



Оригинальная статья

УДК 681.51

DOI 10.17073/0368-0797-2021-6-447-457



НЕПАРАМЕТРИЧЕСКИЙ АЛГОРИТМ УПРАВЛЕНИЯ ТЕМПЕРАТУРНЫМ РЕЖИМОМ МЕТАЛЛА НА УЧАСТКЕ КОНВЕРТЕР – МНЛЗ

М. Е. Корнет, А. В. Раскина, А. А. Корнеева

■ Институт космических и информационных технологий СФУ (Россия, 660041, Красноярск, пр. Свободный, 79)

Аннотация. Предложена двухуровневая система управления температурным режимом выплавки, внепечной обработки и подготовки к разливке низкоуглеродистой стали марки G/ЭТ в условиях ККЦ-2 АО «Объединенный Западно-Сибирский металлургический комбинат». В зависимости от технологической схемы возможно проектирование различных систем управления сталеплави́льным комплексом с последовательным, параллельным и комбинированным включением в нее отдельных операций, процессов. На примере стали марки G/ЭТ рассмотрена система управления последовательной группой объектов. Система управления включает внешний контур регулирования, позволяющий осуществлять согласованное управление отделениями цеха за счет оптимизации режима ведения технологического процесса на объекте с учетом фактически проведенной операции на предыдущем объекте. Реализован непараметрический алгоритм дуального управления, позволяющий лицу, принимающему решение (ЛПР), осуществлять совместную оперативную корректировку управляющих воздействий для локальных контуров управления. Проанализирован температурный режим массива плавов низкоуглеродистой стали марки G/ЭТ и выявлено, что существенное влияние на температурный режим стали оказывают длительности обработки сталеплави́льного ковша на каждом этапе технологического маршрута конвертер – МНЛЗ. В соответствии с этим сформированы критерии качества управления температурным режимом. Результаты проведенного вычислительного эксперимента показали, что введение блока управления с ЛПР способствует рациональному управлению температурным режимом металла на участке конвертер – МНЛЗ, и как следствие, получению заданного химического состава и температуры стали в более узких пределах. Это позволяет исключить отклонения от контактного графика работы основных агрегатов, увеличить количество плавов в серии и скорость непрерывной разливки.

Ключевые слова: непараметрический алгоритм управления, автоматизация сталеплави́льного производства, низкоуглеродистая сталь, диалоговая система управления

Финансирование: Работа выполнена в рамках государственного задания Министерства науки и высшего образования Российской Федерации (код научной темы FSRZ-2020-0011).

Для цитирования: Корнет М.Е., Раскина А.В., Корнеева А.А. Непараметрический алгоритм управления температурным режимом металла на участке конвертер – МНЛЗ // Известия вузов. Черная металлургия. 2021. Т. 64. № 6. С. 447–457.
<https://doi.org/10.17073/0368-0797-2021-6-447-457>

Original article

NONPARAMETRIC CONTROL ALGORITHM FOR METAL TEMPERATURE MODE ON SITE BOF – CCM

M. E. Kornet, A. V. Raskina, A. A. Korneeva

■ Institute of Space and Information Technologies of SibFU (79 Svobodnyi Ave., Krasnoyarsk 660041, Russian Federation)

Abstract. A two-level control system for the temperature mode of smelting, out-of-furnace processing and preparation for casting of low-carbon steel G/ET is proposed in the conditions of BOF shop-2 of JSC “United West Siberian Metallurgical Combine”. Depending on the technological scheme, it is possible to design various control systems for the steelmaking complex with sequential, parallel and combined inclusion of individual operations and processes. The control system of a sequential group of objects is considered on the example of steel G/ET. The control system includes an external control loop that allows coordinated control of the shop departments by optimizing the mode of technological process conducting at the facility, taking into account the actual operation performed at the previous facility. The implemented nonparametric algorithm of dual control allows the decision-maker to perform joint operational adjustment of control actions for local control loops. The temperature mode of the melts of low-carbon steel G/ET is analyzed and it is revealed that the processing time of the steel ladle at each stage of the BOF – CCM technological route has a significant impact on the steel temperature mode. In accordance with this, the criteria for temperature control quality are formed. The results of computational experiment showed that the introduction of a control unit with a decision-maker contributes to the rational control of metal temperature mode in the BOF – CCM site, and as a result, obtaining a given chemical composition and temperature of steel within narrower limits. It allows one to eliminate deviations from the contact schedule of the main units, and to increase the number of melts in the series and the rate of continuous casting.

Keywords: nonparametric control algorithm, automation of steelmaking, low-carbon steel, interactive control system

Funding: The work was performed within the framework of the state task of the Ministry of Science and Higher Education of the Russian Federation (scientific topic code FSRZ 2020 0011).

For citation: Kornet M.E., Raskina A.V., Korneeva A.A. Nonparametric control algorithm for metal temperature mode on site BOF – CCM. *Izvestiya. Ferrous Metallurgy*. 2021, vol. 64, no. 6, pp. 447–457. (In Russ.). <https://doi.org/10.17073/0368-0797-2021-6-447-457>

ВВЕДЕНИЕ

Современный уровень развития сталеплавильного производства преимущественно характеризуется выплавкой стали в кислородных конвертерах с последующей разливкой на машинах непрерывного литья заготовок (МНЛЗ). При этом на таком технологическом маршруте в состав цеха входят конвертерное отделение, отделение внепечной обработки стали и отделение непрерывной разливки стали [1, 2]. Сталь для разливки на МНЛЗ выплавляют в конвертерах с верхней продувкой, после получения заданных параметров (температуры металла, содержания углерода и т.д.) осуществляют выпуск металла в сталеразливочный ковш (СК) [3]. Раскисление, науглероживание, легирование металла проводят на выпуске и в СК с последующей передачей на установку внепечной обработки стали (УВОС), которая может быть представлена одним или несколькими агрегатами (продувочный стенд, ковш-печь, вакуумная установка и т.д.) [4]. На УВОС осуществляют корректировку химического состава, усреднение температуры, дегазацию и модифицирование стали. В процессе обработки поверхность металла обрабатывают теплоизолирующими присадками и передают металл на МНЛЗ. Сталеразливочный ковш устанавливают на подъемно-поворотный стенд и после открытия затворов металл поступает в промежуточные ковши (ПК) и обеспечивается поступление металла в кристаллизаторы.

Поддержание оптимального температурного режима стали является ключевой технологической задачей, и позволяет гарантировать стабильность работы основных агрегатов, а, следовательно, и качество разливаемого металла [5, 6]. Под температурным режимом подразумевают изменение температуры металла на этапах технологического маршрута конвертер – МНЛЗ. Управление температурным режимом металла на каждом этапе означает принятие конкретного решения о выборе режимных параметров дальнейшей обработки металла в зависимости от температуры металла на входе и требуемой температуры на выходе рассматриваемого этапа.

В настоящее время с целью автоматизации процесса производства на металлургических предприятиях в РФ применяются различные системы управления, основной целью которых является реализация оператором заданного температурно-временного режима с параллельным контролем основных параметров технологического процесса [7, 8]. В качестве автоматического регулятора в большинстве современных систем

управления используются типовые законы регулирования [9 – 12]. В частности, математическая модель регулирования конвертерным процессом [10], которая описывается нестационарным колебательным звеном, реализуется на базе ПИД-регулятора.

При выборе типа и параметров регуляторов для системы управления используют программные пакеты математического моделирования. Процесс моделирования позволяет реализовать задающие воздействия на основе известной модели и в последующем сделать вывод об эффективности регулятора [9]. Следует учитывать, что в рассматриваемом случае при разработке систем управления необходимо знать передаточную функцию объекта, которая используется в виде термодинамической модели [13, 14]. При этом параллельно применяются алгоритмы управления, основанные на балансовых термодинамических моделях и фундаментальных физико-химических закономерностях [14 – 20].

На АО «ЕВРАЗ ЗСМК» высокая культура производства и автоматизация передового уровня. Так, в ККЦ-2 успешно функционируют АСУТП и АСУП, что позволяет планировать производство и оперативно управлять технологическими процессами. Однако, доля ручного управления и влияние человеческого фактора до сих пор остаются значительными.

Технологами предприятия постоянно ведется работа по улучшению технико-экономических показателей плавки, в том числе за счет разработки подсистем оптимизации технологических процессов этапов сталеплавильного производства. Причем, оптимизация отдельного технологического процесса на участке не гарантирует оптимальной работы всех объектов управления, входящих в состав технологического производства [21]. Поэтому постоянно возникают проблемы согласования работы участков производства.

ПОСТАНОВКА ЗАДАЧИ

Основной целью управления температурным режимом металла является получение заданного химического состава и температуры в промежуточном ковше МНЛЗ. Неоптимальный перегрев над температурой ликвидуса стали может привести к браку. Так, при низкой температуре стали в ПК происходит «замораживание» ручья и преждевременное прекращение разливки, при высокой температуре приходится снижать скорость разливки во избежание прорыва корочки заготовки, что уменьшает выход годного металла. Помимо этого, нарушение температурного режима приводит к ухуд-

шению показателей десульфурации и дефосфорации стали [22]. Повышенное содержание серы и фосфора в металле перед разливкой уменьшает его пластичность, что приводит к образованию поверхностных дефектов, трещин и, в целом, к снижению механических свойств готовой металлопродукции.

Температура стали и временная последовательность ее регулирования на технологическом маршруте конвертер – МНЛЗ приведены на рис. 1.

Температура начала разливки устанавливается для каждой марки стали индивидуально исходя из условий ее разливки, при которых обеспечивается заданная производительность МНЛЗ и качество заготовки. Требуемая температура начала разливки является целевым параметром для нахождения температуры стали при выдаче ковша в разливочный пролет и поступления на УВОС. В конечном итоге, при управлении температурным режимом металла на выпуске ориентируются на необходимую температуру при поступлении на УВОС и далее в промежуточном ковше на МНЛЗ.

Температурный режим жидкого металла (рис. 1, 1 – 4) регламентируется технологическими указаниями (ТУ), которые разрабатываются на основе производственного опыта и технологической схемы выплавки, подготовки и разливки металла, принятой на предприятии. Технологи на этапе планирования плавки, исходя из текущей производственной ситуации (физико-химических свойств шихтовых материалов, контактного графика, серийности плавов, требований к качеству выплавляемой стали), приближенного расчета тепловых затрат, и ориентируясь на значения в ТУ, назначают минималь-

но необходимую температуру выпуска металла из конвертера. Эта температура имеет решающее значение при дальнейшем управлении температурным режимом и оказывает существенное влияние на качество проведения внепечной обработки и разливки стали.

Важным обстоятельством является падение температуры металла на технологическом маршруте от конвертера до МНЛЗ, которое определяется внешними факторами, вызывающими существенные отклонения от расчетных значений температур. Среди факторов, оказывающих наибольшее влияние на потери тепла, выделяют тепловое состояние футеровки сталеразливочного ковша [23]. Этот вопрос является малоизученным и вызывает трудности при управлении температурным режимом. Помимо этого, задачу осложняет отсутствие однозначной информации о некоторых физико-химических свойствах металла и шлака на заключительном этапе плавки в конвертере. В такой ситуации возможным решением проблемы может быть разработка взаимосвязанных моделей производственного маршрута конвертер – МНЛЗ, учитывающих специфику и требования к предоставляемым данным на каждом из этапов.

С точки зрения потерь температуры металла можно выделить следующие технологические этапы: конвертер (от начала продувки до выпуска); конвертер – УВОС (от выпуска металла в сталеразливочный ковш и раскисления до фиксирования параметров металла на УВОС); УВОС (от начала внепечной обработки до выдачи ковша с УВОС); УВОС – МНЛЗ (от выдачи с УВОС до начала разливки).

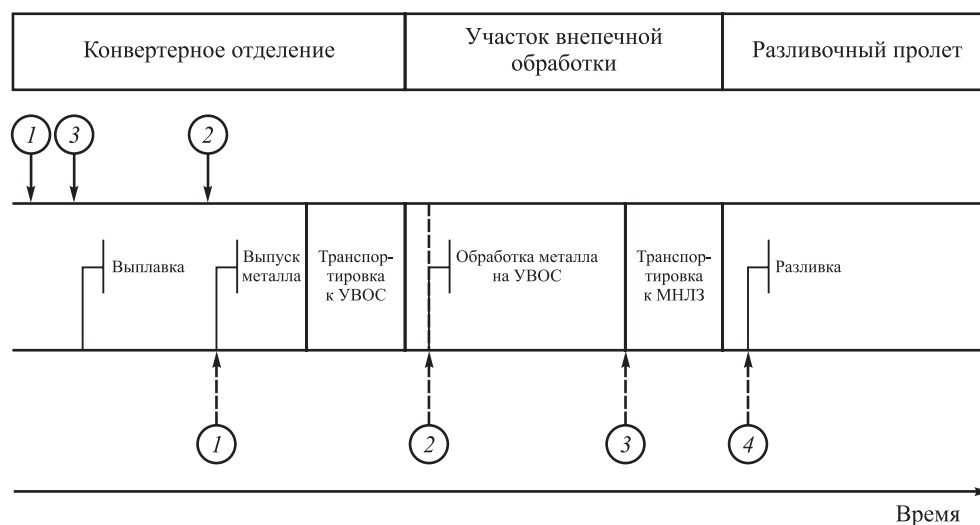


Рис. 1. Температурный режим стали на этапе транспортировки к МНЛЗ:

1 – 4 – температуры выпуска, поступления УВОС, выдачи в разливочный пролет, начала разливки (пунктирной линией указаны моменты времени фактического замера температуры соответствующих этапов, а сплошной – моменты времени, к которым должны быть известны температуры, необходимые для регулирования температурного режима)

Fig. 1. Temperature mode of steel at the technological route BOF – CCM:

1 – 4 – temperature of tapping, entering secondary steel-making section, passing to continuous casting section, continuous casting start (the dotted line indicates actual measurement times of the steel temperature at corresponding technological stages, and the solid line indicates the times at which there should be known for the control of temperature mode)

Для исследования температурного режима при движении металла был проанализирован массив (208 плавок) плавок текущего производства стали марки G/ЭТ. Эта марка относится к низкоуглеродистым сталям и выплавляется в значительных объемах в соответствии с контрактами.

Производство слабов марки G/ЭТ осуществляется по технологической линии: выплавка в конвертере, выпуск и раскисление (присадка алюминия, науглероживателя, твердых шлакообразующих смесей, ферромарганца, марганца металлического), обработка в ковше на установке доводки металла (продувка аргоном (азотом) через донные фурмы, введение присадок для корректировки химического состава металла, дополнительное раскисление гранулированным алюминием или алюминиевой катанкой); обработка на установке ковшепечь (УПК) (продувка нейтральным газом, присадка для корректировки химического состава ферросплавов, модификация порошковой проволокой, присадка ТШС, электрический нагрев металла, использование теплоизолирующей засыпки), разливка на слабовой МНЛЗ.

Обобщенная схема рассматриваемого технологического маршрута представлена на рис. 2 (здесь $x_t^1 \in (x_{1t}^1, \dots, x_{5t}^1)$; $x_{1t}^1 = \mu_{1t}^2$ – вес плавки, т; $x_{2t}^1 = \mu_{2t}^2$ – химический состав пробы металла, %; $x_{3t}^1 = \mu_{3t}^2$ – температура металла, °С; $x_{4t}^1 = \mu_{4t}^2$ – химический состав пробы шлака, %; $x_{5t}^1 = \mu_{5t}^2$ – длительность плавки, мин; $\mu_t^1 \in (\mu_{1t}^1, \dots, \mu_{4t}^1)$; μ_{1t}^1 – температура чугуна, °С; μ_{2t}^1 – химический состав чугуна, %; μ_{3t}^1 – компания конвертера; μ_{4t}^1 – температура футеровки конвертера, °С; ω_{1t}^1 – состав конвертерных газов; ω_{2t}^1 – температура конвертерных газов, °С; $u_t^1 \in (u_{1t}^1, \dots, u_{4t}^1)$; u_{1t}^1 – садка, расход шихтовых материалов и чугуна, т; u_{2t}^1 – суммарный кислород продувки, м³; u_{3t}^1 – продолжительность продувки, мин; u_{4t}^1 – положение фурмы; $x_t^2 \in (x_{1t}^2, x_{2t}^2, x_{3t}^2)$; $x_{1t}^2 = \mu_{1t}^3$ – длительность обработки,

мин; $x_{2t}^2 = \mu_{2t}^3$ – химический состав пробы стали, %; $x_{3t}^2 = \mu_{3t}^3$ – температура стали в СК, °С; ω_{1t}^2 – температура охлаждающей фурмы воды, °С; ω_{2t}^2 – визуальный контроль состояния шлака; $u_t^2 \in (u_{1t}^2, \dots, u_{4t}^2)$; u_{1t}^2 – ступени нагрева, МВт; u_{2t}^2 – добавки в СК, кг/т; u_{3t}^2 – скорость подачи порошковой проволоки, кг/с; u_{4t}^2 – длительность продувки на УВОС, мин; $x_t^3 \in (x_{1t}^3, x_{2t}^3, x_{3t}^3)$; x_{1t}^3 – длительность разливки, мин; x_{2t}^3 – химический состав пробы стали в ПК, %; x_{3t}^3 – температура стали в ПК, °С; $u_t^3 \in (u_{1t}^3, u_{2t}^3)$; u_{1t}^3 – расход воды в зонах охлаждения, л/мин; u_{2t}^3 – скорость разливки, м/мин; ω_{1t}^3 – температура поверхности слитка, °С; ω_{2t}^3 – глубина жидкой лунки; $x_t^{1*} \in (x_{1t}^{1*}, \dots, x_{5t}^{1*})$, $x_t^{2*} \in (x_{1t}^{2*}, x_{2t}^{2*}, x_{3t}^{2*})$, $x_t^{3*} \in (x_{1t}^{3*}, x_{2t}^{3*}, x_{3t}^{3*})$ – параметрическое задание на плавку стали определенной марки).

Особенности изменения технологических процессов контролируются дистрибутором конвертера, УВОС и МНЛЗ на основании доступных измерений основных и косвенных параметров. Например, непосредственно в конвертерной плавке момент окончания продувки определяют по расчетам и на основе анализа отходящих газов, при этом обеспечено получение необходимых температуры и химического состава металла для заданной марки стали.

Для обеспечения серийности разливки плавок и получения требуемых температуры и постоянного химического состава стали перед разливкой необходимо согласованное управление всеми агрегатами технологической линии. В рассматриваемом случае имеем последовательную группу технологических объектов. Основная идея – следовать технологическому регламенту, при этом оптимизировать режим ведения процесса на текущем технологическом объекте с учетом фактически проведенной технологической операции

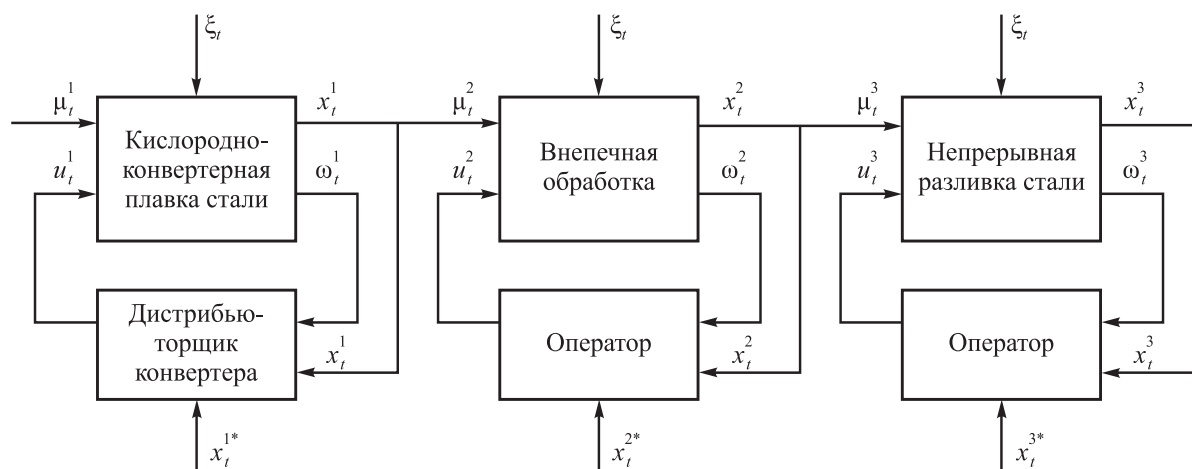


Рис. 2. Сталеплавильный комплекс

Fig. 2. Steelmaking complex

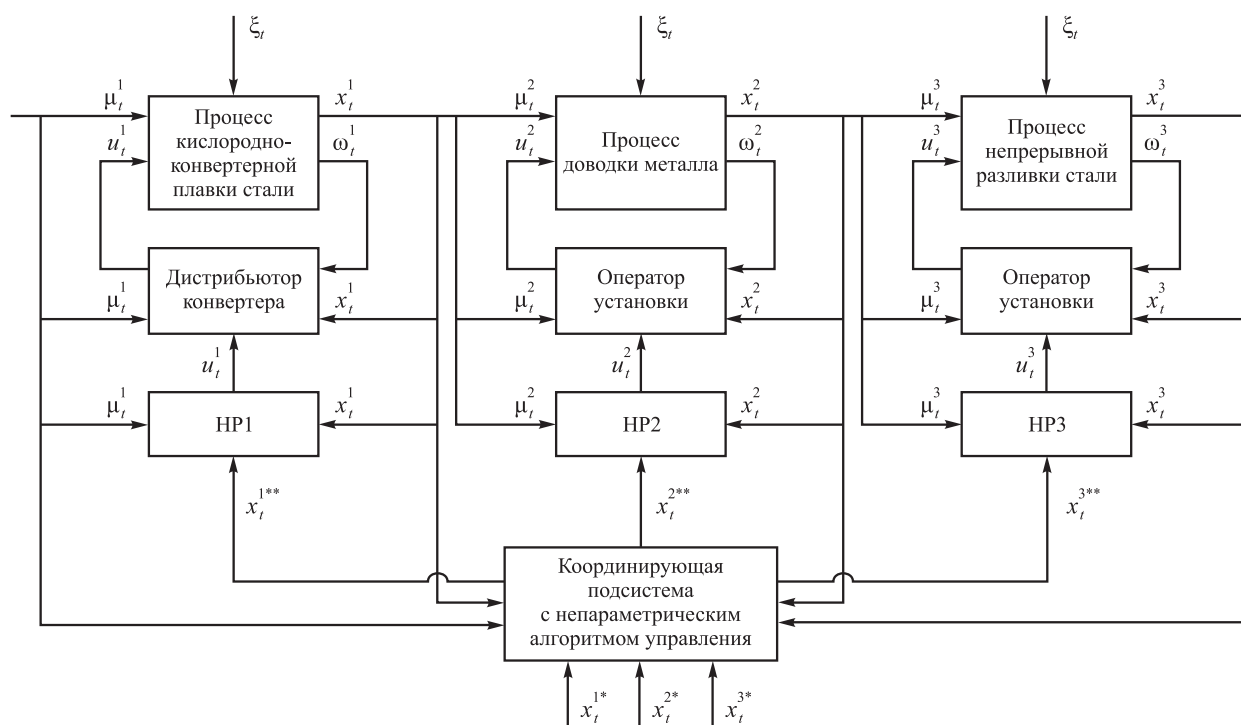


Рис. 3. Двухконтурная система управления

Fig. 3. System with dual control loop

на предыдущем объекте. Целесообразно совместное оперативное уточнение технологических заданий и соответствующих управляющих воздействий. В связи с этим, разработана двухуровневая система управления группой объектов, включающая лицо принимающее решение (рис. 3; здесь $x_t^{1**} \in (x_{1t}^{1**}, \dots, x_{5t}^{1**})$, $x_t^{2**} \in (x_{1t}^{2**}, x_{3t}^{2**}, x_{3t}^{2**})$, $x_t^{3**} \in (x_{1t}^{3**}, x_{3t}^{3**}, x_{3t}^{3**})$ – задающее воздействие ЛПР; $x_t^{1s} \in (x_{1t}^{1s}, \dots, x_{5t}^{1s})$, $x_t^{2s} \in (x_{1t}^{2s}, x_{3t}^{2s}, x_{3t}^{2s})$, $x_t^{3s} \in (x_{1t}^{3s}, x_{3t}^{3s}, x_{3t}^{3s})$ – векторные переменные, обозначающие выход моделей локальных объектов; НР1, НР2, НР3 – непараметрические регуляторы локальных контуров управления группой объектов, включающая ЛПР.

Наличие в схеме ЛПР в рассматриваемом случае является оправданным, так как задача управления характеризуется наличием множества критериев на каждом участке технологической линии, которые не представляется возможным свести к одному. Лицо, принимающее решение, назначает задающее воздействие для последнего локального контура из технологического регламента, далее для остальных локальных контуров задающие воздействия рассчитываются с использованием непараметрического алгоритма и реализуются на модели локального контура. Полученные отклики модели оцениваются ЛПР с точки зрения эффективности управления. Если решение является допустимым, то проводится дальнейший подбор для оставшихся объектов с учетом уже вычисленных ранее задающих воздействий. Если решение не является допустимым,

то ЛПР назначает новые скорректированные значения, пока не будет найдено допустимое решение, которое в последующем будет реализовано на объекте. Если допустимое решение не было найдено, то осуществляется перевод в другую марку стали.

НЕПАРАМЕТРИЧЕСКИЕ АЛГОРИТМЫ ИДЕНТИФИКАЦИИ

Рассмотрим задачу идентификации локальных объектов, входящих в вышеописанную группу (рис. 2). В группу входит кислородно-конвертерная плавка, внепечная обработка и непрерывная разливка стали. Технологические процессы, протекающие в перечисленных объектах, можно отнести к классу дискретно-непрерывных с запаздыванием и формализовать в виде

$$x^i(t) = A^i(u^i(t - \tau_u), \mu^i(t - \tau_\mu), \xi^i(t)), i = \overline{1, 3}, \quad (1)$$

где A^i – неизвестные операторы исследуемых каналов связи объектов; τ – запаздывание, которое может отличаться по разным каналам.

Запаздывание τ связано с характером протекания процесса и может быть опущено в уравнении (1), если сделать соответствующие сдвиги в матрице наблюдений исследуемого процесса на величину τ . В связи с отсутствием априорной информации о функциональных зависимостях между входными-выходными переменными локальных технологических процессов целесообразным при решении задачи идентификации является использование непараметрической оценки функции

регрессии по наблюдениям. В общем случае для многомерного объекта такая оценка может иметь вид [24, 25]:

$$x_s(u, \mu) = \frac{\sum_{i=1}^s x_i \prod_{j=1}^n \Phi\left(\frac{u^j - u_i^j}{c_s^u}\right) \prod_{k=1}^m \Phi\left(\frac{\mu^k - \mu_i^k}{c_s^\mu}\right)}{\sum_{i=1}^s \prod_{j=1}^n \Phi\left(\frac{u^j - u_i^j}{c_s^u}\right) \prod_{k=1}^m \Phi\left(\frac{\mu^k - \mu_i^k}{c_s^\mu}\right)}, \quad (2)$$

где $\Phi(\cdot)$ – ядерная колоколообразная функция; c_s – коэффициенты размытости ядерной функции c_s .

Асимптотическая несмещенность и сходимость в среднем для непараметрической оценки функции регрессии (2) по наблюдениям была доказана в работах [26, 27].

В многомерном случае параметр c_s размытости ядра является вектором, каждый компонент которого соответствует определенной переменной процесса и настраивается отдельно. Параметры c_s можно представить в виде скалярных величин, предварительно решив задачи центрирования и нормирования данных, приведя их к общему числовому диапазону. Компромиссным по скорости работы алгоритма оптимизации и достигаемой точности аппроксимации методом определения коэффициента размытости c_s является метод скользящего экзамена, например, из критерия минимизации квадратической ошибки аппроксимации

$$R(c_s) = \sum_{k=1}^s (x_k - x_s(u_k, c_s))^2 = \min_{c_s}, \quad k \neq i. \quad (3)$$

Идея метода заключается в том, что в модели (2) последовательно исключается каждый i -ый элемент выборки, предъявляемый для экзамена.

Рассмотрим ряд непараметрических моделей технологических процессов сталеплавильного комплекса. Одним из важнейших параметров процесса производства стали является температура металла, в частности, температура металла по завершению процесса кислородно-конвертерной плавки стали. Например, модель для переменной x_3^1 имеет вид [28]:

$$x_{3,s}^1(u, \mu) = \frac{\sum_{i=1}^s x_{3,s}^1 \prod_{j=1}^n \Phi\left(\frac{u_j^1 - u_{j,i}^1}{c_s^u}\right) \prod_{k=1}^m \Phi\left(\frac{\mu_k^1 - \mu_{k,i}^1}{c_s^\mu}\right)}{\sum_{i=1}^s \prod_{j=1}^n \Phi\left(\frac{u_j^1 - u_{j,i}^1}{c_s^u}\right) \prod_{k=1}^m \Phi\left(\frac{\mu_k^1 - \mu_{k,i}^1}{c_s^\mu}\right)}. \quad (4)$$

На рис. 4 приведены модели для важнейших параметров кислородно-конвертерной плавки (содержания серы, фосфора, углерода, температура T).

Относительные ошибки W регулирования для каждого эксперимента приведены в табл. 1.

Подобные модели могут быть построены для всех выходных переменных каждого объекта технологической цепочки. Рассматриваемые модели будут использоваться при формулировке алгоритма управления группой технологических объектов.

НЕПАРАМЕТРИЧЕСКИЙ АЛГОРИТМ УПРАВЛЕНИЯ

В настоящей работе локальные технологические объекты и их устройства управления рассматриваются как отдельные подсистемы управления. Входными параметрами этих систем являются неуправляемые переменные $\mu_t^j \in (\mu_{1,t}^j, \dots, \mu_{m,t}^j)$, $j = 1, 3$, а также задающие воз-

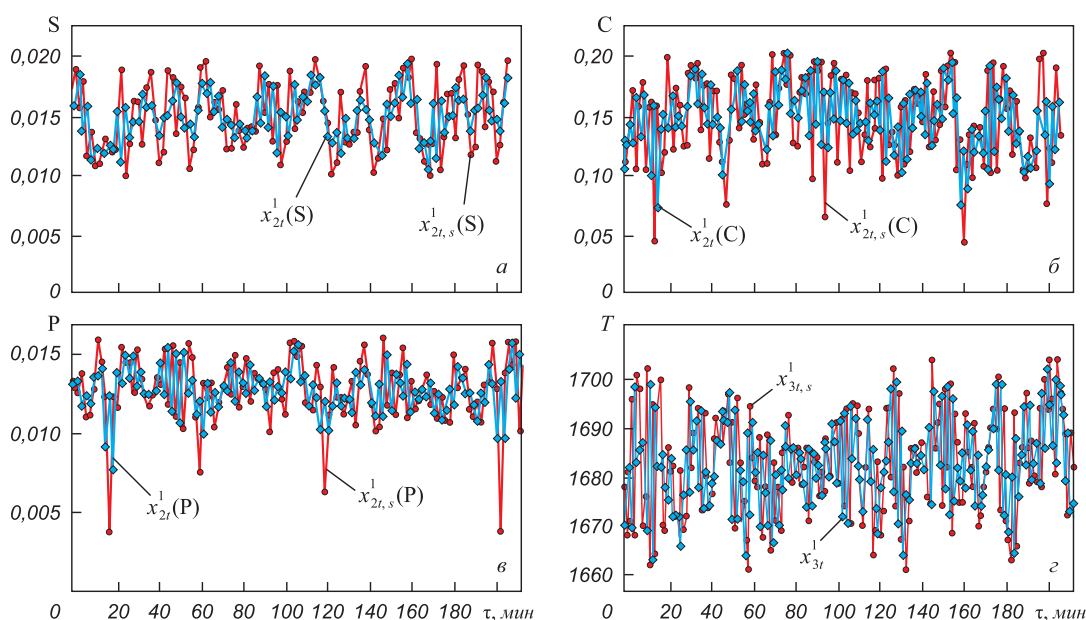


Рис. 4. Непараметрические модели параметров кислородно-конвертерной плавки стали (выходные переменных $x_{2,s}^1$ (P, C, S), $x_{3,s}^1$)

Fig. 4. Non-parametric models of BOF process (output of variables $x_{2,s}^1$ (P, C, S), $x_{3,s}^1$)

Т а б л и ц а 1

Переменная процесса кислородно-конвертерной плавки и относительная ошибка моделирования

Table 1. BOF process variable and relative modeling error

Переменная процесса	W
x_2^1 (S, %)	0,12
x_2^1 (C, %)	0,16
x_3^1 (P, %)	0,09
x_3^1 (T, °C)	0,08

действия для локального контура, поступающие от ЛПР, $x_t^{**j} \in (x_{1,t}^{**j}, \dots, x_{p^j,t}^{**j})$, $j = \overline{1, 3}$. Выходными параметрами являются выходные переменные $x_t^j = (x_{1,t}^j, \dots, x_{p^j,t}^j) = \mu_t^{j+1} = (\mu_{1,t}^{j+1}, \dots, \mu_{m^{j+1},t}^{j+1})$, $j = \overline{1, 3}$. Значение $x_t^{**3} \in (x_{1,t}^{**3}, \dots, x_{p^3,t}^{**3})$ для последнего макрообъекта задается исходя из технологического регламента, считается равным величине $x_t^{**3} \in (x_{1,t}^{**3}, \dots, x_{p^3,t}^{**3})$. Величина $x_t^{**2} \in (x_{1,t}^{**2}, \dots, x_{p^2,t}^{**2})$ выбирается ЛПР в соответствии с выбранными критериями качества управления, в дальнейшем это значение поступает на вход модели подсистемы управления.

Полученные отклики модели на задающие воздействия $x_t^{**2} \in (x_{1,t}^{**2}, \dots, x_{p^2,t}^{**2})$ оцениваются ЛПР с точки зрения эффективности управления, если решение является допустимым, то производится дальнейший подбор $x_t^{**1} \in (x_{1,t}^{**1}, \dots, x_{p^1,t}^{**1})$ уже с учетом $x_t^{**2} \in (x_{1,t}^{**2}, \dots, x_{p^2,t}^{**2})$. Если решение не является допустимым, то ЛПР назначает новые скорректированные значения $x_t^{**1} \in (x_{1,t}^{**1}, \dots, x_{p^1,t}^{**1})$ пока не будет найдено допустимое решение, которое в последующем будет реализовано на объекте.

Пусть $f_i^j(x_{i,t}^{s,j}, x_{i,t}^{**j})$, $i = \overline{1, p^j}$, $j = \overline{1, 3}$ – набор критериев качества, которые формируются на основе модели j -го макрообъекта:

$$x_{i,t}^{s,j} = \varphi_i(\mu_t^j, x_t^{**j}), i = \overline{1, p^j}, j = \overline{1, 3}, \quad (5)$$

где векторы

$$\mu_t^j = (\mu_{1,t}^j, \dots, \mu_{m^j,t}^j) \in R^{m^j}, x_t^{**j} = (x_{1,t}^{**j}, \dots, x_{p^j,t}^{**j}) \in R^{p^j} -$$

входные неуправляемые переменные и задающие воздействия, поступающие на вход системы от ЛПР; φ_i , $i = \overline{1, p^j}$, $j = \overline{1, 3}$ – непрерывные функции.

Сформируем функцию полезности (предпочтений) [26]:

$$R = R(f_1^j(x_{1,t}^{s,j}, x_{1,t}^{**j}), \dots, f_{p^j}^j(x_{p,t}^{s,j}, x_{p,t}^{**j})), j = \overline{1, 3}. \quad (6)$$

В зависимости от производственной ситуации возможны различные постановки задачи (6). Если необходимо решить задачу составления контактного графика, то ЛПР может менять значимость критериев, формулируя тем самым приоритеты исходя из конкретной текущей ситуации на производстве. Если же необходимо решить задачу управления температурным режимом в рамках регулирования рассматриваемой конкретной плавки, то задача (6) может быть сформулирована как задача оптимизации при известных ограничениях.

Лицо, принимающее решение, осуществляет поиск допустимого решения в области компромиссов [25], исходя из конкретной текущей ситуации на производстве.

Алгоритм принятия решений ЛПР о выборе $x_t^{**j} \in (x_{1,t}^{**j}, \dots, x_{p^j,t}^{**j})$, $j = \overline{1, 3}$ строится по следующей схеме.

1. Для последнего объекта ЛПР выбирает значения $x_t^{**3} \in (x_{1,t}^{**3}, \dots, x_{p^3,t}^{**3}) = x_t^{*3} \in (x_{1,t}^{*3}, \dots, x_{p^3,t}^{*3})$ в соответствии с технологическим регламентом.

2. По обратной цепочке производится вычисление задающих воздействий для каждого локального контура:

$$x_{y,s+1}^{**j} = \sum_{i=1}^s x_{y,i}^{*j} \prod_{v=1}^p \Phi\left(\frac{f(x_{v,i}^{**j}, \mu_{v,i}^j)}{c_s^v}\right) \prod_{q=1}^m \Phi\left(\frac{\mu_{q,s}^j - \mu_{q,i}^j}{c^{\mu^q}}\right) \times \\ \times \prod_{v=1}^p \Phi\left(\frac{x_{v,s}^{**j+1} - x_{v,i}^{j+1}}{c_s^{x^j}}\right) \Bigg/ \sum_{i=1}^s \prod_{v=1}^p \Phi\left(\frac{f(x_{v,i}^{**j}, \mu_{v,i}^j)}{c_s^v}\right) \times \\ \times \prod_{q=1}^m \Phi\left(\frac{\mu_{q,s}^j - \mu_{q,i}^j}{c^{\mu^q}}\right) \prod_{v=1}^p \Phi\left(\frac{x_{v,s}^{**j+1} - x_{v,i}^{j+1}}{c_s^{x^j}}\right), \\ y = \overline{1, p^j}, j = \overline{1, 2}, \quad (7)$$

где s – индекс такта принятия решений.

3. Полученное значение $x_{y,s+1}^{**j}$, $y = \overline{1, p^j}$, $j = \overline{1, 2}$ подставляется в модель

$$x_{y,t}^{s,j} = \varphi_y(x_{y,t}^{**j} = x_{y,s+1}^{**j}, \mu_t^j = \mu_t^{0,j}), \\ y = \overline{1, p^j}, j = \overline{1, 2}. \quad (8)$$

4. Из полученных значений задающего воздействия $x_{y,s+1}^{**j}$, $y = \overline{1, p^j}$, $j = \overline{1, 2}$ формируются компоненты критериев:

$$f_i^j(x_{i,t}^{s,j}, x_{i,t}^{**j}), y = \overline{1, p^j}, j = \overline{1, 2}. \quad (9)$$

5. Вычисленные значения задающих воздействий $x_{y,s+1}^{**j}$, $y = \overline{1, p^j}$, $j = \overline{1, 2}$ оцениваются ЛПР на основе прогнозируемых значений $f_i^j(x_{i,t}^{s,j}, x_{i,t}^{**j})$, $i = \overline{1, p^j}$, $j = \overline{1, 3}$ с точки зрения эффективности управления.

В случае, если ЛПР принимает полученное решение $x_{y,s+1}^{*,j}$, $y = 1, p^j, j = 1, 2$ в качестве допустимого, то значения $x_{y,s+1}^{*,j}$, $y = 1, p^j, j = 1, 2$ реализуются на макро-объекте.

Если полученное решение $x_{y,s+1}^{*,j}$, $y = 1, p^j, j = 1, 2$ является неудовлетворительным с точки зрения ЛПР, то алгоритм повторяется, начиная с шага 2, до момента получения допустимого значения вектора задающих воздействий.

ВЫЧИСЛИТЕЛЬНЫЙ ЭКСПЕРИМЕНТ

Для исследования температурного режима металла был проанализирован массив из 208 плавов низкоуглеродистой стали марки G/ЭТ. Анализ показал, что существенное влияние на температурный режим стали в рамках отработанной технологии оказывают длительности обработки сталеплавильного ковша на каждом этапе технологического маршрута (рис. 1). Сформулируем критерии качества управления температурным режимом:

– конвертерное отделение (период от промежуточной повалки конвертера до выпуска в СК):

$$I_1 = \frac{\tau_k}{\tau_k^{\text{рег}}} + \left\| \frac{(T_{\text{вып}} - T_{\text{вып}}^{\text{рег}})}{T_{\text{вып}}} \right\|, \quad (10)$$

где τ_k и $T_{\text{вып}}$ – время выдержки и температура металла перед выпуском в конвертере, мин и °C; $\tau_k^{\text{рег}}$ и $T_{\text{вып}}^{\text{рег}}$ – время выдержки и температура металла перед выпуском в конвертере по регламенту, мин и °C.

– выпуск плавки в СК и его транспортировка в отделение внепечной обработки:

$$I_2 = \left\| \frac{(\tau_{\text{СК}} - \tau_{\text{СК}}^{\text{рег}})}{\tau_{\text{СК}}^{\text{рег}}} \right\|, \quad (11)$$

где $\tau_{\text{СК}}$ – длительность выпуска стали в СК, мин; $\tau_{\text{СК}}^{\text{рег}}$ – длительность выпуска стали в СК по регламенту, мин.

– транспортировка СК на УВОС:

$$I_3 = \left\| \frac{(\tau_{\text{УВОС1}} - \tau_{\text{УВОС1}}^{\text{мин}})}{\tau_{\text{УВОС1}}^{\text{мин}}} \right\| + \left\| \frac{(T_{\text{УВОС1}} - T_{\text{УВОС1}}^{\text{рег}})}{T_{\text{УВОС1}}^{\text{рег}}} \right\|, \quad (12)$$

где $\tau_{\text{УВОС1}}$ – длительность транспортировки СК на УВОС, мин; $\tau_{\text{УВОС1}}^{\text{мин}}$ – минимальное время, необходимое на транспортировку СК на УВОС, мин; $T_{\text{УВОС1}}$ – температура первого замера на УВОС, °C; $T_{\text{УВОС1}}^{\text{рег}}$ – температура поступления на УВОС по регламенту, °C.

– внепечная обработка

$$I_4 = \left\| \frac{(\tau_{\text{УВОС2}} - \tau_{\text{УВОС2}}^{\text{мин}})}{\tau_{\text{УВОС2}}^{\text{мин}}} \right\| + \left\| \frac{(T_{\text{УВОС2}} - T_{\text{УВОС2}}^{\text{рег}})}{T_{\text{УВОС2}}^{\text{рег}}} \right\|, \quad (13)$$

где $\tau_{\text{УВОС2}}$ – время обработки на УВОС, мин; $\tau_{\text{УВОС2}}^{\text{рег}}$ – время обработки на УВОС по регламенту, мин; $T_{\text{УВОС2}}$ – температура выдачи в отделение разливки, °C; $T_{\text{УВОС2}}^{\text{рег}}$ – температура выдачи в отделение разливки по регламенту, °C.

– транспортировка ковша и выдержка перед разливкой

$$I_5 = \left\| \frac{(\tau_{\text{МНЛЗ}} - \tau_{\text{МНЛЗ}}^{\text{мин}})}{\tau_{\text{МНЛЗ}}^{\text{мин}}} \right\| + \left\| \frac{(T_{\text{МНЛЗ}} - T_{\text{МНЛЗ}}^{\text{рег}})}{T_{\text{МНЛЗ}}^{\text{рег}}} \right\|, \quad (14)$$

где $\tau_{\text{МНЛЗ}}$ – время выдержки перед разливкой, мин; $\tau_{\text{МНЛЗ}}^{\text{мин}}$ – минимальное время, выдержки необходимое для подготовки к разливке, мин; $T_{\text{МНЛЗ}}$ – температура в промежуточном ковше перед разливкой, °C; $T_{\text{МНЛЗ}}^{\text{рег}}$ – температура в промежуточном ковше перед разливкой по регламенту, °C.

Оптимальные параметры находили из решения задачи оптимизации:

$$I(\tau, T) = \sum_{i=1}^5 I_i = \min_{\tau, T}. \quad (15)$$

Задача (16) была решена с использованием метода Нелдера-Мида (коэффициент отражения $\alpha = 1$; коэффициент сжатия $\beta = 0,5$; коэффициент растяжения $\gamma = 2$; точность $\varepsilon = 0,001$). Были найдены следующие оптимальные значения времени и температуры на каждом участке технологической цепочки (табл. 2).

В случае если решается задача управления температурным режимом, ЛПР варьирует длительность нахождения СК на участках маршрута в соответствии с критериями, рассчитываемыми с использованием непараметрических моделей (2): коэффициенты распределения серы L_s и фосфора L_p между металлом и шлаком.

Коэффициент распределения серы L_s определяют из соотношения:

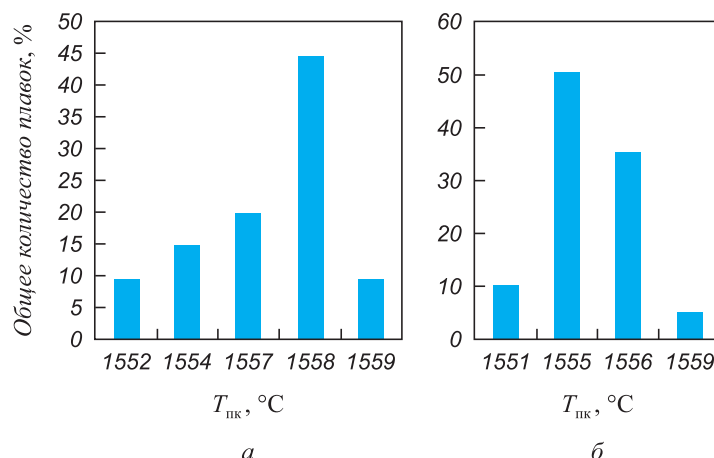
$$\lg L_s = \frac{21\,920 - 54\,640B'}{T} + 43,6B' - 25,2 - \lg a_0 + \lg f_s; \quad (16)$$

Т а б л и ц а 2

Оптимальные параметры производства

Table 2. Optimal production parameters

Номер участка	$\tau_{\text{опт}}$, мин	$T_{\text{опт}}$, °C
1	5,3	1692
2	7,2	1675
3	12,6	1620
4	32,5	1605
5	24,7	1560

Рис. 5. Фактические (а) и расчетные (б) значения $T_{пк}$ и их процентное соотношение от общего количества плавовFig. 5. Actual (a) and calculated (b) values $T_{пк}$ and their percentage of the melts total number

здесь T – температура металла, К; B' – оптическая основность шлака; a_O – активность кислорода в стали; f_S – коэффициент активности серы в стали.

Коэффициент распределения фосфора L_p :

$$L_p = \frac{22\,350}{T} - 16 + 2,5 \lg (\% \text{ Fe})_{\text{общ}} + 0,08 (\% \text{ CaO}). \quad (17)$$

В ходе проведения вычислительного эксперимента были получены результаты. На рис. 5, а представлена гистограмма распределения фактических температур металла в промежуточном ковше $T_{пк}$, °C. На рис. 5, б представлена гистограмма расчетных значений температур их распределение по диапазонам, в случае, когда производство стали на каждом участке технологической линии моделировали с использованием непараметрических моделей (2), а управляющие воздействия ЛПР рассчитывали согласно формулам (7) – (9), где в качестве критериев качества были выбраны критерии (16) – (17).

Как показывают результаты вычислительного эксперимента, введение в технологическую линию блока управления с ЛПР позволяет значительно уменьшить долю плавов с перегревом.

Выводы

Проведен анализ существующей технологии производства стали для определения основных направлений дальнейшего развития и совершенствования систем автоматизации, оптимизации и управления основными этапами в технологической схеме получения стали передела металла от конвертерного агрегата до МНЛЗ. Создание единой системы позволит обеспечить согласованность работы агрегатов, снизить продолжительность незапланированных простоев, повысить качество выпускаемой продукции, увеличить объем производства.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

REFERENCES

1. Chaabet M., Dötsch E. Steelmaking based on inductive melting // *Induction Technology*. 2012. No. 1. P. 49–58.
2. Aleksashin A.L., Schnaltzger I., Hollias G. Creation and growth of oxygen-converter steelmaking // *Metallurgist*. 2007. Vol. 51. No. 1. P. 60–65. <https://doi.org/10.1007/s11015-007-0014-4>
3. Głownia J. *Metallurgy and Technology of Steel Castings*. Bentham Science Publishers, 2017. 319 p. <https://doi.org/10.2174/97816810857081170101>
4. Голубцов В.А., Шуб Л.Г., Дерябин А.А., Усманов Р.С. К вопросу о повышении эффективности внепечной обработки стали // *Металлург*. 2006. № 12. С. 59–61.
5. Quan G., Zhao L., Chen T., Wang Y., Mao Y., Lv W., Zhou J. Identification for the optimal working parameters of as-extruded 42CrMo high-strength steel from a large range of strain, strain rate and temperature // *Materials Science and Engineering: A*. 2012. Vol. 538. P. 364–373. <https://doi.org/10.1016/j.msea.2012.01.062>
6. Yang W., Yang J., Shi Y., Yang Z., Gao F., Zhang R., Ye G. Effect of temperature on dephosphorization of hot metal in double slag converter steelmaking process by high temperature laboratorial experi-
1. Chaabet M., Dötsch E. Steelmaking based on inductive melting. *Induction Technology*. 2012, no. 1, pp. 49–58.
2. Aleksashin A.L., Schnaltzger I., Hollias G. Creation and growth of oxygen-converter steelmaking. *Metallurgist*. 2007, vol. 51, no. 1, pp. 60–65. <https://doi.org/10.1007/s11015-007-0014-4>
3. Głownia J. *Metallurgy and Technology of Steel Castings*. Bentham Science Publishers, 2017. 319 p. <https://doi.org/10.2174/97816810857081170101>
4. Golubtsov V.A., Shub L.G., Deryabin A.A., Usmanov R.G. Treating steel outside the furnace more efficiently. *Metallurgist*. 2006, vol. 50, no. 11–12, pp. 634–637. <https://doi.org/10.1007/s11015-006-0135-1>
5. Quan G., Zhao L., Chen T., Wang Y., Mao Y., Lv W., Zhou J. Identification for the optimal working parameters of as-extruded 42CrMo high-strength steel from a large range of strain, strain rate and temperature. *Materials Science and Engineering: A*. 2012, vol. 538, pp. 364–373. <https://doi.org/10.1016/j.msea.2012.01.062>
6. Yang W., Yang J., Shi Y., Yang Z., Gao F., Zhang R., Ye G. Effect of temperature on dephosphorization of hot metal in double slag converter steelmaking process by high temperature laboratorial experi-

- ments // *Steel Research International*. 2021. Vol. 92. No. 3. Article 2000438. <https://doi.org/10.1002/srin.202000438>
7. Kubat C., Taşkina H., Artırb R., Yilmazc A. Bofy-fuzzy logic control for the basic oxygen furnace (BOF) // *Robotics and Autonomous Systems*. 2004. Vol. 49. No. 3–4. P. 193–205. <https://doi.org/10.1016/j.robot.2004.09.007>
8. Ляховец М.В., Ивушкин К.А., Мышляев Л.П., Чернявский С.В., Львова Е.И. Современный синтез объекта управления и управляющей подсистемы // *Известия вузов. Черная металлургия*. 2014. Т. 57. № 12. С. 33–36. <https://doi.org/10.17073/0368-0797-2014-12-33-36>
9. Спирин В.А., Савин А.В., Чистяков В.В. и др. Система управления стеном сушки и нагрева сталеразливочных ковшей // *Современные технологии автоматизации*. 2000. № 3. С. 66–71.
10. Богущевский В.С., Зубова К.М. Математическое моделирование конвертерного процесса по энергосберегающей технологии // *Технологічні комплекси*. 2013. № 2. С. 32–38.
11. Бойко Ф.К., Птицына Е.В. Анализ способов и устройств управления процессами в электролизных и дуговых электротехнологических установках // *Наука и техника Казахстана*. 2006. № 1. С. 5–13.
12. Jiayan Z., Weixin Y., Jiahong L. Study of oxygen lance position control strategy with self-adaptive fuzzy PID control. In: *2010 Int. Conf. on Electrical and Control Engineering, IEEE 2010*. P. 2051–2054. <https://doi.org/10.1109/ICECE.2010.505>
13. Богущевский В.С., Литвинов Л.Ф., Рюмшин Н.А., Сорокин В.В. Математические модели и системы управления конвертерной плавкой. Киев: НПК «Киевский институт автоматизации», 1998. 304 с.
14. Синяков Р.В., Харченко А.В., Личконенко Н.В. Оптимизация проектирования и управления кислородно-конвертерной плавкой // *Металургия*. 2018. № 2. С. 18–27.
15. Jalkanen H., Holappa L. Converter steelmaking. In: *Treatise on Process Metallurgy*. Elsevier. 2014. Vol. 3. P. 223–270. <https://doi.org/10.1016/B978-0-08-096988-6.00014-6>
16. Laciak M., Kačur J., Flegner P., Terpák J., Durdán M., Tréfa G. The mathematical model for indirect measurement of temperature in the steel-making process. In: *Proceedings of the 2020 21th Int. Carpathian Control Conference (ICCC)*, IEEE 2020. Article 9257259. <https://doi.org/10.1109/ICCC49264.2020.9257259>
17. Kačur J., Laciak M., Flegner P., Terpák J., Durdán M., Tréfa G. Application of support vector regression for data-driven modeling of melt temperature and carbon content in LD converter. In: *Proceedings of the 2019 20th Int. Carpathian Control Conference (ICCC)*, IEEE 2019. Article 8765956. <http://dx.doi.org/10.1109/CarpathianCC.2019.8765956>
18. Penz F.M., Schenk J., Ammer R., Klösch G., Pastucha K., Reischl M. Diffusive steel scrap melting in carbon-saturated hot metal – Phenomenological investigation at the solid–liquid interface // *Materials*. 2019. Vol. 12. No. 8. Article 1358. <https://doi.org/10.3390/ma12081358>
19. Han M., Zhao Y. Dynamic control model of BOF steelmaking process based on ANFIS and robust relevance vector machine // *Expert Systems with Applications*. 2011. Vol. 38. No. 12. P. 14786–14798. <https://doi.org/10.1016/j.eswa.2011.05.071>
20. Соколов Б.М., Шепелявый А.И., Медведев А.В. Адаптивное управление конвертерной плавкой стали // *Вестник Санкт-Петербургского университета. Серия 1. Математика. Механика. Астрономия*. 2003. № 2. С. 58–65.
21. Веревкин С.В. Разработка и применение алгоритмов производственной координации (на примере сталеплавильного комплекса): автореф. дис. канд. техн. наук. Новокузнецк: ИЦ СибГИУ, 2003. 24 с.
22. Yang X., Li J., Zhang M., Yan F., Duan D., Zhang J. A further evaluation of the coupling relationship between dephosphorization and desulfurization abilities or potentials for CaO-based slags: Influence of slag chemical composition // *Metals*. 2018. Vol. 8. No. 12. Article 1083. <https://doi.org/10.3390/met8121083>
- periments. *Steel Research International*. 2021, vol. 92, no. 3, article 2000438. <https://doi.org/10.1002/srin.202000438>
7. Kubat C., Taşkina H., Artırb R., Yilmazc A. Bofy-fuzzy logic control for the basic oxygen furnace (BOF). *Robotics and Autonomous Systems*. 2004, vol. 49, no. 3–4, pp. 193–205. <https://doi.org/10.1016/j.robot.2004.09.007>
8. Lyakhovets M.V., Ivushkin K.A., Myshlyaev L.P., Chernyavskii S.V., L'vova E.I. The joint synthesis of the controlled object and control subsystem. *Izvestiya. Ferrous Metallurgy*. 2014, vol. 57, no. 12, pp. 33–36. (In Russ.). <https://doi.org/10.17073/0368-0797-2014-12-33-36>
9. Spirin V.A., Savin A.V., Chistyakov V.V., etc. Control system of the unit of steelmaking ladles drying and heating. *Sovremennye tekhnologii avtomatizatsii*. 2000, no. 3, pp. 66–71. (In Russ.).
10. Bogushevskii V.S., Zubova K.M. Mathematical modeling of converter process with energy-saving technology. *Tekhnologichni kompleksi*. 2013, no. 2, pp. 32–38. (In Russ.).
11. Boiko F.K., Ptitsyna E.V. Analysis of control methods and devices in electrolysis and arc electrotechnological plants. *Nauka i tekhnika Kazakhstana*. 2006, no. 1, pp. 5–13. (In Russ.).
12. Jiayan Z., Weixin Y., Jiahong L. Study of oxygen lance position control strategy with self-adaptive fuzzy PID control. In: *2010 Int. Conf. on Electrical and Control Engineering, IEEE 2010*, pp. 2051–2054. <https://doi.org/10.1109/ICECE.2010.505>
13. Bogushevskii V.S., Litvinov L.F., Ryumshin N.A., Sorokin V.V. *Mathematical Models and Control Systems for Converter Smelting*. Kiev: Kievskii institut avtomatiki, 1998, 304 p. (In Russ.).
14. Sinyakov R.V., Kharchenko A.V., Lichkonenko N.V. Optimization of engineering and control of oxygen converter smelting. *Metallurgiya*. 2018, no. 2, pp. 18–27. (In Russ.).
15. Jalkanen H., Holappa L. Converter steelmaking. In: *Treatise on Process Metallurgy*. Elsevier. 2014, vol. 3, pp. 223–270. <https://doi.org/10.1016/B978-0-08-096988-6.00014-6>
16. Laciak M., Kačur J., Flegner P., Terpák J., Durdán M., Tréfa G. The mathematical model for indirect measurement of temperature in the steel-making process. In: *Proceedings of the 2020 21th Int. Carpathian Control Conference (ICCC)*, IEEE 2020, article 9257259. <https://doi.org/10.1109/ICCC49264.2020.9257259>
17. Kačur J., Laciak M., Flegner P., Terpák J., Durdán M., Tréfa G. Application of support vector regression for data-driven modeling of melt temperature and carbon content in LD converter. In: *Proceedings of the 2019 20th Int. Carpathian Control Conference (ICCC)*, IEEE 2019, article 8765956. <http://dx.doi.org/10.1109/CarpathianCC.2019.8765956>
18. Penz F.M., Schenk J., Ammer R., Klösch G., Pastucha K., Reischl M. Diffusive steel scrap melting in carbon-saturated hot metal – phenomenological investigation at the solid–liquid interface. *Materials*. 2019, vol. 12, no. 8, article 1358. <https://doi.org/10.3390/ma12081358>
19. Han M., Zhao Y. Dynamic control model of BOF steelmaking process based on ANFIS and robust relevance vector machine. *Expert Systems with Applications*. 2011, vol. 38, no. 12, pp. 14786–14798. <https://doi.org/10.1016/j.eswa.2011.05.071>
20. Sokolov B.M., Shepelyavii A.I., Medvedev A.V. Adaptive control of steel converter smelting. *Vestnik Sankt-Peterburgskogo universiteta. Seriya 1. Matematika. Mekhanika. Astronomiya*. 2003, no. 2, pp. 58–65. (In Russ.).
21. Verevkin S.V. *Research and application of production coordination algorithms (steelmaking complex case): Extended Abstract of Cand. Sci. Diss.* Novokuznetsk: ITs SibSIU, 2003, 24 p. (In Russ.).
22. Yang X., Li J., Zhang M., Yan F., Duan D., Zhang J. A further evaluation of the coupling relationship between dephosphorization and desulfurization abilities or potentials for CaO-based slags: Influence of slag chemical composition. *Metals*. 2018, vol. 8, no. 12, article 1083. <https://doi.org/10.3390/met8121083>

23. Гулыга Д.В., Сущенко А.В. Моделирование динамики температуры металла в сталеразливочном ковше на участке конвертер – МНЛЗ // *Сталь*. 2004. № 9. С. 15 – 19.
24. Медведев А.В. Основы теории адаптивных систем. Красноярск: изд. Сиб. гос. аэрокосмич. ун-та, 2015. 526 с.
25. Медведев А.В. Основы теории непараметрических систем. Красноярск: изд. СибГАУ им. Решетнева, 2018. 732 с.
26. Катковник В.Я. Сходимость линейных и нелинейных непараметрических оценок «ядерного» типа // *Автоматика и телемеханика*. 1983. № 4. С. 108–120.
27. Цыбаков А.Б. О сходимости непараметрических робастных алгоритмов восстановления функций // *Автомат. и телемех.* 1983. № 12. С. 66–76.
28. Kornet M.E. Raskina A.V., Korneeva A.A., Videnin S.A., Masich I.S. Non-parametric algorithms of identification and control of group of technological processes in low-carbon steel production // *Journal of Physics: Conference Series*. IOP Publishing, 2020. Vol. 1679. No. 4. Article 042042. <https://doi.org/10.1088/1742-6596/1679/4/042042>
23. Gulyga D.V., Sushchenko A.V. Modelling of metal temperature dynamics in the ladle while moving from converter to CCM. *Stal'*. 2004, no. 9, pp. 15–19. (In Russ.).
24. Medvedev A.V. *Basics of Adaptive Systems Theory*. Krasnoyarsk: SibSAU, 2015, 526 p. (In Russ.).
25. Medvedev A.V. *Basics of Non-Parametric Systems Theory*. Krasnoyarsk: izd. SibSAU im. Reshetneva, 2018, 732 p. (In Russ.).
26. Katkovnik V.Ya. Convergence of linear and nonlinear non-parametric “nuclear” estimates. *Avtomatika i telemekhanika*. 1983, no. 4, pp. 108–120. (In Russ.).
27. Tsybakov A.B. On convergence of non-parametric robust algorithms for functions approximation. *Avtomatika i telemekhanika*. 1983, no. 12, pp. 66–76. (In Russ.).
28. Kornet M.E. Raskina A.V., Korneeva A.A., Videnin S.A., Masich I.S. Non-parametric algorithms of identification and control of group of technological processes in low-carbon steel production. *Journal of Physics: Conference Series*. IOP Publishing. 2020, vol. 1679, no. 4, article 042042. <https://doi.org/10.1088/1742-6596/1679/4/042042>

СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ

INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Мария Евгеньевна Корнет, соискатель степени к.т.н. кафедры информационных систем, Институт космических и информационных технологий СФУ

ORCID: 0000-0003-4100-5644

E-mail: marya.kornet@gmail.com

Анастасия Владимировна Раскина, к.т.н., доцент кафедры информационных систем, Институт космических и информационных технологий СФУ

ORCID: 0000-0002-8161-8317

E-mail: raskina.1012@gmail.com

Анна Анатольевна Корнеева, к.т.н., доцент кафедры интеллектуальных систем управления, Институт космических и информационных технологий СФУ

ORCID: 0000-0003-1585-6824

E-mail: anna.korneeva.90@mail.ru

Mariya E. Kornet, Candidates for a degree of Cand. Sci. (Eng.) of the Chair of Information Systems, SibFU Institute of Space and Information Technologies

ORCID: 0000-0003-4100-5644

E-mail: marya.kornet@gmail.com

Anastasiya V. Raskina, Cand. Sci. (Eng.), Assist. Prof. of the Chair of Information Systems, SibFU Institute of Space and Information Technologies

ORCID: 0000-0002-8161-8317

E-mail: raskina.1012@gmail.com

Anna A. Korneeva, Cand. Sci. (Eng.), Assist. Prof. of the Chair of Intelligent Control Systems, SibFU Institute of Space and Information Technologies

ORCID: 0000-0003-1585-6824

E-mail: anna.korneeva.90@mail.ru

Поступила в редакцию 23.03.2021

После доработки 28.04.2021

Принята к публикации 30.04.2021

Received 23.03.2021

Revised 28.04.2021

Accepted 30.04.2021