



Оригинальная статья

УДК 669.162

DOI 10.17073/0368-0797-2021-8-588-598



ЦИФРОВАЯ ТРАНСФОРМАЦИЯ ПИРОМЕТАЛЛУРГИЧЕСКИХ ТЕХНОЛОГИЙ: СОСТОЯНИЕ, НАУЧНЫЕ ПРОБЛЕМЫ И ПЕРСПЕКТИВЫ РАЗВИТИЯ

Н. А. Спирин¹, В. В. Лавров¹, В. Ю. Рыболовлев², Д. А. Шнайдер²,
А. В. Краснобаев², И. А. Гурин¹

¹ Уральский федеральный университет им. первого Президента России Б. Н. Ельцина (Россия, 620002, Екатеринбург, ул. Мира, 28)

² ПАО «Магнитогорский металлургический комбинат» (Россия, 455000, Челябинская обл., Магнитогорск, ул. Кирова, 93)

Аннотация. Приводится обзор и критический анализ процесса цифровизации ведущих российских предприятий черной металлургии в соответствии с концепцией развития «Индустрия 4.0». Она предусматривает создание цифровых двойников пирометаллургических технологий, широкое применение машинного зрения и искусственного интеллекта. Представлены примеры отечественных промышленных систем, использующих в производственном цикле технологии машинного (технического) зрения, цифровых помощников (двойников) металлургических агрегатов и их комплексов. Применительно к доменному производству рассмотрены системы технического зрения, используемые для контроля процессов в верхней и нижней зонах доменной печи. Перспективным направлением является интеграция систем технического зрения и поддержки принятия решений, включающих алгоритмы и программные модули реализации детерминированных математических моделей отдельных явлений доменной плавки. В их основу положены фундаментальные физические представления о процессах доменной плавки. Одним из основных направлений цифровой трансформации пирометаллургических технологий является создание интеллектуальных систем управления технологическим процессом агрегатов и их комплексов в металлургии в режиме реального времени. При постановке и решении задач требуются не только изучение характеристик, описывающих влияние изменения условий плавки на технико-экономические показатели работы отдельных печей, но и детальный анализ для математического описания внешних и внутренних ограничений. Представлены примеры подсистем контроля тепловых потерь доменной печи, прогнозирования параметров фурменных очагов и управления распределением дутьевых параметров по окружности доменной печи, автоматизированной системы анализа и прогнозирования производственных ситуаций доменного цеха. Создание таких систем проведено на основе современных принципов и технологий разработки соответствующего математического, алгоритмического и программного обеспечения.

Ключевые слова: цифровая трансформация, интеллектуальные системы управления, цифровые двойники, машинное зрение, пирометаллургические технологии, технологические задачи, оптимизация, алгоритм, программное обеспечение

Для цитирования: Спирин Н.А., Лавров В.В., Рыболовлев В.Ю., Шнайдер Д.А., Краснобаев А.В., Гурин И.А. Цифровая трансформация пирометаллургических технологий: состояние, научные проблемы и перспективы развития // Известия вузов. Черная металлургия. 2021. Т. 64. № 8. С. 588–598. <https://doi.org/10.17073/0368-0797-2021-8-588-598>

Original article

DIGITAL TRANSFORMATION OF PYROMETALLURGICAL TECHNOLOGIES: STATE, SCIENTIFIC PROBLEMS AND PROSPECTS OF DEVELOPMENT

N. A. Spirin¹, V. V. Lavrov¹, V. Yu. Rybolovlev², D. A. Shnaider²,
A. V. Krasnobaev², I. A. Gurin¹

¹ Ural Federal University named after the first President of Russia B. N. Yeltsin (28 Mira Str., Yekaterinburg 620002, Russia)

² PJSC “Magnitogorsk Metallurgical Plant” (93 Kirova Str., Magnitogorsk, Chelyabinsk Region 455000, Russia)

Abstract. The article considers an overview and critical analysis of the digitalization of the leading Russian ferrous metallurgy enterprises in accordance with the Industry 4.0 development concept. It provides for the creation of digital twins of pyrometallurgical technologies, the widespread use of machine vision and artificial intelligence. The examples of domestic industrial systems using the technologies of machine (technical) vision in production cycle, digital assistants (twins) of metallurgical units and their sets are presented. With regard to blast-furnace production, technical vision systems used to control processes in the upper and lower zones of blast furnace are considered. A promising area is the integration of technical vision and decision support systems, including algorithms and software modules for implementation of deterministic mathematical models of individual phenomena of blast furnace smelting. They are based on fundamental physical concepts of blast-furnace smelting processes. One of the main directions of digital

transformation of pyrometallurgical technologies is creation of intelligent control systems for technological process in metallurgy in real time. When formulating and solving problems, it is required not only to study the characteristics describing the effect of change in melting conditions on technical and economic indicators of the operation of individual furnaces, but also a detailed analysis for mathematical description of external and internal constraints. The authors present the examples of subsystems for control of heat losses in a blast furnace, predicting the parameters of tuyere hearths and controlling distribution of blast parameters around the perimeter of a blast furnace, an automated system for analyzing and predicting production situations in a blast furnace. Creation of such systems was carried out on the basis of modern principles and technologies for the development of appropriate mathematical, algorithmic and software support.

Keywords: digital transformation, intelligent control systems, digital twins, machine vision, pyrometallurgical technologies, technological tasks, optimization, algorithm, software

For citation: Spirin N.A., Lavrov V.V., Rybolovlev V.Yu., Shnaider D.A., Krasnobaev A.V., Gurin I.A. Digital transformation of pyrometallurgical technologies: State, scientific problems and prospects of development. *Izvestiya. Ferrous Metallurgy*. 2021, vol. 64, no. 8, pp. 588–598. (In Russ.). <https://doi.org/10.17073/0368-0797-2021-8-588-598>

ВВЕДЕНИЕ

Многие ведущие металлургические компании России объявили о реализации концепции «Индустрия 4.0» и приняли стратегические программы цифровизации предприятия, предусматривающие создание цифровых двойников пирометаллургических технологий, широкое применение машинного зрения и искусственного интеллекта. Для реализации этой концепции на ряде предприятий разработаны программы развития, в которых важнейшей задачей цифровой трансформации пирометаллургических технологий является построение «Умного предприятия». Отметим, что превращение производственных предприятий в «умные» в Европе началось еще в 2011 г., где к настоящему времени уже накоплен значительный опыт. Такой подход позволит создать единую информационную основу для реализации комплекса мер по оптимизации и повышению эффективности работы как отдельных агрегатов, цехов, производств, так и предприятия в целом. Одно из направлений развития «Индустрии 4.0» – создание интеллектуальных систем для управления технологическим процессом отдельных агрегатов и их комплексов в режиме реального времени [1, 2]. При этом моделирование технологических процессов и систем управления в металлургии становится основополагающей частью этого процесса [3, 4].

ТЕХНОЛОГИЯ МАШИННОГО (ТЕХНИЧЕСКОГО) ЗРЕНИЯ

В настоящее время все, что окружает человека, можно заменить технологией машинного зрения [5]. Основные решения применительно к металлургической промышленности сводятся к следующему: считывание маркировки на продукции и упаковке, прослеживание изделий в ходе производства, выявление аварийных выбросов веществ, классификация поверхностных дефектов изделий, контроль внешнего вида сырья и отгружаемой продукции, проверка наличия (отсутствия) объектов в зоне контроля, определение местоположения объектов, определение гранулометрического состава шихты [6]. В настоящее время эта технология широко применяется на ряде металлургических предприятий России.

На предприятии ПАО «Северсталь» приступили к собственной разработке систем видеоинспекции поверхности металлопроката. Первый прототип решения подтвердил их эффективность (качество изображения, получаемое с оборудования, не уступает импортным аналогам). Это позволило существенно повысить качество контроля поверхности продукции [7]. На этом же предприятии для контроля положения горячекатаных рулонов на конвейерной линии и определения их опасного смещения (вплоть до падения) используется технология машинного зрения. Решение построено на базе двух моделей глубокого обучения (нейросетей), используется для работы видеопоток с имеющихся в производственном цеху комплексов видеонаблюдения [8].

Применяется машинное зрение в металлургическом и трубном производствах на ПАО «Челябинский трубопрокатный завод». Для этого используют камеры с высокой разрешающей способностью, на основе нейросетей ведется обучение системы, что позволяет вести диагностику различных видов дефектов труб [9].

На предприятиях АО «РУСАЛ» с использованием машинного зрения успешно эксплуатируется автоматическая система контроля герметизации электролизеров, основанная на анализе видеоизображения. Для обработки цифровых сигналов широко используются нейронные сети. Результат внедрения – существенное снижение вредных выбросов в атмосферу [10].

На ПАО «Магнитогорский металлургический комбинат» внедрена система распознавания газования на коксовых батареях с использованием машинного зрения, цель которой определить ненормативные выбросы газа через двери коксовых батарей. На видеокамерах системы установлены нейрочипы [11]. Реализуются проекты по распознаванию изображений с видеокамер, установленных на фурменных очагах доменной печи, а также по определению гранулометрического состава в потоке агломерата.

Одним из эффективных, интенсивно развивающихся в настоящее время методов контроля параметров высокотемпературных печей и агрегатов в металлургии является тепловизионный метод. Основным средством бесконтактного измерения в рамках рассматриваемого метода являются тепловизоры, которые способны по-

лучать тепловизионные изображения контролируемой поверхности в цифровом виде с последующей автоматизированной обработкой получаемой информации.

Для непрерывного определения температуры чугуна на доменной печи № 2 металлургического завода компании Liuzhou Steel Co. Ltd. (Китай) внедрен метод измерения температуры, основанный на интеграции инфракрасной термографии и математической модели снижения температуры на выпусках. Результаты промышленных экспериментов показывают, что предлагаемый метод позволяет одновременно измерять температуру расплавленного чугуна на скиммере и летке, а также обеспечивать надежные температурные данные для регулирования работы доменной печи [12, 13].

Однако формальное использование видеoinформации для сложных пирометаллургических процессов (без учета особенностей) технологии сложных, распределенных физико-химических процессов, даже при использовании самых современных методов обработки этой информации не всегда может дать объективную информацию о ходе технологического процесса.

В качестве примера рассмотрим две системы, используемые для контроля процессов в верхней и нижней частях доменной печи.

Для контроля распределения температуры на уровне засыпи доменных печей в настоящее время применяются тепловизионные изображения с последующей автоматизированной обработкой получаемой информации [14, 15]. Тепловизор является цифровым устройством, который в отличие от видеокамеры настроен на определенный диапазон (7,5 – 13,0 мкм) длин волн излучения, что соответствует диапазону измерения температур 50 – 1200 °С. По температурному полю над уровнем засыпи обычно оценивается степень неравномерности процессов в шахте и распаре доменной печи. В то же время анализ современных закономерностей тепломассобмена в доменных печах показывает, что в шахте доменной печи имеется горизонт, на котором наблюдается максимальная разность температур по радиусу печи. При современной технологии доменной плавки этот горизонт находится на глубине 3 – 4 м ниже уровня засыпи и перепад температур на этом горизонте в 2 – 3 раза выше, чем на уровне засыпи. Этот вывод подтверждается результатами исследований на действующих доменных печах [16]. Таким образом, по мере совершенствования технологии улучшения подготовки железорудного сырья температурное поле колошника теряет чувствительность к неравномерности, контроль температурного поля на уровне засыпи необходим, но недостаточен, а также не отражает реальной неравномерности распределения процессов в объеме печи.

Одной из главных трудностей при оценке теплового режима нижней части доменной печи является неполнота и недостаточная достоверность информации о текущем тепловом состоянии фурменных зон. Для контроля теплового состояния фурменных очагов до-

менных печей применяют информационные системы, включающие в себя непрерывную обработку видеопотока видеокамер, установленных на фурмах доменной печи [17], а также специальные термодатчики температуры торцевой стенки воздушных фурм. Это направление, безусловно, является перспективным. В связи с этим для оценки информативности этих способов разработана математическая модель системы воздушная фурма – фурменный очаг. В основу модели положены фундаментальные физико-химические закономерности формирования фурменных очагов, модели горения в фурменных очагах, в том числе с учетом использования пылеугольного топлива, природного газа и обогащения дутья кислородом. В результате определяют форму, геометрические размеры полости, поля температур и состав газовой фазы в пределах фурменного очага, а также температуру коксовой оболочки, ограничивающей полость. Предполагали, что непосредственно на верхнюю стенку фурмы поступает расплав (чугун, шлак), который разбрызгивается (диспергируется) высокоскоростным потоком дутья до мельчайших капель, заполняющими некоторый объем полости. В результате численного решения двумерной задачи определяют траекторию движения частицы расплава в объеме фурменного очага [18]. В дальнейшем с учетом данных о характере движения расплава, составе и температуре материалов и газа в объеме фурменного очага решали задачу оценки плотности теплового потока на торцевую стенку воздушной фурмы. В результате показано, что плотность теплового потока на торцевую стенку воздушной фурмы в большей степени определяется температурным полем коксовой оболочки фурменного очага и его газовой фазы и в меньшей степени зависит от изменения температуры и количества расплава. Таким образом, плотность теплового потока и температура зависит от теплового состояния коксовой оболочки и фурменного газа, а также от температуры и количества расплава в прифурменной области. Однако в последнем случае эта связь носит только вероятностный характер [16]. Перспективным направлением является интеграция этой системы технического зрения и математической модели процессов в фурменном очаге.

ЦИФРОВЫЕ ПОМОЩНИКИ, ЦИФРОВЫЕ ДВОЙНИКИ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ АГРЕГАТОВ В ПИРОМЕТАЛЛУРГИИ

Рассматриваемое направление связано, в первую очередь, с интеллектуализацией работы технологического персонала, решением задач моделирования, оптимизации технологических процессов, системами поддержки принятия решений по различным аспектам деятельности предприятия. При проектировании и реализации информационных систем речь должна идти о создании цифрового двойника объекта, а систему автоматизации следует рассматривать как часть единого информационного пространства предприятия.

Методологической основой создания моделей технологических процессов являются общая теория систем и системный анализ. При использовании этой методологии модель технологических процессов состоит из математических моделей не только отдельных элементов, но и взаимодействия между элементами и внешней средой, описываемых оператором взаимодействия (взаимосвязи). В идеале математическое описание каждого элемента должно включать уравнения, параметрами которых являются только физико-химические свойства веществ [3, 19 – 24]. Однако получить такое фундаментальное описание свойств всех элементов, их взаимосвязей при существующем уровне знаний и исследований некоторых явлений металлургических процессов не всегда представляется возможным.

В связи с этим требуется развитие других подходов для моделирования сложных технологических процессов в пирометаллургии. Оценивая в целом состояние реально функционирующих систем оптимального управления технологическими процессами и их комплексами в металлургии, следует констатировать, что существует внутренняя причина слабого внедрения систем такого класса, особенно сложных. Необходимо объединение современной теории оптимального управления с математическими моделями технологических процессов.

Проиллюстрируем эти положения на примере доменного процесса. В истории науки и техники отечественные ученые-доменщики оказались пионерами в области математического моделирования доменного процесса и создании систем автоматического управления технологическими процессами [25 – 32]. Современный уровень математического описания явлений в доменной печи не позволяет вскрыть все тонкости доменного процесса. Увеличение сложности модели, числа учитываемых факторов не всегда повышает надежность результатов моделирования. В силу изложенного прогноз показателей плавки и оценка хода основных процессов в печи могут эффективно выполняться на основе простых зависимостей для процессов тепло-, массообмена и газодинамики, совмещенных с балансовыми уравнениями, основанными на зональном рассмотрении процесса [25, 27, 30, 33]. Эти зависимости легко контролируются известными данными практики. При этом найдет применение натурная информация о работе доменной печи, появится возможность адаптации модели в темпе с процессом, а результаты моделирования можно будет легко контролировать по фактическим (натурным) данным. Использование отдельных статистических зависимостей (степени прямого восстановления железа от расхода восстановителей, степени использования оксида углерода от расхода топлива и др.) в балансовых методах по расчету расхода кокса положило начало развитию балансово-статистических методов моделирования доменного процесса. Для решения широкого класса задач в области анали-

за и прогнозирования доменной плавки, в частности, определения расхода кокса, производительности печи и других показателей доменной плавки эффективно используются материально-тепловые балансы и балансово-статистические методы, разработанные в Институте металлургии УрО РАН [34]. Аналогичные подходы используются и зарубежными учеными [35].

Перспективным для решения рассматриваемых задач оказался натурно-математический подход, разработанный в Сибирском государственном индустриальном университете [36]. В нем предусмотрено выделение двух моделей (базового состояния и прогнозирующей). Модель базового состояния по натурным данным о параметрах и показателях работы печи позволяет оценивать показатели состояния системы и использовать их для расчета коэффициентов настройки (адаптации) прогнозирующего блока модели. Прогнозирующая модель способна оценивать проектные показатели доменного процесса при изменении условий плавки относительно текущего состояния.

В основу модели теплового состояния современной доменной плавки Уральского федерального университета имени первого президента России Б.Н. Ельцина положены закономерности теплообмена [26, 37 – 39]. Последующее совершенствование модели доменного процесса на основе методологии системных исследований с учетом особенностей теплового, газодинамического, дутьевого и шлакового режимов, реально доступной информации о работе доменной печи, неравномерности распределения материалов и газов расширили возможности этой модели. Разработка программного обеспечения (ПО) с использованием современных технологий позволяет решить комплекс технологических задач по управлению доменной плавкой [40]. При разработке подсистем параметрической идентификации этих моделей широко использовали достижения других ведущих отечественных научных школ в области исследования и математического моделирования доменного процесса, а также хорошо проверенные на практике эмпирические уравнения.

Оригинальные положения интеллектуальной системы поддержки принятия решений по управлению доменной плавкой разработаны в Институте черной металлургии НАН Украины [41]. Система основывается на диагностике состояния плавки с использованием критериев оценки теплового состояния и газодинамического режима доменной плавки, эффективности осевой коксовой отдушины, оценки формы, положения и толщины пластичной зоны в доменной печи и других критериев, основанных на технологических параметрах доменной плавки и информации систем контроля.

В последнее время разработаны и встроены в математическую модель доменного процесса блоки учета динамики процесса, а также соответствующие алгоритмическое и программное обеспечения времени [42 – 44]. Используются линеаризованная модель

доменного процесса и натурно-математический подход, что позволяет осуществлять настройку модели на условия функционирования объекта, учитывать при моделировании изменения состава и свойств железорудного сырья и кокса, дутьевых и режимных параметров доменной плавки. Исследованы переходные процессы доменной плавки по различным каналам управления. Это позволило по данным изменения входных параметров во времени в проектный период осуществить прогнозирование газодинамического и теплового режимов доменной плавки и в частности, содержания кремния в чугуне и состава конечного шлака в режиме реального времени [44].

Анализ современного состояния управления доменной плавкой позволяет сделать вывод о необходимости повышения эффективности доменной плавки на основе разработки динамической подсистемы поддержки принятия решений и создания совокупности алгоритмов модельной системы поддержки принятия решений, позволяющих количественно оценивать ход доменной плавки и распознавать виды и вероятность отклонения плавки от нормального режима.

В последние десятилетия активно разрабатываются новые подходы к оценке состояния и управлению плохо структурированными технологическими процессами: экспертные системы, системы распознавания образов, нейросетевые технологии [38, 45 – 55]. В связи с этим требуется развитие других подходов для моделирования сложных технологических процессов в пирометаллургии, основанных на применении методов машинного обучения (*Machine Learning*) и интеллектуального анализа больших данных (*Big Data*). Целесообразность их использования обусловлена следующим: исключительной сложностью явлений, свойственных доменному процессу; существенным развитием теории моделирования знаний; созданием и наполнением в реальном времени мощных баз данных технологических параметров [53, 56, 57]. Перспективным направлением следует считать интеграцию опыта инженерно-технологического персонала по управлению доменной плавкой и методов математического моделирования, в основу которых положены фундаментальные физические представления о процессах доменной плавки. Подсистема диагностики состояния и отклонений хода доменной плавки от нормального режима в режиме реального времени отслеживает показатели доменной плавки и на их основе в численном выражении указывает на возможные отклонения от нормального режима. В случае обнаружения таких отклонений подсистема определяет их вид и вероятность возникновения [47, 58].

Для контроля ряда технологических параметров широко используется типовая стандартная аппаратура отечественного и импортного производств. За последнее десятилетие в отечественном и зарубежном доменном производстве опробованы специальные средства измерения технологических параметров, не применявшие-

ся ранее. Однако вопросы обеспечения достоверности первичных данных в системах контроля распределения материалов и газов, непрерывного контроля состава и физических свойств загружаемых в печь шихтовых материалов, жидких продуктов плавки на выпусках, контроля положения и формы зоны вязкопластичного состояния материалов остаются открытыми. Недостаточный уровень контроля важнейших параметров доменной плавки снижает эффективность работы систем моделирования: разработка соответствующих датчиков и измерительных систем является первоочередной задачей. Как уже отмечали ранее, интеграция технологии машинного зрения и математических детерминированных моделей отдельных явлений доменной плавки, в основу которых положены фундаментальные физические закономерности, позволит в перспективе решить эти задачи.

Анализ современного уровня знаний основных закономерностей доменного процесса, имеющихся технических средств контроля, существенное расширение возможностей компьютерной техники и области применения методов математического моделирования показывают, что наиболее перспективными методами для диагностики состояния доменной печи являются наряду с инструментальными расчетно-инструментальные и компьютерные. Приведем два примера таких решений.

Существующие методы аналитического расчета тепловых потерь, имеющих место при выплавке чугуна в доменных печах, не отражают реальный процесс плавки. Анализ теплового баланса нижней ступени теплообмена позволяет определять тепловые потери в этой зоне печи по текущей информации о работе печи в конкретных сырьевых и режимных параметрах их работы. В настоящее время на основе теплового баланса нижней ступени теплообмена разрабатывается соответствующее алгоритмическое и программное обеспечения подсистемы контроля тепловых потерь [59].

Неравномерное распределения дутья по фурмам приводит к разной протяженности фурменных очагов, что вызывает различие в скорости схода шихты в отдельных секторах печи, формируется деформированный газовый поток по сечению. Для оценки неравномерности разработан алгоритм прогнозирования параметров фурменных очагов и управления распределением дутьевых параметров по окружности доменной печи. Он включает расчет теплосъемов с каждой из фурм, скорости истечения дутья из фурм, кинетической энергии дутья, полной механической энергии потока дутья, протяженности зоны циркуляции и окислительной зоны, теоретической температуры горения. Для стабилизации теплового состояния в фурменных очагах требуется корректировка расхода природного газа на каждую фурму для сохранения теоретических температур горения на заданном уровне. Для решения этой задачи разработан соответствующий алгоритм управления [60].

ЦИФРОВЫЕ ПОМОЩНИКИ, ЦИФРОВЫЕ ДВОЙНИКИ КОМПЛЕКСА ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ АГРЕГАТОВ В ПИРОМЕТАЛЛУРГИИ

Создание цифровых помощников, цифровых двойников в пирометаллургии предусматривает существенное развитие алгоритмического и программного обеспечения для решения комплекса технологических задач не только на отдельных доменных печах, но и их комплексов на крупнейших металлургических предприятиях России. В целом анализ используемых математических моделей в практике технологии ведения доменной плавки показывает огромный разрыв между потенциальными возможностями средств автоматизации и возможностями используемого программного обеспечения. В ближайшие годы предстоит создание автоматизированной системы анализа и прогнозирования производственных ситуаций комплекса доменных печей и цеха в целом на основе разработки и применения новых методов и алгоритмов, позволяющих оценивать показатели работы доменных печей за любой требуемый период, а также прогнозирования работы доменных печей и цеха в целом при изменении технологических режимов. При постановке и решении требуются не только изучение характеристик, описывающих влияние изменения условий плавки на технико-экономические показатели плавки работы отдельных печей, но и детальный анализ для математического описания внешних и внутренних ограничений. Осуществляется разработка на металлургических предприятиях сложной экономико-математической модели и программного обеспечения по оптимальному управлению технологии доменного цеха [61 – 65]. Такие системы предоставляют цифрового помощника для наблюдения за всем циклом производства чугуна и стали, а также поддержки принятия решений для достижения требуемых ключевых показателей эффективности (производительности, стоимости и качества продукции). Так, на ПАО «Магнитогорский металлургический комбинат» для решения этих задач разрабатывается автоматизированная система анализа и прогнозирования производственных ситуаций доменного цеха, в которой реализованы следующие подсистемы [66], осуществляющие:

- формирование и сопоставление отчетных показателей работы доменного цеха, расчета материальных балансов, балансов отдельных элементов, что позволит оперативно получать достоверную информацию для контроля и сравнения отчетных показателей работы доменных печей и цеха в целом в разные периоды;
- анализ и прогнозирование теплового режима доменной плавки, включая блоки расчета теплового баланса, комплекса показателей тепловых режимов, расхода кокса в базовом и проектном периодах работы доменных печей в случае планируемого изменения видов и свойств железорудного сырья, флюсов, дутьевых параметров, состава жидких продуктов плавки;

- анализ и прогнозирование шлакового режима доменной плавки, включая блоки расчета состава и свойств конечного шлака в базовом и проектном периодах работы доменных печей в случае планируемого изменения видов и свойств железорудного сырья, флюсов, дутьевых параметров, состава жидких продуктов плавки;
- анализ и прогнозирование газодинамического и дутьевого режимов доменной плавки в базовом и проектном периодах работы доменных печей при планируемых изменениях видов и свойств железорудного сырья, дутьевых и других параметров;
- выбор оптимального состава доменной шихты, что позволяет с учетом заданных технологических ограничений на шлаковый, газодинамический и тепловой режимы доменных печей определять необходимое соотношение шихтовых материалов, расход флюсов и состав агломерата для обеспечения его заданной основности;
- оптимальное распределение топливно-энергетических ресурсов в группе доменных печей в различных технологических ситуациях (сохранение или изменение общего расхода природного газа, кислорода, кокса для цеха в целом, а также изменение конъюнктуры рынка), отличающееся учетом технологических ограничений на работу отдельных печей.

ИСПОЛЬЗОВАНИЕ СОВРЕМЕННОЙ МЕТОДОЛОГИИ РАЗРАБОТКИ И СОПРОВОЖДЕНИЯ ПРОГРАММНОГО ОБЕСПЕЧЕНИЯ

При разработке ПО, предназначенного для работы инженерно-технологического персонала предприятий, необходимо учитывать следующие основные требования: функциональность, надежность функционирования, удобство использования и доступность, эффективность и переносимость. Такие требования обеспечивают оперативный доступ к информации при сохранении функциональных возможностей и надежности ПО и реализованы при создании веб-приложений.

С учетом требований к ПО необходимо использование современных подходов и средств при создании программного обеспечения. В их основе должны лежать методология функционального моделирования процессов и подсистем IDEF0 [67], инфологическое моделирование базы данных подсистем с использованием CASE-средств, а также проектирование расчетных блоков математических моделей на основе принципов структурного системного анализа и формализации процедурно-ориентированного подхода в виде диаграмм потоков данных DFD и спецификация к DFD-диаграммам [68].

К программному обеспечению для работы инженерно-технологического персонала на металлургических предприятиях относятся автоматизированные рабочие места, системы поддержки принятия решений, информационно-моделирующие системы, экспертные систе-

мы и др. Такие системы представляют собой веб-приложения [69], предусматривают многопользовательский доступ, а также разграничение прав пользователей. Составные элементы этих систем включают обработку технологической информации, поступающей с серверов управления базами данных (СУБД) и необходимость решения комплекса задач математического программирования, систем дифференциальных уравнений, задач математической физики и др. Такие задачи решаются на основе интеграции со специализированными математическими пакетами Microsoft Excel, MATLAB [70].

Для интеграции ПО с другими системами используется программный интерфейс *Application Program Interface (API)*. В рамках этого интерфейса взаимодействие между системами осуществляется по протоколу HTTP с использованием простого формата обмена данными JSON (*JavaScript Object Notation*).

Выводы

Одним из основных направлений цифровой трансформации пирометаллургических технологий является

создание интеллектуальных систем управления технологическим процессом агрегатов и их комплексов в металлургии в режиме реального времени.

Анализ состояния вопроса по реально используемым математическим моделям в практике показывает в настоящее время огромный разрыв между потенциальными возможностями средств автоматизации и реальными возможностями используемого программного обеспечения.

Первостепенные задачи при цифровой трансформации пирометаллургических технологий сводятся к следующему: совершенствование существующих и разработка новых методов получения и оценки достоверности информации о состоянии технологического процесса; использование современных достижений в области математического моделирования, моделирования знаний, теории и практики современной металлургии, теории управления при разработке автоматизированных систем управления; разработка на основе современных принципов соответствующего математического, алгоритмического и программного обеспечения.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

REFERENCES

1. Digital Twin // Gartner Glossary. [Электронный ресурс]. URL: <https://www.gartner.com/en/information-technology/glossary/digital-twin> (дата обращения 05.08.2021).
2. Цифровой двойник. Digital Twin of Organization, DTO // TADVISER. Государство. Бизнес. [Электронный ресурс]. URL: [http://www.tadviser.ru/index.php/Статья:Цифровой_двойник_\(Digital_Twin\)](http://www.tadviser.ru/index.php/Статья:Цифровой_двойник_(Digital_Twin)) (дата обращения 05.08.2021).
3. Цымбал В.П. Математическое моделирование сложных систем в металлургии. Кемерово; М.: изд. объединение «Российские университеты»; Кузбассвузиздат – АСТШ, 2006. 431 с.
4. Дмитриев А.Н., Золотых М.О., Витькина Г.Ю. Совершенствование аглококсодомногого производства с использованием цифровых технологий в рамках «Индустрии 4.0» // Черная металлургия. Бюллетень научно-технической и экономической информации. 2020. Т. 6. № 4. С. 339–345. <https://doi.org/10.32339/0135-5910-2020-4-339-343>
5. Stockman G., Shapiro L.G. Computer Vision. Prentice Hall PTR. Upper Saddle River, United States. 2001. 608 p.
6. Машинное (техническое) зрение. Metallurgy // Mallenom Systems. [Электронный ресурс]. URL: <https://www.mallenom.ru/resheniya/mashinnoe-zrenie/po-otroslyam/metallurgii> (дата обращения 05.08.2021).
7. Северсталь осваивает изготовление систем видеосинтеза поверхности проката // ИИС «Металлоснабжение и сбыт». [Электронный ресурс]. URL: <https://www.metalinfo.ru/ru/news/118725> (дата обращения 05.08.2021).
8. Контроль положения горячекатаных рулонов на конвейере // Mallenom Systems. [Электронный ресурс]. Режим доступа: <https://www.mallenom.ru/vnedrenia/pnz/metallurgy2> (дата обращения 05.08.2021).
9. Группа ЧТПЗ внедрила новую технологию испытания труб на основе машинного зрения // Пресс-центр группы «ЧТПЗ». [Электронный ресурс]. URL: <https://chelpipe.ru/press-center/gruppa-chnpz-vnedrila-novuyu-tehnologiyu-ispytaniya-trub-na-osnove-mashinnogo-zreniya/> (дата обращения 05.08.2021).
10. Форум «Информационные технологии в металлургии и металлообработке» // Форум «ИТМЕТАЛЛ». [Электронный ресурс]. URL: <https://итметалл.рф/> (дата обращения 05.08.2021).
1. Digital Twin. *Gartner Glossary*. [Electronic resource]. Available at URL: <https://www.gartner.com/en/information-technology/glossary/digital-twin> (Accessed 05.08.2021).
2. Digital twin. Digital Twin of Organization, DTO. *TADVISER. State. Business*. [Electronic resource]. Available at URL: [http://www.tadviser.ru/index.php/Статья:Цифровой_двойник_\(Digital_Twin\)](http://www.tadviser.ru/index.php/Статья:Цифровой_двойник_(Digital_Twin)) (Accessed 05.08.2021).
3. Tsybmal V.P. *Mathematical Modeling of Complex Systems in Metallurgy*. Kemerovo; Moscow: Rossiiskie universitety; Kuzbassvuzizdat–ASTSh, 2006, 431 p. (In Russ.).
4. Dmitriev A.N., Zolotikh M.O., Vit'kina G.Yu. Improvement of sintering and blast-furnace production using digital technologies within the framework of Industry 4.0. *Chernaya metallurgiya. Bulletin of Scientific, Technical and Economic Information*. 2020, vol. 6, no. 4, pp. 339–345. (In Russ.). <https://doi.org/10.32339/0135-5910-2020-4-339-343>
5. Stockman G., Shapiro L.G. *Computer Vision*. Prentice Hall PTR. Upper Saddle River, United States, 2001, 608 p.
6. Machine (technical) vision. Metallurgy. *Mallenom Systems*. [Electronic resource]. Available at URL: <https://www.mallenom.ru/resheniya/mashinnoe-zrenie/po-otroslyam/metallurgii> (Accessed 05.08.2021). (In Russ.).
7. Severstal is mastering manufacture of video inspection systems for rolled surfaces. *Metal Supply and Sales*. [Electronic resource]. Available at URL: <https://www.metalinfo.ru/ru/news/118725> (Accessed 05.08.2021). (In Russ.).
8. Control of position of hot-rolled coils on a conveyor. *Mallenom Systems*. [Electronic resource]. Available at URL: <https://www.mallenom.ru/vnedrenia/pnz/metallurgy2> (Accessed 05.08.2021). (In Russ.).
9. The ChelPipe Group has introduced a new technology for testing pipes based on machine vision. *Press Center of the ChelPipe Group*. [Electronic resource]. Available at URL: <https://chelpipe.ru/press-center/gruppa-chnpz-vnedrila-novuyu-tehnologiyu-ispytaniya-trub-na-osnove-mashinnogo-zreniya/> (Accessed 05.08.2021). (In Russ.).
10. Forum “Information Technologies in Metallurgy and Metalworking”. *ITMETALL Forum*. [Electronic resource]. Available at URL: <https://итметалл.рф/> (Accessed 10.01.2021). (In Russ.).

11. ТВ-ММК. Лидер цифровизации. Эфир: 17-12-2020 // YouTube Видеохостинг. [Электронный ресурс]. URL: <https://www.youtube.com/watch?v=7opclYs93dA> (дата обращения 10.01.2021).
12. Pan D., Jiang Z., Chen Z., Gui W., Xie Y., Yang C. Temperature measurement method for blast furnace molten iron based on infrared thermography and temperature reduction model // *Sensors*. 2018. Vol. 18. No. 11. Article 3792. <https://doi.org/10.3390/s18113792>
13. Usamentiaga R., Molleda J., Garcia D., Granda J.C., Rendueles J.L. Temperature measurement of molten pig iron with slag characterization and detection using infrared computer vision // *IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement*. 2012. Vol. 61. No. 5. P. 1149–1159. <https://doi.org/10.1109/TIM.2011.2178675>
14. Shi L., Wen Y.-B., Zhao G.-S., Yu T. Recognition of blast furnace gas flow center distribution based on infrared image processing // *Journal of Iron and Steel Research International*. 2016. Vol. 23. No. 3. P. 203–209. [https://doi.org/10.1016/S1006-706X\(16\)30035-8](https://doi.org/10.1016/S1006-706X(16)30035-8)
15. Zhu Q., Lü C.-L., Yin Y.-X., Chen X.-Z. Burden distribution calculation of bell-less top of blast furnace based on multi-radar data // *Journal of Iron and Steel Research International*. 2013. Vol. 20. No. 6. P. 33–37. [https://doi.org/10.1016/S1006-706X\(13\)60108-9](https://doi.org/10.1016/S1006-706X(13)60108-9)
16. Спирин Н.А., Овчинников Ю.Н., Швыдкий В.С., Ярошенко Ю.Г. Теплообмен и повышение эффективности доменной плавки. Екатеринбург: изд. Уральского государственного технического университета, 1995. 243 с.
17. Ишметьев Е.Н., Салихов З.Г., Щетинин А.П., Будадин З.Г. Автоматическая диагностика эксплуатационного состояния опасных зон пирометаллургического агрегата // *Известия вузов. Черная металлургия*. 2010. № 1. С. 58–61.
18. Spirin N.A., Shvydkii V.S., Ovchinnikov Yu.N., Lavrov V.V., Gusev A.A. Mathematical modeling of heat transfer in blast furnace raceway // *Steel in Translation*. 1998. Vol. 28. No. 4. P. 5–8.
19. Abhale P.B., Viswanathan N.N., Saxen H. Numerical modelling of blast furnace – Evolution and recent trends // *Mineral Processing and Extractive Metallurgy: Transactions of the Institute of Mining and Metallurgy*. 2020. Vol. 129. No. 2. P. 166–83. <https://doi.org/10.1080/25726641.2020.1733357>
20. Bambauer F., Wirtz S., Scherer V., Bartusch H. Transient DEM-CFD simulation of solid and fluid flow in a three dimensional blast furnace model // *Powder Technology*. 2018. Vol. 334. P. 53–64. <https://doi.org/10.1016/j.powtec.2018.04.062>
21. Fu D., Chen Y., Rahman M.T., Zhou C.Q., D'Alessio J., Ferron K.J. Validation of the numerical model for blast furnace shaft process // *AISTech – Iron and Steel Technology Conference Proceedings*. 2012. Article 92531. P. 417–427.
22. De Castro J.A., Nogami H., Yagi J.-I. Three-dimensional multiphase mathematical modeling of the blast furnace based on the multifluid model // *ISIJ International*. 2002. Vol. 42. No. 1. P. 44–52. <https://doi.org/10.2355/isijinternational.42.44>
23. Peacey J.G., Davenport W.G. *The iron blast furnace: theory and practice*. Elsevier Science, 2013. 266 p.
24. Baniyadi M., Peters B. Preliminary investigation on the capability of eXtended discrete element method for treating the dripping zone of a blast furnace // *ISIJ International*. 2018. Vol. 58. No 1. P. 25–34. <https://doi.org/10.2355/isijinternational.ISIJINT-2017-344>
25. Рамм А.Н. Современный доменный процесс. М.: Металлургия, 1980. 304 с.
26. Теплотехника доменного процесса / Б.И. Китаев, Ю.Г. Ярошенко, Е.Л. Суханов, Ю.Н. Овчинников, В.С. Швыдкий. М.: Металлургия, 1978. 248 с.
27. Товаровский И.Г. Доменная плавка. Днепропетровск: Пороги, 2009. 768 с.
28. Большаков В.И. Технология высокоэффективной энергосберегающей доменной плавки. Киев: Наукова думка, 2007. 411 с.
29. Андронов В.Н. Экстракция черных металлов из природного и техногенного сырья. Доменный процесс. Донецк: Норд-Пресс, 2009. 377 с.
30. Бабарыкин Н.Н. Теория и технология доменного процесса. Магнитогорск: МГТУ, 2009. 257 с.
11. TV-MMK. Leader of digitalization. Air: 17-12-2020: YouTube Video hosting. [Electronic resource]. Available at URL: <https://www.youtube.com/watch?v=7opclYs93dA> (Accessed 05.08.2021). (In Russ.).
12. Pan D., Jiang Z., Chen Z., Gui W., Xie Y., Yang C. Temperature measurement method for blast furnace molten iron based on infrared thermography and temperature reduction model. *Sensors*. 2018, vol. 18, no. 11, article 3792. <https://doi.org/10.3390/s18113792>
13. Usamentiaga R., Molleda J., Garcia D., Granda J.C., Rendueles J.L. Temperature measurement of molten pig iron with slag characterization and detection using infrared computer vision. *IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement*. 2012, vol. 61, no. 5, pp. 1149–1159. <https://doi.org/10.1109/TIM.2011.2178675>
14. Shi L., Wen Y.-B., Zhao G.-S., Yu T. Recognition of blast furnace gas flow center distribution based on infrared image processing. *Journal of Iron and Steel Research International*. 2016, vol. 23, no. 3, pp. 203–209. [https://doi.org/10.1016/S1006-706X\(16\)30035-8](https://doi.org/10.1016/S1006-706X(16)30035-8)
15. Zhu Q., Lü C.-L., Yin Y.-X., Chen X.-Z. Burden distribution calculation of bell-less top of blast furnace based on multi-radar data. *Journal of Iron and Steel Research International*. 2013, vol. 20, no. 6, pp. 33–37. [https://doi.org/10.1016/S1006-706X\(13\)60108-9](https://doi.org/10.1016/S1006-706X(13)60108-9)
16. Spirin N.A., Ovchinnikov Yu.N., Shvydkii V.S., Yaroshenko Yu.G. *Heat Transfer and Improving the Efficiency of Blast-Furnace Smelting*. Yekaterinburg: izd. Ural'skogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta, 1995, 243 p. (In Russ.).
17. Ishmetyev E.N., Salikhov Z.G., Shchetinin A.P., Budadin Z.G. Automatic diagnostics of the operational state of pyrometallurgical unit hazardous zones. *Izvestiya. Ferrous metallurgy*. 2010, no. 1, pp. 58–61.
18. Spirin N.A., Shvydkii V.S., Ovchinnikov Yu.N., Lavrov V.V., Gusev A.A. Mathematical modeling of heat transfer in blast furnace raceway. *Steel in Translation*. 1998, vol. 28, no. 4, pp. 5–8.
19. Abhale P.B., Viswanathan N.N., Saxen H. Numerical modelling of blast furnace – Evolution and recent trends. *Mineral Processing and Extractive Metallurgy: Transactions of the Institute of Mining and Metallurgy*. 2020, vol. 129, no. 2, pp. 166–83. <https://doi.org/10.1080/25726641.2020.1733357>
20. Bambauer F., Wirtz S., Scherer V., Bartusch H. Transient DEM-CFD simulation of solid and fluid flow in a three dimensional blast furnace model. *Powder Technology*. 2018, vol. 334, pp. 53–64. <https://doi.org/10.1016/j.powtec.2018.04.062>
21. Fu D., Chen Y., Rahman M.T., Zhou C.Q., D'Alessio J., Ferron K.J. Validation of the numerical model for blast furnace shaft process. *AISTech – Iron and Steel Technology Conference Proceedings*. 2012, article 92531, pp. 417–427.
22. De Castro J.A., Nogami H., Yagi J.-I. Three-dimensional multiphase mathematical modeling of the blast furnace based on the multifluid model. *ISIJ International*. 2002, vol. 42, no. 1, pp. 44–52. <https://doi.org/10.2355/isijinternational.42.44>
23. Peacey J.G., Davenport W.G. *The Iron Blast Furnace: Theory and Practice*. Elsevier Science, 2013, 266 p.
24. Baniyadi M., Peters B. Preliminary investigation on the capability of eXtended discrete element method for treating the dripping zone of a blast furnace. *ISIJ International*. 2018, vol. 58, no 1, pp. 25–34. <https://doi.org/10.2355/isijinternational.ISIJINT-2017-344>
25. Ramm A.N. *Modern Blast Furnace Process*. Moscow: Metallurgiya, 1980, 304 p. (In Russ.).
26. Kitaev B.I., Yaroshenko Yu.G., Sukhanov E.L., Ovchinnikov Yu.N., Shvydkii V.S. *Heat Engineering of Blast Furnace*. Moscow: Metallurgiya, 1978, 248 p. (In Russ.).
27. Tovarovskii I.G. *Blast Furnace Smelting*. Dnepropetrovsk: Porogi, 2009, 768 p. (In Russ.).
28. Bol'shakov V.I. *Technology of High-Efficiency Energy-Saving Blast Furnace Smelting*. Kiev: Naukova dumka, 2007, 411 p. (In Russ.).
29. Andronov V.N. *Extraction of Ferrous Metals from Natural and Technogenic Raw Materials. Blast Furnace Process*. Donetsk: Nord-Press, 2009, 377 p. (In Russ.).
30. Babarykin N.N. *Theory and Technology of Blast Furnace Process*. Magnitogorsk: MSTU, 2009, 257 p. (In Russ.).

31. Дмитриев А.Н. Математическое моделирование доменного процесса. Екатеринбург: УрО РАН, 2011. 162 с.
32. Доброскок В.А., Кузнецов Н.А., Туманов А.И. Математические модели процессов газодинамики и восстановления в доменной печи // Известия вузов. Черная металлургия. 1985. № 3. С. 145, 146.
33. Курунов И.Ф., Ященко С.Б. Методика расчета технико-экономических показателей доменной плавки // Научные труды Московского института стали и сплавов. 1983. № 152. С. 57–64.
34. Ченцов А.В., Чесноков Ю.А., Шаврин С.В. Балансовая логико-статистическая модель доменного процесса. Екатеринбург: УрО РАН, 2003. 176 с.
35. Ueda S., Natsui S., Nogami H., Yagi J.-I., Ariyama T. Recent progress and future perspective on mathematical modeling of blast furnace // *ISIJ International*. 2010. Vol. 50. No. 7. P. 914–923. <https://doi.org/10.2355/isijinternational.50.914>
36. Теория и практика прогнозирования в системах управления / С.В. Емельянов, С.К. Коровин, Л.П. Мышляев, А.С. Рыков, В.Ф. Евтушенко. М.: Российские университеты, 2008. 487 с.
37. Загайнов С.А., Онорин О.П., Гилева Л.Ю., Волков Д.Н., Тлеугобулов Б.С. Разработка и внедрение математического и программного обеспечения для гибких технологических режимов работы доменных печей // *Сталь*. 2000. № 9. С. 12–15.
38. Информационные системы в металлургии / Н.А. Спири́н, Ю.В. Ипатов, В.И. Лобанов, В.А. Краснобаев, В.В. Лавров, В.Ю. Рыболовлев, В.С. Швыдкий, С.А. Загайнов, О.П. Онорин. Екатеринбург: изд. УГТУ–УПИ, 2001. 617 с.
39. Математическое моделирование металлургических процессов в АСУ ТП / Н.А. Спири́н, В.В. Лавров, В.Ю. Рыболовлев, Л.Ю. Гилева, А.В. Краснобаев, В.С. Швыдкий, О.П. Онорин, К.А. Щипанов, А.А. Буркин. Екатеринбург: УрФУ, 2014. 558 с.
40. Pavlov A.V., Polinov A.A., Spirin N.A., Onorin O.P., Lavrov V.V. Use of model systems for solving new technological problems in blast-furnace production // *Metallurgist*. 2017. Vol. 61. No. 5-6. P. 448–454. <https://doi.org/10.1007/s11015-017-0516-7>
41. Муравьева И.Г., Тогобитская Д.Н., Нестеров А.С., Иванча Н.Г. Новый уровень управления доменной плавкой в разработках ИЧМ // *Черная металлургия. Бюллетень научно-технической и экономической информации*. 2019. Т. 75. № 11. С. 1231–1236. <https://doi.org/10.32339/0135-5910-2019-11-1231-1236>
42. Hashimoto Y., Kitamura Y., Ohashi T., Sawa Y., Kano M. Transient model-based operation guidance on blast furnace // *Control Engineering Practice*. 2019. Vol. 82. P. 130–141. <https://doi.org/10.1016/j.conengprac.2018.10.009>
43. Saxen H., Gao C., Gao Z. Data-driven time discrete models for dynamic prediction of the hot metal silicon content in the blast furnace – A review // *IEEE Transactions on Industrial Informatics*. 2013. Vol. 9. No. 4. Article 6341833. P. 2213–2225. <https://doi.org/10.1109/TII.2012.2226897>
44. Spirin N.A., Polinov A.A., Gurin I.A., Beginyuk V.A., Pishnograev S.N., Istomin A.S. Information system for real-time prediction of the silicon content of iron in a blast furnace // *Metallurgist*. 2020. Vol. 63. No. 9-10. P. 898–905. <https://doi.org/10.1007/s11015-020-00907-y>
45. Френкель М.М., Федулов Ю.В., Белова О.А. и др. Экспертная система управления ходом доменной плавки // *Сталь*. 1992. № 7. С. 15–18.
46. Соловьев В.И., Павлова Е.А., Краснобаев В.А. Интеллектуальная автоматизированная система управления металлургическими агрегатами // *Черные металлы*. 2004. № 7-8. С. 26–29.
47. Spirin N.A., Onorin O.P., Istomin A.S., Lavrov V.V., Gurin I.A. Information modelling system for diagnostics of different types of blast-furnace smelting deviations from normal conditions // *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*. 2018. Vol. 411. No. 1. Article 012072. <https://doi.org/10.1088/1757-899X/411/1/012072>
48. Ge A.X. A Neural Network Approach to the Modeling of Blast Furnace: Thesis (M. Eng.). Massachusetts Institute of Technology, 1999. 69 p.
31. Dmitriev A.N. *Mathematical Modeling of Blast Furnace Process*. Yekaterinburg: UB RAS, 2011, 162 p. (In Russ.).
32. Dobroskok V.A., Kuznetsov N.A., Tumanov A.I. Mathematical models of gas dynamics and reduction processes in a blast furnace. *Izvestiya. Ferrous Metallurgy*. 1985, no. 3, pp. 145, 146. (In Russ.).
33. Kurunov I.F., Yashchenko S.B. Methodology for calculating the technical and economic indicators of blast-furnace smelting. *Nauchnye trudy Moskovskogo instituta stali i splavov*. 1983, no. 152, pp. 57–64. (In Russ.).
34. Chentsov A.V., Chesnokov Yu.A., Shavrin S.V. *Balance Logical-Statistical Model of Blast-Furnace Process*. Yekaterinburg: UB RAS, 2003, 176 p. (In Russ.).
35. Ueda S., Natsui S., Nogami H., Yagi J.-I., Ariyama T. Recent progress and future perspective on mathematical modeling of blast furnace. *ISIJ International*. 2010, vol. 50, no. 7, pp. 914–923. <https://doi.org/10.2355/isijinternational.50.914>
36. Emel'yanov S.V., Korovin S.K., Myshlyayev L.P., Rykov A.S., Evtushenko V.F. *Theory and Practice of Prediction in Control Systems*. Moscow: Rossiiskie universitety, 2008, 487 p. (In Russ.).
37. Zagainov S.A., Onorin O.P., Gileva L.Yu., Volkov D.N., Tleugobulov B.S. Development and implementation of mathematical and software support for flexible technological modes of blast furnace operation. *Stal'*. 2000, no. 9, pp. 12–15. (In Russ.).
38. Spirin N.A., Ipatov Yu.V., Lobanov V.I., Krasnobayev V.A., Lavrov V.V., Rybolovlev V.Yu., Shvydkii V.S., Zagainov S.A., Onorin O.P. *Information Systems in Metallurgy*. Yekaterinburg: izd. USTU–UPI, 2001, 617 p. (In Russ.).
39. Spirin N.A., Lavrov V.V., Rybolovlev V.Yu., Gileva L.Yu., Krasnobayev A.V., Shvydkii V.S., Onorin O.P., Shchipanov K.A., Burykin A.A. *Mathematical Modeling of Metallurgical Processes in APCs*. Yekaterinburg: UrFU, 2014, 558 p. (In Russ.).
40. Pavlov A.V., Polinov A.A., Spirin N.A., Onorin O.P., Lavrov V.V. Use of model systems for solving new technological problems in blast-furnace production. *Metallurgist*. 2017, vol. 61, no. 5-6, pp. 448–454. <https://doi.org/10.1007/s11015-017-0516-7>
41. Murav'eva I.G., Togobitskaya D.N., Nesterov A.S., Ivancha N.G. A new level of blast furnace smelting control in FMI developments. *Chernaya metallurgiya. Bulletin of Scientific, Technical and Economic Information*. 2019, vol. 75, no. 11, pp. 1231–1236. (In Russ.). <https://doi.org/10.32339/0135-5910-2019-11-1231-1236>
42. Hashimoto Y., Kitamura Y., Ohashi T., Sawa Y., Kano M. Transient model-based operation guidance on blast furnace. *Control Engineering Practice*. 2019, vol. 82, pp. 130–141. <https://doi.org/10.1016/j.conengprac.2018.10.009>
43. Saxen H., Gao C., Gao Z. Data-driven time discrete models for dynamic prediction of the hot metal silicon content in the blast furnace – A review. *IEEE Transactions on Industrial Informatics*. 2013, vol. 9, no. 4, article 6341833, pp. 2213–2225. <https://doi.org/10.1109/TII.2012.2226897>
44. Spirin N.A., Polinov A.A., Gurin I.A., Beginyuk V.A., Pishnograev S.N., Istomin A.S. Information system for real-time prediction of the silicon content of iron in a blast furnace. *Metallurgist*. 2020, vol. 63, no. 9-10, pp. 898–905. <https://doi.org/10.1007/s11015-020-00907-y>
45. Frenkel' M.M., Fedulov Yu.V., Belova O.A., etc. Expert control system for blast furnace smelting. *Stal'*. 1992, no. 7, pp. 15–18. (In Russ.).
46. Solov'ev V.I., Pavlova E.A., Krasnobayev V.A. Intelligent automated control system for metallurgical units. *Chernye metalli*. 2004, no. 7-8, pp. 26–29.
47. Spirin N.A., Onorin O.P., Istomin A.S., Lavrov V.V., Gurin I.A. Information modelling system for diagnostics of different types of blast-furnace smelting deviations from normal conditions. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*. 2018, vol. 411, no. 1, article 012072. <https://doi.org/10.1088/1757-899X/411/1/012072>
48. Ge A.X. *A Neural Network Approach to the Modeling of Blast Furnace: Thesis (M. Eng.)*. Massachusetts Institute of Technology, 1999, 69 p.

49. Chen J. Predictive system for blast furnaces by integrating a neural network with qualitative analysis // *Engineering Applications of Artificial Intelligence*. 2001. Vol. 14. No. 1. P. 77–85.
[https://doi.org/10.1016/S0952-1976\(00\)00062-2](https://doi.org/10.1016/S0952-1976(00)00062-2)
50. Jimenez J., Mochon J., De Ayala J.S., Obeso F. Blast furnace hot metal temperature prediction through neural networks-based models // *ISIJ International*. 2004. Vol. 44. No. 3. P. 573–580.
<https://doi.org/10.2355/isijinternational.44.573>
51. Сибигагуллин С.К., Харченко А.С., Девятченко Л.Д. Приложение марковских цепей к анализу эффективности работы доменной печи // *Известия вузов. Черная металлургия*. 2018. Т. 61. № 8. С. 649–656. <https://doi.org/10.17073/0368-0797-2018-8-649-656>
52. Кулаков С.М., Трофимов В.Б. Интеллектуальные системы управления технологическими объектами: теория и практика. Новокузнецк: изд. СибГИУ, 2009. 223 с.
53. Xie H., Wang J., Wang G., Xiao-dong Sun X.-D. Application of big data in optimization of blast furnace operation // *AISTech 2019 – Proceedings of the Iron & Steel Technology Conference*. 2019. Vol. 2019-May. P. 587–591. <https://doi.org/10.33313/377/062>
54. Zhang Y., Sukhram M., Cameron I., Bolen J., Roza A. Industrial perspective of digital twin development and applications for iron and steel processes // *AISTech – Iron and Steel Technology Conference Proceedings*. 2020. Vol. 3. P. 1975–1984.
<https://doi.org/10.33313/380/213>
55. Cameron I., Sukhram M., Lefebvre K., Davenport W. Blast furnace ironmaking: analysis, control and optimization. 1st ed. Elsevier Science. 2019. 828 p. <https://doi.org/10.1016/C2017-0-00007-1>
56. Kazarinov L.S., Barbasova T.A. Elliptic component analysis. In: 2nd International Conference on Industrial Engineering, Applications and Manufacturing. ICIEAM. 2016. Article 7910936.
<https://doi.org/10.1109/ICIEAM.2016.7910936>
57. Shnayder D.A., Kazarinov L.S., Barbasova T.A., Lipatnikov A.V. Data mining and model-predictive approach for blast furnace thermal control // *Intelligent Systems Conference. IntelliSys*. 2017. Vol. 2018 – January. Article 8324364. P. 653–660.
<https://doi.org/10.1109/IntelliSys.2017.8324364>
58. Kamo K., Hamamoto K., Maeda T., Narazaki H., Yakeya M., Tanaka Y. Method for predicting gas channeling in blast furnace // *R and D: Research and Development Kobe Steel Engineering Reports*. 2018. Vol. 68. No. 2. P. 7–11.
59. Onorin O.P., Polinov A.A., Pavlov A.V., Spirin N.A., Gurin I.A. About a possibility of using blast furnace heat balance to control heat losses // *Metallurgist*. 2018. Vol. 62. No. 3-4. P. 218–224.
<https://doi.org/10.1007/s11015-018-0648-4>
60. Polinov A.A., Pavlov A.V., Onorin O.P., Spirin N.A., Gurin I.A. Blast distribution over the air tuyeres of a blast furnace // *Metallurgist*. 2018. Vol. 62. No. 5-6. P. 418–424.
<https://doi.org/10.1007/s11015-018-0676-0>
61. Kuang S., Li Z., Yu A. Review on modeling and simulation of blast furnace // *Steel Research International*. 2018. Vol. 89. No. 1. Article 1700071. <https://doi.org/10.1002/srin.201700071>
62. Pettersson F., Saxen H. Model for economic optimization of iron production in the blast furnace // *ISIJ International*. 2006. Vol. 46. No. 9. P. 1297–1305. <https://doi.org/10.2355/isijinternational.46.1297>
63. Gordon Y., Izumskiy N., Matveenko G., Chaika O., Lebid V., Vyshinskya O. Diagnostics, optimization and mathematical models of coke-sinter-hot metal production process // *AISTech 2019 – Proceedings of the Iron & Steel Technology Conference*. 2019. Vol. 2019 – May. P. 479–484. <https://doi.org/10.33313/377/050>
64. Bettinger D., Fritschek H., Schaler M., Kronberger T., Wollhofen R. A holistic approach to ironmaking digitalization // *AISTech 2019 – Proceedings of the Iron & Steel Technology Conference*. 2019. Vol. 2019 – May. P. 577–585. <https://doi.org/10.33313/377/061>
65. Alter M.A. Optimization of parameters of blast furnace smelting under conditions of plant operation with limited supply of coke, natural gas or iron-bearing materials // *AISTech – Iron and Steel Technology Conference Proceedings*. 2020. Vol. 1. P. 302–309.
<https://doi.org/10.33313/380/035>
49. Chen J. Predictive system for blast furnaces by integrating a neural network with qualitative analysis. *Engineering Applications of Artificial Intelligence*. 2001, vol. 14, no. 1, pp. 77–85.
[https://doi.org/10.1016/S0952-1976\(00\)00062-2](https://doi.org/10.1016/S0952-1976(00)00062-2)
50. Jimenez J., Mochon J., De Ayala J.S., Obeso F. Blast furnace hot metal temperature prediction through neural networks-based models. *ISIJ International*. 2004, vol. 44, no. 3, pp. 573–580.
<https://doi.org/10.2355/isijinternational.44.573>
51. Sibagatullin S.K., Kharchenko A.S., Devyatchenko L.D. Application of Markov chains to the analysis of blast furnace operation efficiency. *Izvestiya. Ferrous Metallurgy*. 2018, vol. 61, no. 8, pp. 649–656. <https://doi.org/10.17073/0368-0797-2018-8-649-656>
52. Kulakov S.M., Trofimov V.B. *Intelligent Control Systems for Technological Objects: Theory and Practice*. Novokuznetsk: SibSIU, 2009, 223 p. (In Russ.).
53. Xie H., Wang J., Wang G., Xiao-dong Sun X.-D. Application of big data in optimization of blast furnace operation. *AISTech 2019 – Proceedings of the Iron & Steel Technology Conference*. 2019, vol. 2019-May, pp. 587–591. <https://doi.org/10.33313/377/062>
54. Zhang Y., Sukhram M., Cameron I., Bolen J., Roza A. Industrial perspective of digital twin development and applications for iron and steel processes. *AISTech – Iron and Steel Technology Conference Proceedings*. 2020, vol. 3, pp. 1975–1984.
<https://doi.org/10.33313/380/213>
55. Cameron I., Sukhram M., Lefebvre K., Davenport W. *Blast Furnace Ironmaking: Analysis, Control and Optimization*. 1st ed. Elsevier Science, 2019, 828 p. <https://doi.org/10.1016/C2017-0-00007-1>
56. Kazarinov L.S., Barbasova T.A. Elliptic component analysis. In: 2nd International Conference on Industrial Engineering, Applications and Manufacturing. ICIEAM. 2016, article 7910936.
<https://doi.org/10.1109/ICIEAM.2016.7910936>
57. Shnayder D.A., Kazarinov L.S., Barbasova T.A., Lipatnikov A.V. Data mining and model-predictive approach for blast furnace thermal control. *Intelligent Systems Conference. IntelliSys*. 2017, vol. 2018 – January, article 8324364, pp. 653–660.
<https://doi.org/10.1109/IntelliSys.2017.8324364>
58. Kamo K., Hamamoto K., Maeda T., Narazaki H., Yakeya M., Tanaka Y. Method for predicting gas channeling in blast furnace. *R and D: Research and Development Kobe Steel Engineering Reports*. 2018, vol. 68, no. 2, pp. 7–11.
59. Onorin O.P., Polinov A.A., Pavlov A.V., Spirin N.A., Gurin I.A. About a possibility of using blast furnace heat balance to control heat losses. *Metallurgist*. 2018, vol. 62, no. 3-4, pp. 218–224.
<https://doi.org/10.1007/s11015-018-0648-4>
60. Polinov A.A., Pavlov A.V., Onorin O.P., Spirin N.A., Gurin I.A. Blast distribution over the air tuyeres of a blast furnace. *Metallurgist*. 2018, vol. 62, no. 5-6, pp. 418–424.
<https://doi.org/10.1007/s11015-018-0676-0>
61. Kuang S., Li Z., Yu A. Review on modeling and simulation of blast furnace. *Steel Research International*. 2018, vol. 89, no. 1, article 1700071. <https://doi.org/10.1002/srin.201700071>
62. Pettersson F., Saxen H. Model for economic optimization of iron production in the blast furnace. *ISIJ International*. 2006, vol. 46, no. 9, pp. 1297–1305. <https://doi.org/10.2355/isijinternational.46.1297>
63. Gordon Y., Izumskiy N., Matveenko G., Chaika O., Lebid V., Vyshinskya O. Diagnostics, optimization and mathematical models of coke-sinter-hot metal production process. *AISTech 2019 – Proceedings of the Iron & Steel Technology Conference*. 2019, vol. 2019 – May, pp. 479–484. <https://doi.org/10.33313/377/050>
64. Bettinger D., Fritschek H., Schaler M., Kronberger T., Wollhofen R. A holistic approach to ironmaking digitalization. *AISTech 2019 – Proceedings of the Iron & Steel Technology Conference*. 2019, vol. 2019 – May, pp. 577–585. <https://doi.org/10.33313/377/061>
65. Alter M.A. Optimization of parameters of blast furnace smelting under conditions of plant operation with limited supply of coke, natural gas or iron-bearing materials. *AISTech – Iron and Steel Technology Conference Proceedings*. 2020, vol. 1, pp. 302–309.
<https://doi.org/10.33313/380/035>

66. Модельные системы поддержки принятия решений в АСУ ТП доменной плавки / Н.А. Спи́рин, В.В. Лавров, В.Ю. Рыболовлев, А.В. Краснобаев, О.П. Оно́рин, И.Е. Косаченко. Екатеринбург: УрФУ, 2011. 462 с.
67. Waissi G.R., Demir M., Humble J.E., Lev B. Automation of strategy using IDEF0 – A proof of concept // *Operations Research Perspectives*. 2015. Vol. 2. P. 106–113.
<https://doi.org/10.1016/j.orp.2015.05.001>
68. Hou C., Wang J., Chen C. Using hierarchical scenarios to predict the reliability of component-based software // *IEICE Transactions on Information and Systems*. 2018. Vol. E101D. No. 2. P. 405–414.
<https://doi.org/10.1587/transinf.2017EDP7127>
69. Chen B., Hsu H.-P., Huang Y.-L. Bringing desktop applications to the web // *IT Professional*. 2016. Vol. 18. No. 1. Article 7389272. P. 34–40. <https://doi.org/10.1109/MITP.2016.15>
70. Phan J. *MATLAB – C# for Engineers*. CreateSpace Independent Publishing Platform. 2010. 322 p.
66. Spirin N.A., Lavrov V.V., Rybolovlev V.Yu., Krasnobaev A.V., Onorin O.P., Kosachenko I.E. *Model Decision Support Systems in APCs of Blast Furnace Smelting*. Yekaterinburg: UrFU, 2011, 462 p. (In Russ.).
67. Waissi G.R., Demir M., Humble J.E., Lev B. Automation of strategy using IDEF0 – A proof of concept. *Operations Research Perspectives*. 2015, vol. 2, pp. 106–113.
<https://doi.org/10.1016/j.orp.2015.05.001>
68. Hou C., Wang J., Chen C. Using hierarchical scenarios to predict the reliability of component-based software. *IEICE Transactions on Information and Systems*. 2018, vol. E101D, no. 2, pp. 405–414.
<https://doi.org/10.1587/transinf.2017EDP7127>
69. Chen B., Hsu H.-P., Huang Y.-L. Bringing desktop applications to the web. *IT Professional*. 2016, vol. 18, no. 1, article 7389272, pp. 34–40. <https://doi.org/10.1109/MITP.2016.15>
70. Phan J. *MATLAB – C# for Engineers*. CreateSpace Independent Publishing Platform. 2010, 322 p.

СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ

INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Николай Александрович Спи́рин, д.т.н., профессор, заведующий кафедрой «Теплофизика и информатика в металлургии», Уральский федеральный университет имени первого Президента России Б. Н. Ельцина

ORCID: 0000-0001-6582-3428

E-mail: n.a.spirin@urfu.ru

Владислав Васильевич Лавров, д.т.н., профессор кафедры «Теплофизика и информатика в металлургии», Уральский федеральный университет имени первого Президента России Б. Н. Ельцина

ORCID: 0000-0002-6953-5519

E-mail: v.v.lavrov@urfu.ru

Валерий Юрьевич Рыболовлев, к.т.н., начальник проектного

офиса, ПАО «Магнитогорский металлургический комбинат»

ORCID: 0000-0001-9153-227X

E-mail: rybolovlev.vy@mmk.ru

Дмитрий Александрович Шнайдер, д.т.н., начальник Центра математического моделирования и системно-аналитических исследований, ПАО «Магнитогорский металлургический комбинат»

ORCID: 0000-0001-7275-6569

E-mail: Shnyder.DA@mmk.ru

Алексей Викторович Краснобаев, к.т.н., менеджер проектного офиса, ПАО «Магнитогорский металлургический комбинат»

ORCID: 0000-0003-1364-3243

E-mail: krasnobaev.av@mmk.ru

Иван Александрович Гури́н, к.т.н., доцент кафедры «Теплофизика и информатика в металлургии», Уральский федеральный университет имени первого Президента России Б. Н. Ельцина

ORCID: 0000-0002-4989-7029

E-mail: ivan.gurin@urfu.ru

Nikolai A. Spirin, Dr. Sci. (Eng.), Prof., Head of the Chair “Thermal Physics and Informatics in Metallurgy”, Ural Federal University named after the first President of Russia B. N. Yeltsin

ORCID: 0000-0001-6582-3428

E-mail: n.a.spirin@urfu.ru

Vladislav V. Lavrov, Dr. Sci. (Eng.), Prof. of the Chair “Thermal Physics and Informatics in Metallurgy”, Ural Federal University named after the first President of Russia B. N. Yeltsin

ORCID: 0000-0002-6953-5519

E-mail: v.v.lavrov@urfu.ru

Valerii Yu. Rybolovlev, Cand. Sci. (Eng.), Chief of the Design Office, PJSC

“Magnitogorsk Metallurgical Plant”

ORCID: 0000-0001-9153-227X

E-mail: rybolovlev.vy@mmk.ru

Dmitrii A. Schneider, Dr. Sci. (Eng.), Head of the Center of Mathematical Modeling and System Analytical Research, PJSC “Magnitogorsk Metallurgical Plant”

ORCID: 0000-0001-7275-6569

E-mail: Shnyder.DA@mmk.ru

Alexei V. Krasnobaev, Cand. Sci. (Eng.), Manager of the Design Office, PJSC “Magnitogorsk Metallurgical Plant”

ORCID: 0000-0003-1364-3243

E-mail: krasnobaev.av@mmk.ru

Ivan A. Gurin, Cand. Sci. (Eng.), Assist. Prof. of the Chair “Thermal Physics and Informatics in Metallurgy”, Ural Federal University named after the first President of Russia B. N. Yeltsin

ORCID: 0000-0002-4989-7029

E-mail: ivan.gurin@urfu.ru

Поступила в редакцию 03.03.2021

После доработки 17.03.2021

Принята к публикации 19.04.2021

Received 03.03.2021

Revised 17.03.2021

Accepted 19.04.2021