

В. Н. Захарченко, канд. техн. наук, гл. доменщик, e-mail: vnz1964@gmail.com

В. Б. Семакова*, канд. техн. наук, доцент

В. В. Семаков*, канд. техн. наук, ст. преподаватель

Объединение предприятий «Укрметаллургпром», Днепр

*ГВУЗ «Приазовский государственный технический университет», Мариуполь

Разработка электронной версии унифицированного журнала работы доменной печи

Компьютеризация научной деятельности расширила возможности разработки математических моделей доменной плавки. Для оптимизации параметров доменного процесса необходима разработка унифицированных программных продуктов. Рассмотрена возможность создания системы управления данными доменного производства на основе электронной версии унифицированного журнала работы доменной печи.

Ключевые слова: математическая модель, электронный унифицированный журнал работы доменной печи, система управления контентом.

В настоящее время компьютеризация охватила все сферы деятельности современного общества, в том числе и промышленное производство. Сейчас невозможно представить себе деятельность какой-либо организации или предприятия без создания системы объединенной компьютерной сети для хранения и передачи информации.

Компьютеризация научной деятельности обеспечила создание программных продуктов на основе построения сложных математических моделей технологических процессов, в том числе и доменной плавки, для которой характерна совокупность одновременно протекающих процессов теплообмена, восстановления железа, газодинамики, фазовых превращений, фильтрации расплавов и многих других [1].

В связи с многообразием явлений, происходящих в рабочем пространстве доменной печи при высоких температурах и повышенном давлении в противотоке огромных масс шихтовых материалов и восстановительного газа, и трудностью их физического моделирования, а также прямых измерений параметров доменной плавки, математические методы исследования получили значительное развитие [1–7].

На основе обобщения и статистического анализа производственных показателей работы доменных печей в Институте черной металлургии им. З. И. Некрасова НАН Украины разработана методика и нормативы оценки влияния технологических факторов на расход кокса и производительность доменной плавки [1]. Преимуществом методов математической статистики является возможность изучения связей в условиях изменчивости большого количества факторов в реальном диапазоне условий протекания процесса при обработке данных о работе доменной печи за длительный период времени. Однако полученные эмпирические зависимости не имеют общей логической основы, обеспечивающей их распространение на работу доменных печей в других технологических

условиях и за пределами условий, в которых они получены.

Указанного недостатка лишены расчетные балансовые методы. В конце XIX столетия акад. М. А. Павлов показал, что расход кокса в доменной плавке определяется не только его затратами на покрытие тепловых потребностей процесса, но и затратами на образование восстановительного газа CO. Наибольшее распространение получил метод расчета доменного процесса А. Н. Рамма, основанный на соотношениях материального и теплового балансов [4]. Разработка теории теплообмена Б. И. Китаевым, предложившим делить доменную печь на две зоны теплообмена, позволила выявить определяющее влияние нижней зоны на расход кокса доменной плавки. Кроме того, было установлено, что между верхней и нижней ступенями теплообмена находится холостая (резервная) зона или зона замедленного теплообмена [5]. Для изучения распределения тепла по высоте печи необходимо составление зональных тепловых балансов, когда рабочее пространство печи делится на несколько зон, например, по Р. Линднеру на шесть уровней [1].

В Институте металлургии Уральского отделения РАН разработан комплекс математических моделей, работающих на основе единой базы данных: двумерные модели газодинамики, теплообмена, восстановления, зоны когезии [6]. Основополагающей является модель газодинамики, рассчитанный в которой модуль скорости газа лежит в основе других двумерных моделей. Балансовая модель, позволяющая рассчитать расход кокса, дутья, выход газа, температуру фурменного очага, является входной для двумерных моделей. Комплексная модель состоит из подмоделей, что позволяет ее совершенствовать, в частности осуществлять переход к трехмерным моделям.

В АСУТП Магнитогорского металлургического комбината получены результаты эксплуатации

модельной системы поддержки принятия решения для управления пуском печи и доменной плавкой, основу которой составляет комплекс математических моделей: теплового состояния печи, дутьевого, газодинамического и шлакового режимов плавки, а также решения комплекса стратегических задач при планировании производства, поставок железорудного сырья, топлива, оптимального управления энергоресурсами для металлургических предприятий [2].

В ИЧМ им. З. И. Некрасова НАН Украины разработана автоматизированная система анализа (АСА) показателей доменной плавки, основанная на анализе показателей реальной технологии с прогнозной оценкой показателей плавки путем расчета двухзонных балансов, а также включающая многозонный анализ процессов по высоте и радиусу доменной печи [1]. На основе многозонной математической модели, в которой весь столб шихтовых материалов разбит на 120 локальных объемов, проведены аналитические исследования процессов доменной плавки при разных температурах дутья и содержания в нем кислорода, при вдувании природного и коксового газов, пылеугольного топлива, а также положения пластичной зоны и связи ее параметров с движением поверхности засыпи шихтовых материалов в доменной печи. Результаты аналитического анализа отдельных процессов согласуются с полученными ранее экспериментальными данными.

В НМетАУ для оптимизации базовых режимов работы доменных печей и методов оперативного управления доменной плавкой создана диалоговая система «Персональный компьютер доменщика», ориентированная на оператора доменной печи. В ее состав входят подсистемы «Шихта», «Загрузка», «Дутье», «Шлак», «Расчет», «Тренажер», позволяющие оптимизировать базовые режимы работы доменных печей и методы оперативного управления доменной плавкой.

В ПГТУ разработана математическая модель, которая предполагает определение прогнозных показателей доменной плавки с учетом полноты протекания реакций косвенного восстановления оксидов железа и основана на решении системы двух уравнений: расхода «кокса-источника тепла» K_T и «кокса-источника восстановителя» K_B – согласно идее академика М. А. Павлова [7]. В основу модели положен теоретический расчет проф. А. Н. Рамма, дополненный эталонированием по критериям восстановительных процессов и тепловым потерям печи, достигаемым в производственных условиях работы конкретной доменной печи, что позволяет, в отличие от алгоритма расчета МИСиС, в качестве исходных данных задавать только фактическую степень использования восстановительного газа по реакции восстановления FeO η_{FeO} , при этом степень прямого восстановления по М. А. Павлову определяется расчетным путем. Условно алгоритм расчета показателей доменной плавки разбит на пять взаимосвязанных блоков (рисунок).

1. Исходные данные (как правило, представляют собой технико-экономические показатели работы печи за отчетный период либо на текущий момент):

– шихтовые параметры – фактический расход кокса и его технический анализ, расходы сырьевых материалов (железорудных, флюсов, добавок) и их химические составы;

– дутьевые параметры – расход и температура дутья, содержание кислорода в дутье, расход природного газа и др.;

– химический состав и температура продуктов доменной плавки: чугуна, шлака, доменного газа.

2. Определение показателей восстановительных процессов по производственным данным для последующего эталонирования математической модели по условиям работы действующей доменной печи; при эталонировании в следующем блоке на основе фактически достигнутых расхода кокса и показателей восстановительных процессов доменной плавки (η_{FeO} и степень косвенного восстановления по М. А. Павлову r_i) определяются тепловые потери ΔQ , которые принимаются в качестве постоянной величины.

3. Совместное определение теплового баланса и баланса газа-восстановителя при условии равенства расхода кокса-источника тепла и кокса-восстановителя при заданном входном параметре η_{FeO} .

4. Расчет показателей плавки на основе материального и теплового балансов.

5. Моделирование влияния исследуемого фактора на показатели работы печи.



Алгоритм математической модели доменной плавки ПГТУ

Первым этапом является эталонирование программы, включающее блоки 1–4. Для расчета прогнозных показателей вносятся соответствующие изменения в исходные данные и предусматривается моделирование влияния исследуемого фактора на показатели плавки (блок 5).

Таким образом, основой теоретического расчета является решение системы двух уравнений – теплового баланса (1) и баланса газа-восстановителя (2):

$$\begin{cases} Q_{\text{пр}} \left(1 - \frac{\Delta Q}{100}\right) = Q_p & (1) \\ V_{\text{гв}} = \frac{r_i}{\eta_{\text{FeO}}} O_{\text{ш}}^{\text{FeO}} & (2) \end{cases},$$

где $Q_{\text{пр}}$, Q_p , ΔQ – приходная, расходная части теплового баланса доменной плавки, Дж, и потери тепла, %; $V_{\text{гв}}$ – количество газа-восстановителя, м³; $O_{\text{ш}}^{\text{FeO}}$ – количество атомарного кислорода шихты, связанного с FeO, м³.

Общей чертой разработанных комплексных математических моделей доменной плавки, в том числе ВНИИМТ, МИСиС, Nippon Steel и др., является наличие расчетного балансового модуля, дополненного в зависимости от решаемой задачи соответствующими кинетико-математическими модулями. Полное описание алгоритма, как правило, недоступно, что затрудняет сравнение и воспроизведение разработанных другими авторами моделей. Сложность разрабатываемых моделей должна определяться решаемыми задачами, так как ее повышение требует введения дополнительных настроечных коэффициентов, которые вносят свою погрешность. В связи с этим усложнение математических моделей не всегда является оправданным [6].

Таким образом, на данный момент в научно-исследовательских институтах и высших учебных заведениях созданы различные математические модели, позволяющие не только анализировать работу печи, но и прогнозировать показатели плавки в различных условиях.

Однако эти программы не унифицированы и требуют адаптации для условий конкретного предприятия с соответствующими дополнительными затратами.

Цель работы – проанализировать возможность создания унифицированных программных продуктов для повышения эффективности доменной плавки и наукоемкости производства чугуна.

В настоящее время различают шесть этапов развития информационных технологий: ручные, механические, электрические, электронные, компьютерные и интернет-технологии. В результате стремительного развития IT-технологий повсеместно используется интернет, а также применяются стандартные программы и приложения, как для персональных компьютеров, так и для мобильных телефонов. Это стало возможным благодаря применению унифицированных программных продуктов.

В промышленном производстве также применяются унифицированные документы единой формы для всех предприятий одной отрасли. Так, в соответствии с Единой системой технологической документации, устанавливающей единые требования и правила оформления документов на технологические процессы (ТП), в доменных цехах ведутся журналы контроля ТП, основным из которых является журнал работы доменной печи (ЖРДП) единого образца, обеспечи-

вающий анализ, контроль и управление процессом выплавки чугуна. До настоящего времени журнал работы доменной печи заполняется технологическим персоналом рукописно и хранится в бумажном виде в архивах, что снижает оперативность и качество анализа показателей работы печи, особенно за длительный период времени.

По мере компьютеризации производственных процессов на предприятиях созданы базы данных (БД) различных показателей для получения отчетов за определенный период и т. д. Существующие базы данных показателей ТП отдельных предприятий, как правило, не являются унифицированными. Более того, внутри одного предприятия базы данных дублируют отдельные показатели, но при этом не охватывают полностью информацию ЖРДП, что осложняет анализ работы доменных печей и приводит к необходимости «ручной» выборки анализируемых показателей из рукописного журнала и «ручного» ввода данных в компьютерные программы для дальнейшей обработки, а также требует больших затрат времени и трудовых ресурсов, исключает возможность оперативного принятия технических и технологических решений, внедрения новых мероприятий. Кроме того, отсутствует возможность объединения отдельных баз данных показателей ТП предприятий в единую базу для анализа работы отрасли в целом.

В настоящее время на большинстве предприятий Группы Метинвест внедрена ERP-платформа на базе решений немецкой компании SAP SE, которая позволит качественно улучшить управление бизнес-процессами по функциональным группам: «Производство», «Ремонты», «Продажи», «Логистика», «Финансы», «Закупки», «Персонал», «Заработная плата», «Риски и управление полномочиями». Как отметил генеральный директор Группы Метинвест Ю. А. Рыженков, таким образом компания унифицирует и централизует все бизнес-процессы, чтобы обеспечивать высокий уровень эффективности менеджмента (по материалам: <http://www.mariupolnews.com.ua>).

ERP-система SAP R/3 ориентирована на крупные и средние предприятия (R – realtime, 3 – трехуровневая архитектура (клиент, сервер приложений, БД)). Система SAP является многофункциональной, имеет множество дополнительных пакетов, чем обусловлена ее высокая стоимость и сложность. Для данного программного обеспечения необходимо его приобретение с последующим сопровождением внедрения компанией-разработчиком. Так, на ЧАО «ММК им. Ильича» – крупнейшем предприятии, внедрившим SAP, – для работы в системе обучено более 6600 сотрудников, около полугода потребовалось на адаптацию и согласование концептуального дизайна системы, включающего 245 проектных решений.

Конфигурация системы SAP на разных предприятиях может быть различной, а управление производством в ней предполагает формирование оптимальных многопередельных производственных планов в рамках «сквозных» процессов планирования и оперативное изменение их в соответствии с изменяющимися внешними и внутренними факторами, а также возможность учета в режиме реального време-

ни ограничений по материалам и производственным мощностям. Задача оптимизации технологических режимов производственных процессов, реализуемая посредством внедрения разработанных научными организациями математических моделей ТП, в данной системе не решается. SAP ERP, представляющая собой набор стандартных бизнес-процессов и огромное количество настроек, расширений, интерфейсов и других возможностей, содержащая внутренний язык программирования (ABAP) и средства разработки и отладки, позволяет разработать собственный функционал или существенно расширить существующий [8]. Однако разработка программного обеспечения в системе SAP на основе математических моделей ТП будет дорогостоящей и сузит возможности апробации научных разработок различных организаций.

Таким образом, в настоящий момент назрела необходимость и существует техническая возможность создания собственно CMS (система управления контентом) доменного производства, основой которой будет являться модуль, представляющий собой унифицированный для всех доменных цехов электронный журнал работы доменной печи. CMS доменного производства позволит оперативно обрабатывать показатели работы печи, например, получать данные за необходимый период, как в табличном, так и в графическом виде, усреднять их и пр., что обеспечит оперативный контроль, анализ и управление технологическим процессом доменной плавки. Данная CMS по мере необходимости может дополняться различными модулями, например: оповещения об отклонениях работы печи от заданного технологического режима; параметров загрузки; дутьевого режима; расчета материального и теплового балансов; критериев эффективности восстановительной работы газового потока; расчета прогнозных показателей доменной плавки при изменении режима работы печи и т. д. Так, модуль, реализованный на основе математической модели ПГТУ, позволит оценить степень приближения показателей работы доменной печи к предельным при заданном технологическом режиме.

Достоинством отраслевого решения в виде web-проекта является возможность разработки модулей

прогнозирования и управления различными системами доменной печи независимо отдельными научными организациями на основе единой CMS, а при положительном опыте внедрения – возможность их распространения на другие предприятия (аналогично скачиванию приложений из market place, app store, google play market и др.). При этом уменьшаются как сроки разработки и внедрения модулей, так и их стоимость.

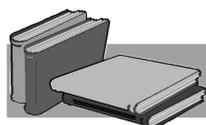
Целью создания CMS доменного производства является безопасное хранение, анализ и управление данными, оптимизация на ее основе параметров работы доменных печей, в том числе за счет непрерывного совершенствования самой системы. Ввод данных в CMS доменного производства возможен как в ручном, так и в автоматическом режиме, то есть предусматривается ее взаимодействие с существующими на предприятиях системами автоматизированного контроля и управления ТП.

CMS доменного производства, выполненная в виде web-проекта, обеспечит безопасность хранения данных предприятия на отдельном сервере с авторизованным доступом сотрудников, которые, в соответствии с их должностными обязанностями, будут иметь определенные права по внесению данных, их просмотру и обработке. CMS доменного производства может также дополняться модулями связи с другими подразделениями предприятия, либо с другими предприятиями и организациями.

Выводы

Создание CMS доменного производства будет способствовать расширению программного обеспечения доменного процесса на основе научных разработок НИИ и высших учебных заведений, его унификации, апробации, внедрению и удешевлению.

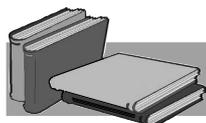
Внедрение отраслевого решения в виде web-проекта, основой которого является электронная версия ЖРДП, повысит объективность контроля и оперативность анализа, оптимизации параметров технологического процесса и принятия решений, что обеспечит повышение эффективности доменной плавки.



ЛИТЕРАТУРА

1. *Товаровский И. Г.* Познание процессов и развитие технологии доменной плавки: монография. – Днепр: Журфонд, 2015. – 912 с.
2. *Lavrov V. V., Spirin N. A., Burykin A. A. et al.* Automatic control software for the blast-furnace shop // *Steel Transl.* – 2015. – Vol. 45. – № 9. – P. 669–673.
3. *Kokot G., Burczyński T., John A.* Advanced numerical simulations of selected metallurgical units // *Journal of Achievements in Materials and Manufacturing Engineering.* – 2012. – Vol. 55. – № 2. – P. 523–528.
4. *Рамм А. Н.* Современный доменный процесс. – М.: Металлургия, 1980. – 304 с.
5. *Бугаев К. М.* Экспериментально-аналитическое исследование тепло- и массообмена в доменной печи // *Познание процессов доменной плавки: коллективный труд / Под ред. В. И. Большакова и И. Г. Товаровского.* – Днепр: Пороги, 2006. – С. 190–206.
6. *Дмитриев А. Н.* Развитие и применение теории газодинамики, тепло- и массообмена для решения практических задач доменного производства на основе комплекса математических моделей // *Познание процессов доменной плавки: коллективный труд / Под ред. В. И. Большакова и И. Г. Товаровского.* – Днепр: Пороги, 2006. – С. 207–226.

7. *Семакова В. Б., Семаков В. В.* Аналитическое исследование возможности снижения расхода кокса при улучшении восстановительной работы газового потока в доменной печи // Вісник Приазовського державного технічного університету: зб. наукових праць / ПДТУ, Серія: Технічні науки. – Маріуполь, 2011. – Вип. 22. – С. 36–41.
8. *Семухин С. О.* Характеристика логистической системы «SAP» // Научно-методический электронный журнал «Концепт». – 2016. – Т. 2. – С. 11–15. – URL: <http://e-koncept.ru/2016/46003.htm>.



REFERENCES

1. *Tovarovskiy I. G.* (2015). Poznanie protsessov i razvitie tekhnologii domennoi plavki: monografiia [*Cognition of processes and development of blast furnace smelting technology: monograph*]. Dnepr: Zhurfond, 912 p. [in Russian].
2. *Lavrov V. V., Spirin N. A., Burykin A. A. et al.* (2015). [*Automatic control software for the blast-furnace shop*]. Steel Transl., vol. 45, no. 9, pp. 669–673 [in English].
3. *Kokot G., Burczyński T., John A.* (2012). [*Advanced numerical simulations of selected metallurgical units*]. Journal of Achievements in Materials and Manufacturing Engineering, vol. 55, no. 2, pp. 523–528 [in English].
4. *Ramm A. N.* (1980). Sovremenniy domennyi protsess [*Modern blast furnace process*]. Moscow: Metallurgiya, 304 p. [in Russian].
5. *Bugaev K. M.* (2006). Eksperimental'no-analiticheskoe issledovanie teplo- i massoobmena v domennoi pechi [*Experimental-analytical study of heat and mass transfer in a blast furnace*]. Poznanie protsessov domennoi plavki: kollektivnyi trud. Pod red. V. I. Bol'shakova i I. G. Tovarovskogo. Dnepr: Porogi, pp. 190–206 [in Russian].
6. *Dmitriev A. N.* (2006). Razvitie i primeneniye teorii gazodinamiki, teplo- i massoobmena dlia resheniya prakticheskikh zadach domennogo proizvodstva na osnove kompleksa matematicheskikh modelei [*Development and application of the theory of gas dynamics, heat and mass transfer for solving practical problems of blast furnace production on the basis of a complex of mathematical models*]. Poznanie protsessov domennoi plavki: kollektivnyi trud. Pod red. V. I. Bol'shakova i I. G. Tovarovskogo. Dnepr: Porogi, pp. 207–226 [in Russian].
7. *Semakova V. B., Semakov V. V.* (2011). Analiticheskoe issledovanie vozmozhnosti snizheniya raskhoda koksa pri uluchshenii vosstanovitel'noi raboty gazovogo potoka v domennoi pechi [*Analytical research of decrease coke consumption possibility at improvement of gas stream reduction work in the blast furnace*]. Visnyk Pryazov's'koho derzhavnoho tekhnichnoho universytetu: zb. naukovykh prats'. PDTU, Seriya: Tekhnichni nauky, Mariupol', vyp. 22, pp. 36–41 [in Russian].
8. *Semukhin S. O.* (2016). Kharakteristika logisticheskoi sistemy "SAP" [*Characteristic of the logistics system "SAP"*]. Nauchno-metodicheskii elektronnyi zhurnal "Konsept", vol. 2, pp. 11–15, URL: <http://e-koncept.ru/2016/46003.htm> [in Russian].

Анотація

Захарченко В. М., Семакова В. Б., Семаков В. В.

Розробка електронної версії уніфікованого журналу роботи доменної печі

Комп'ютеризація наукової діяльності розширила можливості розробки математичних моделей доменної плавки. Для оптимізації параметрів доменного процесу необхідна розробка уніфікованих програмних продуктів. Розглянуто можливість створення системи управління даними доменного виробництва на основі електронної версії уніфікованого журналу роботи доменної печі.

Ключові слова

Математична модель, електронний уніфікований журнал роботи доменної печі, система управління контентом.

Summary

Zakharchenko V., Semakova V., Semakov V.

Development of a computer version of a unified logbook for registering operation of a blast furnace

Computerization of research has led to creation of various mathematical simulation models of blast furnace melting. To optimize the parameters of the blast furnace process it is necessary to develop unified software products. A possibility of developing a system of control over the data of blast furnace production on the basis of a computer version of a unified logbook for registering the data of blast furnace operation was considered here.

Keywords

Mathematical model, computer unified logbook for registering blast furnace operation, the content management system.

Поступила 18.12.17