ЕМЗ

Многолетний опыт работы на ЕМЗ показал, что разработка и внедрение рациональных режимов загрузки шихтовых материалов даже в сложных и нестабильных шихтовых условиях обеспечивает увеличение степени использования восстановительной способности газов и, как следствие, уменьшение удельного расхода кокса на 2–3 кг/т чугуна [9, 10].

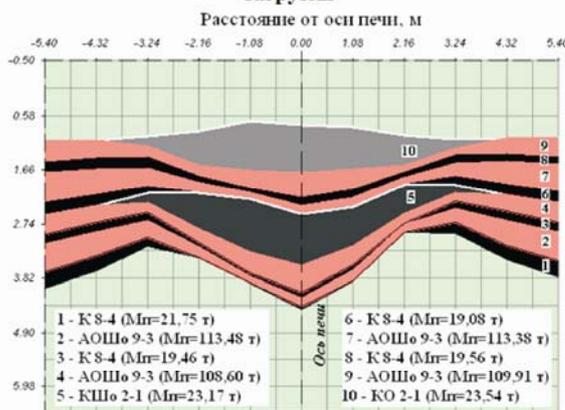
Сотрудниками ИЧМ разработана не имеющая аналогов интеллектуальная система контроля поверхности засыпи шихты на основе информации радиолокационных измерителей, установленных на ДП № 9 ПАО “АрселорМиттал Кривой Рог” [12]. Информация о расстоянии до поверхности засыпи шихты используется для идентификации профиля поверхности засыпи по четырем диаметрам. Кроме того, система обеспечивает расчет скорости опускания шихты в различных сечениях печи, а также толщины слоев ших-

товых материалов, образованных в результате выгрузки их в ДП (рис. 10) [13].

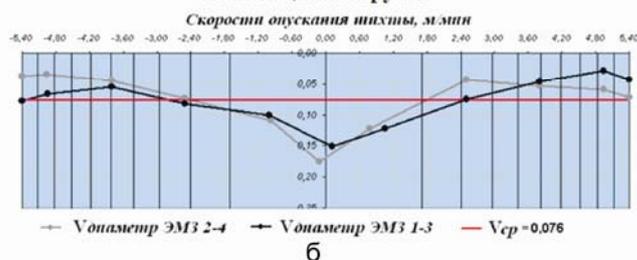


а

Конфигурация слоев шихтовых материалов за цикл загрузки



Распределение скоростей опускания шихты по диаметрам печи за цикл загрузки



б

Рис. 10. Видеокадры выходной информации системы контроля поверхности засыпи шихты

По результатам исследований в процессе освоения системы разработаны новые оригинальные методы контроля и прогноза процессов плавки [14]:

- оценки стабильности скорости схода шихты;
- прогнозирования содержания кремния за период, соответствующий времени нахождения материалов в печи;
- определения формы и положения пластичной зоны в ДП.

В настоящее время ИЧМ завершил разработку интеллектуальной системы поддержки принятия решений по управлению доменной плавкой, сочетающей методы, базирующиеся на знаниях специалистов-экспертов и накопленном опыте, с предложенными методами математической оценки процессов на основе целевых критериев и алгоритмами их использования при поиске и формулировании решений по управлению процессом [15–17]. В комплексных критериях объединены технологические параметры и выходные данные систем автоматизированного контроля процессов, что в значительной степени

облегчит оператору выбор и принятие решений по управлению доменной плавкой [18]. Диагностика процесса плавки осуществляется на основе расчета следующих критериев оценки: теплового состояния доменной плавки, газодинамического режима, формы и положения пластичной зоны, эффективности осевой коксовой отдушины, воздействия расплавов на футеровку металлоприемника и интегрального показателя доменной шихты. Фрагмент интерфейса интеллектуальной системы поддержки принятия решений по управлению доменной плавкой показан на рис. 11.

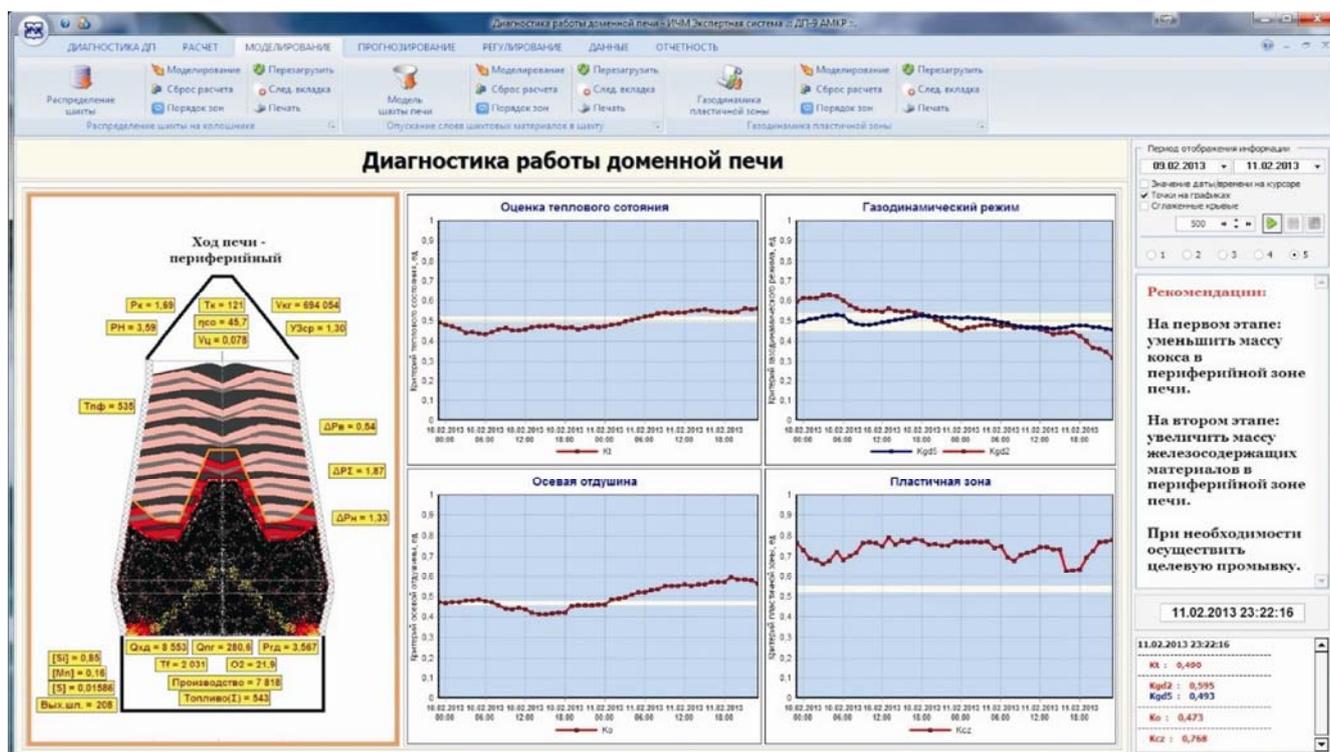


Рис. 11. Фрагмент интерфейса интеллектуальной системы поддержки принятия решений по управлению доменной плавкой

Заключение

Специалисты ИЧМ активно сотрудничают с металлургическими предприятиями в части использования теоретических положений разработок, адаптации технических решений к конкретным объектам и технологического сопровождения внедрения рациональных параметров и ре-

жимов доменной плавки, режимов работы оборудования, рациональных режимов загрузки, новых средств и способов контроля технологических параметров в практику доменного производства.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Большаков, В. И. Технология высокоэффективной энергосберегающей доменной плавки [Текст] / В. И. Большаков. — Киев: Наукова думка, 2007. — 412 с.
2. Bolshakov, V. I. Study of the Flow of Burden Materials and their Distribution on the Furnace Top of a Modern Blast Furnace [Text] / V. I. Bolshakov, Yu. S. Semenov, N. G. Ivancha [et al.] // Metallurgical and Mining Industry. — 2012. — V. 4. — № 3. — P. 158–165.
3. Большаков, В. И. Разработка математических моделей загрузки многокомпонентных порций шихтовых материалов в бункер бесконусного загрузочного устройства и выгрузка их из бункера [Текст] / В. И. Большаков, Н. Г. Иванча,

- В. И. Вишняков // Сб. научн. тр. ИЧМ “Фундаментальные и прикладные проблемы черной металлургии”. — 2012. — Вып. 26. — С. 42–51.
4. Большаков, В. И. Модель радиального распределения шихтовых материалов на колошнике доменной печи, оборудованной БЗУ [Текст] / В. И. Большаков, Ю. С. Семенов, В. В. Лебедь [и др.] // Там же. — 2011. — Вып. 23. — С. 52–62.
 5. Большаков, В. И. Технологическое обоснование эффективности загрузки многокомпонентных смешанных порций шихтовых материалов в доменную печь [Текст] / В. И. Большаков, Н. Г. Иванча, И. Г. Муравьева, В. И. Вишняков // Там же. — 2012. — Вып. 25. — С. 103–122.
 6. Большаков, В. И. Исследование и промышленное опробование загрузки многокомпонентных смешанных порций, состоящих из железорудных материалов и кокса [Текст] / В. И. Большаков, Н. Г. Иванча, И. Г. Муравьева, В. И. Вишняков // Там же. — 2013. — Вып. 27. — С. 53–67.
 7. Большаков, В. И. Методика определения рациональных параметров формирования железорудных смешанных порций при загрузке шихтовых материалов в доменную печь [Текст] / В. И. Большаков, Н. Г. Иванча, И. Г. Муравьева, В. И. Вишняков // Металлургическая и горнорудная промышленность. — 2013. — № 5 — С. 83–88.
 8. Semenov, Yu. S. Model system for selecting and correcting charging programs for blast furnaces equipped with a bell-less charging apparatus [Text] / Yu. S. Semenov, E. I. Shumelchik, V. I. Vishnyakov [et al.] // Metallurgist. — 2013. — January. — V. 56. — Is. 9–10. — P. 652–657.
 9. Большаков, В. И. Реализация энергосберегающей технологии загрузки современной доменной печи в конъюнктурных топливно-сырьевых и технологических условиях [Текст] / В. И. Большаков, Ю. С. Семенов, Е. И. Шумельчик [и др.] // Металлургическая и горнорудная промышленность. — 2014. — № 6. — С. 6–14.
 10. Семенов, Ю. С. Новые подходы в управлении загрузкой доменной печи, оборудованной БЗУ, в современных условиях работы [Текст] / Ю. С. Семенов. Познание процессов и развитие технологии доменной плавки: коллективный труд Второго междунар. симпозиума под научн. ред. д-ра техн. наук, проф. И.Г. Товаровского. — Днепр: Журфонд, 2016. — С. 272–285.
 11. Большаков, В. И. Использование информации о температуре над поверхностью засыпи шихты для контроля доменной плавки [Текст] / В. И. Большаков, Ю. С. Семенов, Е. И. Шумельчик [и др.] // Металлургическая и горнорудная промышленность. — 2015. — № 3. — С. 2–7.
 12. Большаков, В. И. Применение радиолокационных систем измерения поверхности засыпи шихты для контроля и управления доменной плавкой [Текст] / В. И. Большаков, И. Г. Муравьева, Ю. С. Семенов. — Днепропетровск: Пороги, 2013. — 364 с.
 13. Большаков, В. И. Использование информации профилемера для выбора управляющих воздействий на ход доменной плавки [Текст] / В. И. Большаков, И. Г. Муравьева, Ю. С. Семенов [и др.] // Черная металлургия: Бюл. ин-та “Черметинформация”. — 2006. — № 5. — С. 29–34.
 14. Большаков, В. И. Современные средства автоматизированного контроля — инструмент познания процессов доменной плавки [Текст] / В. И. Большаков, И. Г. Муравьева, Ю. С. Семенов. Познание процессов и развитие технологии доменной плавки: коллективный труд Второго междунар. симпозиума под науч. ред. д-ра техн. наук, проф. И.Г. Товаровского. — Днепр: Журфонд, 2016. — С. 256–271.
 15. Муравьева, И. Г. Новые критерии оценки процессов доменной плавки: Сообщение 1. Критерий оценки теплового состояния доменной плавки [Текст] / И. Г. Муравьева, Ю. С. Семенов, Е. И. Шумельчик, Ю. М. Лихачев // Черная металлургия: Бюл. ин-та “Черметинформация”. — 2016. — № 6. — С. 34–39.
 16. Муравьева, И. Г. Новые критерии оценки процессов доменной плавки. Сообщение 2. Критерии оценки газодинамического режима доменной плавки и эффективности осевой коксовой отдушины [Текст] / И. Г. Муравьева, Ю. С. Семенов, Е. И. Шумельчик, Е. А. Белошапка // Там же. — 2016. — № 7. — С. 39–44.
 17. Муравьева, И. Г. Новые критерии оценки процессов доменной плавки. Сообщение 3. Комплексные критерии оценки воздействия расплава на футеровку металлоприемника доменной печи [Текст] / И. Г. Муравьева, Ю. С. Семенов, Е. И. Шумельчик // Там же. — 2016. — № 9. — С. 51–56.
 18. Муравьева, И. Г. Интеллектуальная система поддержки принятия решений по управлению доменной плавкой [Текст] / И. Г. Муравьева, Д. Н. Тогобицкая, Ю. С. Семенов [и др.] // Сборник научных работ “Компьютерное моделирование, анализ, управление, оптимизация”. — 2016. — № 1. — С. 29–33.