

Интеллектуальный анализ промышленных данных для ресурсосберегающего управления сталеплавильным конвертерным производством

Т. Б. Чистякова¹, И. В. Новожилова², В. А. Кудлай³, В. В. Козлов⁴

Санкт-Петербургский государственный технологический институт (технический университет)

¹chistb@mail.ru, ²novozhilova@bk.ru, ³viktor.kudlay@gmail.com, ⁴chemic@yandex.ru

Аннотация. В статье предложена функциональная структура компьютерной системы, позволяющей на основе интеллектуального анализа промышленных данных и мониторинга трендов основных параметров сталеплавильного процесса осуществлять контроль шлакового режима конвертерной плавки стали. Основу системы составляет модель нейронной сети для прогнозирования агрессивности шлакового расплава и оценки его влияния на огнеупорную футеровку сталеплавильного конвертера. По результатам интеллектуального анализа промышленных данных система выдает рекомендации по способам снижения агрессивности шлака и нормированию температурных режимов работы огнеупоров в конвертере для замедления скорости износа и защиты огнеупорной футеровки от разрушений. Применение компьютерной системы на металлургических предприятиях позволяет повысить стойкость огнеупорных футеровок тепловых агрегатов, а также повысить безаварийный ресурс их работы.

Ключевые слова: нейронная сеть; интеллектуальный анализ данных; сталеплавильное производство; конвертер; огнеупорная футеровка

I. ВВЕДЕНИЕ

Ведущую промышленную группу сталеплавильных тепловых агрегатов составляют кислородные конвертеры, что связано с высокой производительностью агрегатов, высоким уровнем автоматизации процессов и гибкостью технологии конвертерной плавки, позволяющей получать сталь высокого качества и широкого сортамента [1]. Трудности управления конвертерным процессом связаны с работой в условиях недостаточной текущей информации о параметрах сталеплавильного процесса (например, наличием нечеткой информации о химическом составе лома) и действием случайных возмущений (например, загрязнение лома ржавчиной и посторонними материалами). Поскольку длительность процесса плавки не превышает 40–50 минут, оператору конвертерного процесса необходимо быстро принимать управленческие решения, опираясь на технологический регламент процесса плавки и профессиональный опыт ресурсосберегающего управления процессом. В связи с этим, необходимо построение адаптивных обучающихся систем управления, ориентированных на работу в

условиях нечеткой информации. Такие системы позволяют осуществлять рациональное управление сложными объектами за счет использования текущей информации, получаемой в результате функционирования объекта управления и построением трендов основных показателей процесса [2, 3]. Наиболее эффективным методом анализа нечеткой информации и прогнозирования параметров конвертерного процесса является метод Data Mining, основанный на применении искусственных нейронных сетей. Использование данного подхода позволит проводить интеллектуальный анализ больших промышленных данных, получаемых с систем мониторинга конвертерного процесса, и определять значения управляющих воздействий (химический состав и расход шлакообразующих материалов), влияющих на качественные показатели, такие как выход и температура жидкого металла, окисленность шлака, а также предельную растворимость огнеупорной фазы в конвертерном шлаке [4–8]. Таким образом, разработка компьютерной системы интеллектуального анализа промышленных данных и мониторинга трендов основных параметров сталеплавильного процесса является актуальной и практически значимой задачей.

Целью работы является создание компьютерной системы, позволяющей: прогнозировать с помощью обучения нейронной сети агрессивность шлакового расплава и оценивать его влияние на огнеупорную футеровку сталеплавильного конвертера; рассчитывать предельную растворимость огнеупорной фазы в конвертерном шлаке и определять количественную характеристику шлаковой коррозии; а также рассчитывать количество шлакообразующих материалов для эффективной нейтрализации шлака. Основу компьютерной системы составляют две подсистемы: подсистема интеллектуального анализа контролируемых параметров, влияющих на агрессивность шлакового расплава и подсистема для расчета материального и теплового балансов процесса конвертерной плавки стали с использованием детерминированных математических моделей. Компьютерная система позволяет выявлять сложные нечеткие взаимосвязи между технологическими параметрами процесса и решать задачу безопасного и ресурсосберегающего управления конвертерным производством стали.

II. ПОСТАНОВКА ЗАДАЧИ РЕСУРСОСБЕРЕГАЮЩЕГО УПРАВЛЕНИЯ ПРОЦЕССОМ КОНВЕРТЕРНОЙ ПЛАВКИ СТАЛИ

Технологический процесс плавки стали в кислородном конвертере представляет собой сложный комплекс физико-химических и тепловых процессов, отличающихся многообразием материалов, постоянным изменением их состава и температуры, а также многофакторными взаимодействиями и связями, возникающими по ходу процесса. Измерения переменных конвертерного процесса осуществляются в начале процесса плавки стали и по его завершению. В период плавки идет контроль только состава $X_{\text{кг}}$ и температуры $T_{\text{кг}}$ конвертерных газов в целях получения марки стали с заданным химическим составом и температурой. Контролируемыми управляемыми переменными процесса являются: расход кислорода на продувку $G_{\text{д}}$, расход флюсов $G_{\text{фл}}$ и продолжительность продувки $t_{\text{д}}$. В качестве контролируемых неуправляемых по ходу плавки переменных расход $G_{\text{ч}}$ и химический состав чугуна $X_{\text{ч}}$, температура чугуна $T_{\text{ч}}$, расход $G_{\text{л}}$ и химический состав лома $X_{\text{л}}$. Таким образом, процесс конвертерной плавки стали как объект обработки информации и управления характеризуется совокупностью параметров $Y=f(X, U, F)$, где $Y=\{G_{\text{м}}, G_{\text{фр}}, T_{\text{м}}, X_{\text{м}}, S_{\text{MgO}}, X_{\text{MgO}}, m_{\text{ф}}, C_{\text{FeO}}\}$ – вектор выходных переменных, $G_{\text{м}}$ – выход жидкого металла, т; $G_{\text{фр}}$ – расход ферросплавов, т; $T_{\text{м}}$ – температура полученного металла, °C; $X_{\text{м}}$ – состав металла; S_{MgO} – предельная растворимость огнеупорной фазы (MgO) в конвертерном шлаке; X_{MgO} – содержание MgO в шлаке, %; $m_{\text{ф}}$ – потеря массы футеровки, кг; C_{FeO} – окисленность шлака; $X=\{X_{\text{л}}, X_{\text{ч}}, M_{\text{ч}}, M_{\text{л}}, T_{\text{ч}}\}$ – вектор входных переменных, $X_{\text{л}}$ – химический состав лома; $X_{\text{ч}}$ – химический состав чугуна; $M_{\text{ч}}$ – масса чугуна, т; $M_{\text{л}}$ – масса лома, т; $T_{\text{ч}}$ – температура чугуна, °C; $U=\{G_{\text{фл}}, X_{\text{фл}}, G_{\text{д}}, V_{\text{д}}, t_{\text{д}}\}$ – вектор управляющих воздействий, $G_{\text{фл}}$ – расход шлакообразующих материалов (флюсов), т; $X_{\text{фл}}$ – химический состав флюсов; $G_{\text{д}}$ – расход кислородного дутья, кг; $V_{\text{д}}$ – объем дутья, м³/т; $t_{\text{д}}$ – время дутья, мин.; $F=\{B, X_{\text{лFe2O3}}, X_{\text{лЗ}}\}$ – вектор возмущающих воздействий, B – основность шлака; $X_{\text{лFe2O3}}$ – загрязнение лома ржавчиной, %; $X_{\text{лЗ}}$ – загрязнение лома посторонними материалами %.

На рис. 1 приведен пример формализованного описания процесса конвертерной плавки как объекта обработки информации и управления.

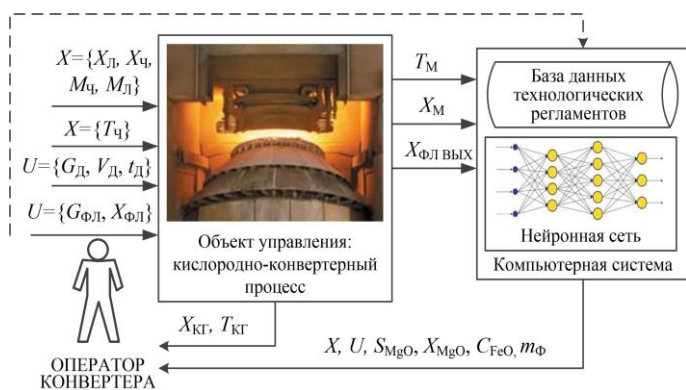


Рис. 1. Формализованное описание процесса конвертерной плавки стали как объекта обработки информации и управления

С учетом предложенного формализованного описания процесса конвертерной плавки стали как объекта обработки информации и управления следует сформулировать следующую задачу ресурсосберегающего управления процессом: на основании входных данных о составе и параметрах шихты $\{X_{\text{л}}, X_{\text{ч}}, M_{\text{ч}}, M_{\text{л}}, T_{\text{ч}}\}$, требуемом составе $\{X_{\text{м}}\}$ и температуре металла $\{T_{\text{м}}\}$ необходимо определить допустимые значения управляющих воздействий $U_{\text{доп}}=\{G_{\text{фл}}, X_{\text{фл}}, G_{\text{д}}, V_{\text{д}}, t_{\text{д}}\}$, обеспечивающие заданное качество стали с условием минимизации расхода периклазоуглеродистого огнеупора $\{m_{\text{ф}}\}$ рабочего слоя футеровки кислородного конвертера. Сформулированная задача управления приводит к необходимости проведения прогнозных и оперативных расчетов, позволяющих наиболее полно исследовать причинно-следственные связи основных технологических параметров конвертерного процесса, а также проводить анализ состояния огнеупорной футеровки конвертера с целью оценки соответствия критериям безопасной эксплуатации [4, 8–10].

III. СТРУКТУРА КОМПЬЮТЕРНОЙ СИСТЕМЫ ДЛЯ ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНОГО АНАЛИЗА ПРОМЫШЛЕННЫХ ДАННЫХ И УПРАВЛЕНИЯ КОНВЕРТЕРНЫМ ПРОИЗВОДСТВОМ

Для решения сформулированной задачи управления предложена функциональная структура компьютерной системы для интеллектуального анализа промышленных данных и управления сталеплавильным конвертерным производством, представленная на рис. 2.

Структура системы включает информационное обеспечение (базу данных технологических регламентов процесса, базу знаний критериев безопасности ведения конвертерного процесса, базу правил вывода информации о шлаковой коррозии рабочего слоя огнеупорной футеровки, базу данных результатов обучения нейронной сети); математическое обеспечение (модуль расчета материального и теплового балансов, модуль расчета предельной растворимости огнеупорной фазы в конвертерном шлаке заданного состава и температуры, модуль преобразования и обработки промышленных данных для прогнозирования агрессивности шлакового расплава, модуль расчета количества шлакообразующих материалов, необходимых для эффективной нейтрализации шлака конвертерной плавки, модуль визуализации трендов показателей процесса); интерфейсы пользователей (оператора процесса, инженера-технолога по эксплуатации огнеупоров, администратора, инженера по знаниям).

Моделирование процесса конвертерной плавки стали представляет собой решение систем уравнений материального и теплового балансов, участвующих в процессе химических элементов, а также эмпирических зависимостей и соотношений. Критерием оценки качества расчета служит получение химического состава, температуры и массы стали с заданной точностью. Существенное влияние на качество стали, выход годного металла, а также шлаковый износ огнеупорной футеровки конвертера оказывают количество, химический состав, вязкость и скорость формирования шлака. Ключевым

моментом при решении сформулированной задачи ресурсосберегающего управления является возможность интеллектуального анализа промышленных данных с целью прогнозирования окисленности шлака и оценки его влияния на огнеупорную футеровку конвертера. Эмпирическая модель для оценки окисленности шлака $C_{FeO} = f\{X_C^C, B, Z\}$ получена по результатам экспериментальных исследований [5, 6], где X_C^C – требуемая концентрация углерода в металле, B – основность шлака в конце продувки, Z – эмпирические коэффициенты. Чем выше окисленность шлака, тем выше его агрессивность по отношению к огнеупорной футеровке конвертера.

Для интеллектуального анализа промышленных данных на первом этапе пользователь системы выбирает наиболее значимые параметры процесса из базы данных, вносит пороговые ограничения параметров и формирует массив данных (система преобразует данные из формата excel в формат json для дальнейшей эксплуатации и производит нормирование значений с использованием линейного преобразования в диапазоне от 0 до 1). Входными параметрами нейронной сети являются следующие показатели процесса: продолжительность

продувки (t_d), расход дутья (G_d), соотношение расхода чугуна и лома, химический состав чугуна (X_c), расход извести ($G_{Фл}$), содержание углерода в конце продувки. Далее, массив накопленной экспертной информации разбивается на 3 подвыборки: обучаемая, оценочная и тестовая. Обучаемый набор данных анализируется методом искусственных нейронных сетей, а адекватность полученной модели оценивается при помощи оценочного и тестового набора данных. Следует отметить, что метод нейронных сетей можно применять в системах реального времени оператором процесса, когда модель обучается на компьютере, имеющим возможность распараллеливать потоки обработки информации искусственных нейронных сетей. В компьютерной системе для обучения нейронной сети используется библиотека Brain JS, имеющая возможность асинхронного обучения, а также изменение количества слоев, числа итераций и функции активации в коде. Библиотека поддерживает четыре активационные функции: Sigmoid, ReLU (rectified linear unit), Leaky ReLU, Tanh. В процессе обучения нейронная сеть меняет свои параметры и учится давать нужное отображение $X \rightarrow Y$, где $Y = \{C_{FeO}\}$.

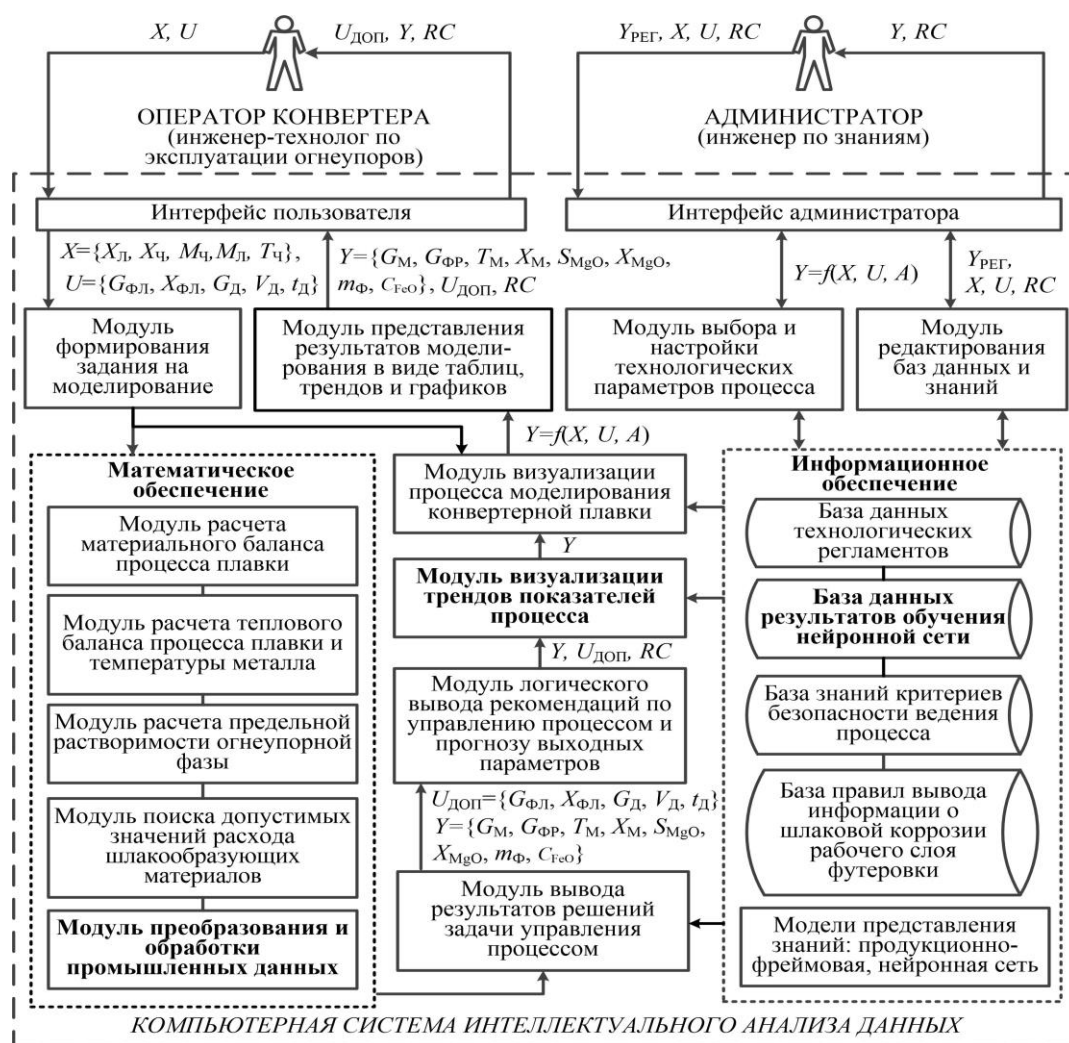


Рис. 2. Функциональная структура компьютерной системы для интеллектуального анализа промышленных данных и управления сталеплавильным конвертерным производством

Результатом работы нейронной сети является выявление закономерностей разрушения огнеупорной футеровки конвертера и определение агрессивности шлакового расплава. По результатам интеллектуального анализа промышленных данных система выдает рекомендации (RC) по способам снижения агрессивности шлака и нормированию температурных режимов работы огнеупоров в конвертере для замедления скорости износа и защиты огнеупорной футеровки от разрушений [4, 6, 7]. Укрупненная блок-схема алгоритма решения системы уравнений математической модели процесса и обучения нейронной сети приведена на рис. 3.

Программное обеспечение компьютерной системы разработано с использованием инструментальных средств Brain JS, Microsoft Visual Studio и IntelliJ Idea на языке программирования Java. Информационное обеспечение разработано с использованием СУБД Microsoft SQL Server и MongoDB.

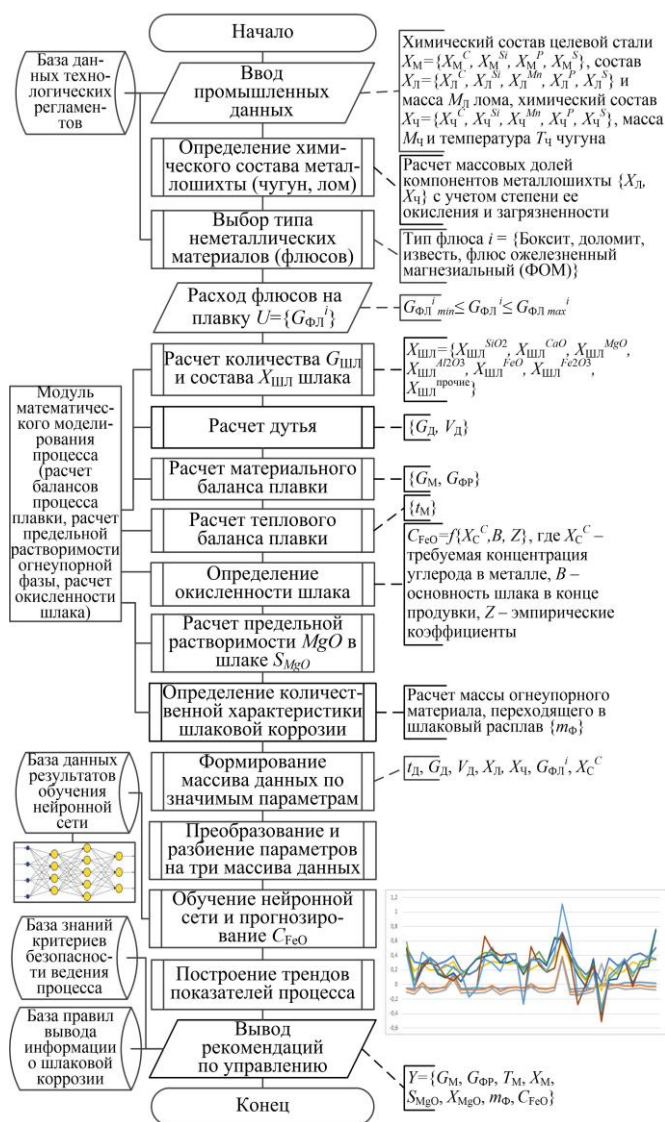


Рис. 3. Блок-схема алгоритма решения уравнений математической модели и обучения нейронной сети процесса плавки

Предложенная в работе компьютерная система позволяет выдавать рекомендации по ресурсосберегающему управлению конвертерным процессом, используя текущую информацию о процессе, информацию, накопленную ранее, а также результаты расчета по математическим моделям для оценки характеристик конвертерного сталеплавильного процесса.

IV. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Результаты тестирования системы подтвердили её работоспособность и возможность применения на металлургических предприятиях. Применение системы для интеллектуального анализа промышленных данных и ресурсосберегающего управления сталеплавильным конвертерным производством на металлургических предприятиях (например, Череповецком, Магнитогорском, Новолипецком и других комбинатах) позволит повысить стойкость огнеупорных футеровок тепловых агрегатов, повысить безаварийный ресурс их работы, а также повысить профессиональный уровень управленческого производственного персонала за счет глубокого понимания причинно-следственных связей в объекте, увеличения уверенности и самостоятельного решения задач управления.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- [1] Шаповалов А.Н. Технология и расчет плавки стали в кислородных конвертерах. Новотроицк: НФ МИСиС, 2011. 40 с.
- [2] Корнеева А.А., Корнет М.Е. Непараметрическое управление процессом конвертерной плавки стали // В сборнике: XII всероссийское совещание по проблемам управления ВСПУ-2014 ИПУ им. В.А. Трапезникова РАН. 2014. С. 4303-4314.
- [3] Korneeva A.A., Medvedev A.V., Raskina A.V. About nonparametric dual control algorithm // В книге: Systems Analysis: Modeling and Control abstracts of the International conference in memory of Academician Arkady Kryazhimskiy. 2016. С. 69-71.
- [4] Суворов С.А., Козлов В.В. Эксплуатация футеровок и конструкций, выполненных из огнеупорных материалов. СПб.: СПбГТИ(ТУ), 2011. 147 с.
- [5] Суворов С.А., Козлов В.В. Экспериментальное измерение растворимости MgO в металлургических шлаках для управления шлаковой коррозией периклазоуглеродистого огнеупора // Новые огнеупоры. 2014. №3. С. 127-129.
- [6] Суворов С.А., Козлов В.В. Фазовый состав и оптимизация химического состава шлаков // Бюллетень «Черная металлургия». 2016. № 6. С. 63-66.
- [7] Серова Л.В., Чудинова Е.В., Хороших М.А. Разработка критериев оценки качества периклазоуглеродистых огнеупоров и их влияние на повышение стойкости футеровок конвертеров // Черные металлы. 2015. № 5 (1001). С. 21-23.
- [8] Kumar D.S., Prasad G., Vishwanath S.C., Ghorui P.K., Mazumdar D., Ranjan M., Lal P.N. (2013) Converter life enhancement through optimisation of operating practices, Ironmaking & Steelmaking, 34:6, 521-528, DOI: 10.1179/174328107X203903
- [9] T.B. Chistyakova, V.A. Kudlay and I.V. Novozhilova, "Intelligent system for modeling the wear-and-tear dynamics of steelmaking converter lining," 2017 XX IEEE International Conference on Soft Computing and Measurements, St. Petersburg, 2017, pp. 259-261. doi: 10.1109/SCM.2017.7970554
- [10] Чистякова Т.Б., Кудлай В.А., Новожилова И.В., Суворов С.А., Козлов В.В. Система поддержки принятия решений по эксплуатации огнеупорной футеровки сталеплавильных конвертеров // Известия СПбГТИ(ТУ). 2016. № 37 (63). с. 60-66.