



УДК 669

DOI 10.17073/0368-0797-2025-6-636-645



Оригинальная статья

Original article

## ОБЩИЕ ПРИНЦИПЫ МОДЕЛИРОВАНИЯ И ОПТИМИЗАЦИИ ЭЛЕКТРОСТАЛЕПЛАВИЛЬНОГО ПРОЦЕССА

И. А. Рыбенко, Е. В. Протопопов<sup>✉</sup>, Е. М. Запольская

Сибирский государственный индустриальный университет (Россия, 654007, Кемеровская обл. – Кузбасс, Новокузнецк, ул. Кирова, 42)

✉ protopopov\_ev@sibsiu.ru

**Аннотация.** Развитие металлургии предусматривает дальнейшее увеличение объемов и совершенствование процессов выплавки стали за счет внедрения различных прогрессивных ресурсо- и энергосберегающих технологий. Основные и наиболее универсальные управляющие воздействия, влияющие на ход и технико-экономические показатели процесса, неразрывно связаны с оптимизацией параметров технологии. Оптимизация параметров технологического процесса ориентирована на достижение наилучших результатов в области производительности, качества продукции и снижения затрат ресурсов. Это достигается посредством регулярного мониторинга и анализа ключевых показателей, а также внесения необходимых корректировок в управление процессом. Удачное сочетание указанных факторов способствует максимизации производственной эффективности и повышению конкурентоспособности продукции на рынке. Для расчета статических режимов процесса целесообразно использование ресурсов математического моделирования и разработки инструментальной системы. При создании статической модели расчета электросталеплавильного процесса рассматривали как сложную термодинамическую систему, в которую поступают конденсированные и газообразные входные среды, а конечными продуктами являются металл, шлак и газ. Расчет статических режимов электросталеплавильного процесса, осуществляемый на основе материального и теплового балансов, базируется на законах сохранения массы и энергии относительно составляющих гетерогенной системы. Решение оптимизационной задачи на основе формальных методов предусматривает выбор различных критериев и задание системы ограничений (требования к составу металла, диапазоны изменения расходов компонентов шихтовых материалов и параметров состояния системы, соблюдение закона сохранения массы на уровне потоков, веществ и элементов, соблюдение закона сохранения энергии). Особенностью разработанного метода математического моделирования и оптимизации электросталеплавильного процесса является системное решение комплекса взаимосвязанных оптимизационных задач по определению оптимальных условий протекания процессов в металлургической системе и оптимальных режимов реализации технологии электроплавки.

**Ключевые слова:** электросталеплавильное производство, шихтовый материал, температура металла, моделирование, оптимизация

**Благодарности:** Исследование проводилось в рамках государственного задания Министерства науки и высшего образования Российской Федерации № 075-00087-2401.

**Для цитирования:** Рыбенко И.А., Протопопов Е.В., Запольская Е.М. Общие принципы моделирования и оптимизации электросталеплавильного процесса. *Известия вузов. Черная металлургия*. 2025;68(6):636–645. <https://doi.org/10.17073/0368-0797-2025-6-636-645>

## GENERAL PRINCIPLES OF MODELING AND OPTIMIZATION OF ELECTRIC STEELMAKING PROCESS

I. A. Rybenko, E. V. Protopopov<sup>✉</sup>, E. M. Zapol'skaya

Siberian State Industrial University (42 Kirova Str., Novokuznetsk, Kemerovo Region – Kuzbass 654007, Russian Federation)

✉ protopopov\_ev@sibsiu.ru

**Abstract.** Development of metallurgy provides for further increase and improvement of steel production volumes through the introduction of various advanced resource- and energy-saving technologies. The main and most universal control actions that affect the course and technical-economic indicators of the process are inextricably linked to the optimization of technology parameters which is focused on achieving the best results in the field of productivity, product quality and reduction of resource costs. This is achieved through the regular monitoring and analysis of key indicators, as well as making necessary adjustments to process management. A successful combination of these factors contributes to maximizing the production efficiency and increasing the competitiveness of products on the market. To calculate the process static parameters, it is advisable to use the resources of mathematical modeling and development of an instrumental system. When creating a static calculation model, the electric steelmaking process was considered as a complex thermodynamic system into which condensed and gaseous input media enter, and the final products are metal, slag and gas.

Calculation of the static modes of the electric steelmaking process is carried out on the basis of calculations of material and thermal balances based on the laws of mass and energy conservation relative to the components of a heterogeneous system. The solution of the optimization problem based on formal methods involves selection of various criteria and setting a system of restrictions (requirements for metal composition; ranges of change in the cost of components of charge materials and system state parameters; compliance with the law of mass conservation at the level of fluxes, substances and elements; compliance with the law of energy conservation). A feature of the developed method of mathematical modeling and optimization of the electric steelmaking process is the systematic solution of a set of interrelated optimization problems to determine the optimal conditions for the processes in the metallurgical system and the optimal solutions for implementation of electric smelting technology.

**Keywords:** electric steelmaking, charge material, metal temperature, modeling, optimization

**Acknowledgements:** The work was performed within the framework of the state assignment of the Ministry of Science and Higher Education of the Russian Federation No. 075-00087-2401.

**For citation:** Rybenko I.A., Protopopov E.V., Zapol'skaya E.M. General principles of modeling and optimization of electric steelmaking process. *Izvestiya. Ferrous Metallurgy*. 2025;68(6):636–645. <https://doi.org/10.17073/0368-0797-2025-6-636-645>

## ВВЕДЕНИЕ

В настоящее время Федеральные программы технического развития металлургии предусматривают дальнейшее увеличение объемов и совершенствование процессов выплавки стали за счет внедрения различных прогрессивных ресурсо- и энергосберегающих технологий. Одной из главных задач современного сталеплавленного производства остается получение расплавленного металлического полупродукта с заданными химическим составом и температурой при минимальных затратах материальных и энергетических ресурсов [1 – 5]. Основные и наиболее универсальные управляющие воздействия, которые влияют на ход и технико-экономические показатели процесса, как правило, неразрывно связаны с оптимизацией параметров технологии [6 – 8]. При этом возникает необходимость реализации задач по обеспечению режимов оптимального функционирования дуговых сталеплавленных печей и решения задач прогнозирования основных показателей электроплавки [5 – 8].

Для решения поставленных задач целесообразны использование ресурсов математического моделирования и разработка инструментальной системы для расчета статических режимов процесса, то есть расчета и анализа процесса на уровне входных-выходных потоков [9 – 12].

Методики расчета статических режимов позволяют решать следующие задачи: расчеты материального и теплового балансов процесса<sup>1</sup> [13 – 15]; оценка предельных энергетических возможностей; определение термодинамических границ существования и условий взаимодействия компонентов в металлургическом агрегате; выбор наиболее эффективных компонентов входного потока с целью получения металла с заданными свойствами для достижения оптимальных технико-экономических показателей [13 – 16].

<sup>1</sup> Имитационная модель электросталеплавленного цеха Челябинского металлургического комбината. URL: <https://www.anylogic.ru/resources/case-studies/chelyabinsk-metallurgical-plant-uses-a-simulation-model-electric-furnace-melting-shop/>

## МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

При создании статической модели расчета электросталеплавленного процесса рассматривали как сложную термодинамическую систему, в которую поступают конденсированные и газообразные входные среды, а конечными продуктами являются металл, шлак и газ [17 – 20]. В составе конденсированных входных потоков, в зависимости от варианта технологии, присутствуют: металлошихта (жидкий или чушковый чугун, металлический лом); твердые окислители (агломерат, железная руда, окатыши); шлакообразующие материалы (известь, известняк, плакировый шпат); науглероживатели (металлургический кокс, коксовый орешек, пыль установок сухого тушения кокса (УСТК), электродный бой и т. д.); ферросплавы. Газообразными входными потоками являются кислород и природный газ [21 – 23].

Тогда определяющими параметрами входных потоков будут:  $K$  – общее количество;  $K^f$ ,  $K^r$  и  $G_k^f$ ,  $G_k^r$  – количество и масса конденсированных, газообразных потоков (индексы  $f$  и  $r$  соответствуют конденсированным и газообразным потокам);  $N_k^f$ ,  $N_k^r$  – количество веществ в  $k$ -ом потоке;  $t_k^f$ ,  $t_k^r$  и  $\rho_k^f$ ,  $\rho_k^r$  – температура и плотность потоков, °C и кг/м<sup>3</sup>;  $|R_m|_k$ ,  $\{R_m\}_k$  – содержание вещества  $R_m$  в  $k$ -ом потоке, %.

Выходные потоки характеризуют параметры:  $G_m$ ,  $G_{\text{шл}}$ ,  $G_r$  – масса металла, шлака, газа;  $t_m$ ,  $t_{\text{шл}}$ ,  $t_r$  – температура металла, шлака, газа, °C;  $N_m$ ,  $N_{\text{шл}}$ ,  $N_r$  – количество веществ в соответствующих фазах;  $[R_n]$ ,  $(R_n)$ ,  $\{R_n\}$  – содержание вещества  $R_n$  в металлической, шлаковой и газовой фазах.

При рассмотрении параметров системы приняли, что вещества  $R_m$  и  $R_n$  являются элементами множества  $\mathcal{R}$  и могут присутствовать в разных фазах в виде различных соединений  $E_{ix}E_{jy}$ , состоящих из элементов  $E_i$  и  $E_j$  множества  $\mathcal{X}$ . С входными потоками в реактор могут поступать следующие соединения: конденсированная фаза – Fe, C, Mn, Si, S, P, Al, Ni, Mo, W, V, Ti, Cr, B, Cu, FeO, Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, CaO, SiO<sub>2</sub>, MgO, MnO, P<sub>2</sub>O<sub>5</sub>, CaS, CaF<sub>2</sub>, NiO, V<sub>2</sub>O<sub>5</sub>, Cr<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, TiO<sub>2</sub>, MoO<sub>2</sub>, WO<sub>2</sub>, CuO, B<sub>2</sub>O<sub>3</sub>; газовая фаза – H<sub>2</sub>O, CO<sub>2</sub>, O<sub>2</sub>, CH<sub>4</sub>, CO, N<sub>2</sub>, H<sub>2</sub>.

Элементами, образующими эти вещества, являются: Fe, C, O, Mn, Si, S, P, Al, Ca, Mg, H, F, Ni, Ti, V, Cr, N, B, Cu, Mo, W.

Расчет статических режимов электросталеплавильного процесса заключается в определении расходов шихтовых материалов, необходимых для достижения заданных параметров и температуры металла, и базируется на балансовых моделях и уравнениях термодинамики. Схема расчета представлена на рис. 1.

Задание исходных данных предусматривает ввод следующей информации: задание параметров входных потоков; задание параметров процесса; задание коэффициентов распределения элементов по фазам.

В качестве параметров процесса приняты:  $t_m$ ,  $t_{шл}$ ,  $t_f$  – температура фаз, °C,  $Q_{пот}$  – тепловые потери в окружающую среду,  $Q_{кор}$  – потери металла с корочками;  $\eta_{CO}$  – степень окисления углерода до CO;  $\eta_{FeO}$  – степень окисления железа до FeO;  $\alpha$  – степень усвоения кислорода.

Коэффициенты распределения элементов по фазам заданы с учетом экспериментальных данных в задан-

ных диапазонах изменения параметров входных-выходных потоков.

В качестве технико-экономических показателей приняты:  $\Xi$  – энергоемкость процесса, кВт·ч/т;  $C$  – себестоимость продукции, руб./т;  $\Pi$  – производительность агрегата, т/ч;  $g_k$  – удельные расходы материалов, кг/т.

После задания необходимых для расчета параметров формируется таблица исходных данных по входным потокам. В качестве исходной информации используются: температура, плотность и расход  $k$ -го входного потока. Ввод исходных данных предусматривает задание химического состава шихтовых материалов. Для всех вариантов расчетов приведен базовый состав конденсированных и газообразных входных потоков, а также летучих компонентов шихты, который при желании может быть изменен пользователем.

## РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

Расчет статических режимов электросталеплавильного процесса осуществляется на основе материаль-

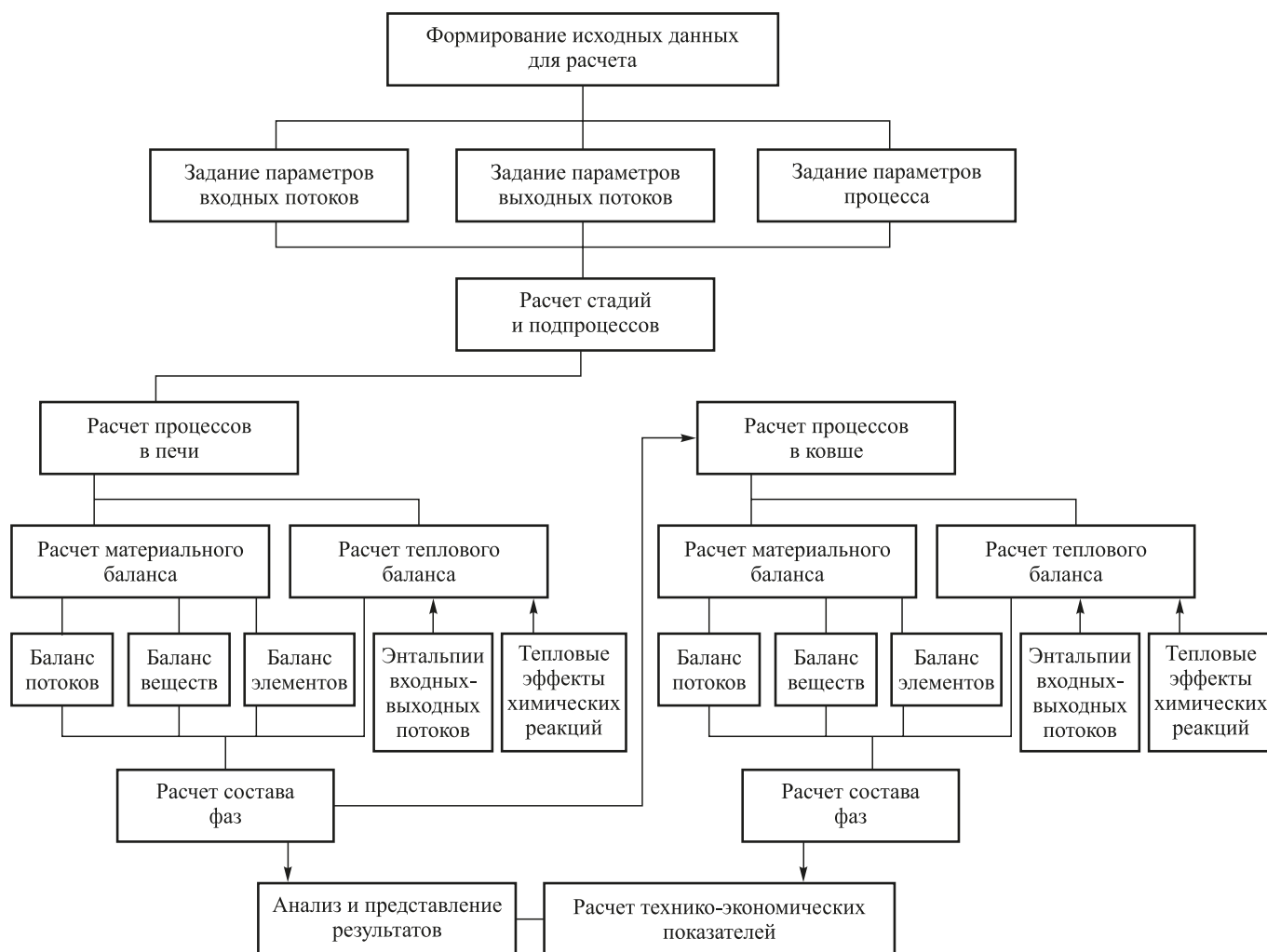


Рис. 1. Схема расчета электросталеплавильного процесса

Fig. 1. Calculation scheme of electric steelmaking process

ного и теплового балансов, базирующихся на законах сохранения массы и энергии относительно составляющих гетерогенной системы. Алгоритм расчета материального и теплового балансов представлен на рис. 2.

Материальный баланс для всей системы на уровне входных-выходных потоков имеет вид:

$$\sum_{k=1}^K G_k = \sum_{l=1}^L G_l.$$

С учетом фаз уравнение материального баланса можно представить следующим образом:

$$\sum_{k=1}^{K^f} G_k^f + \sum_{k=1}^{K^r} G_k^r = G_m + G_{\text{шл}} + G_r.$$

Общая масса веществ, поступающих в печь с входными потоками, составляет:

$$\sum_{k=1}^K G_k = \sum_{k=1}^{K^f} \sum_{m=1}^{N_k^f} \frac{G_k^f |R_m|_k}{100} + \sum_{k=1}^{K^r} \sum_{m=1}^{N_k^r} \frac{G_k^r \{R_m\}_k}{100}.$$

Масса веществ выходных потоков определяется массой веществ в металлической, шлаковой и газовой фазах:

$$\sum_{l=1}^L G_l = \sum_{n=1}^{N_m} \frac{G_m [R_n]}{100} + \sum_{n=1}^{N_{\text{шл}}} \frac{G_{\text{шл}} (R_n)}{100} + \sum_{n=1}^{N_r} \frac{G_r \{R_n\}}{100}.$$

Таким образом, уравнение материального баланса на уровне потоков веществ имеет следующий вид:

$$\begin{aligned} & \sum_{k=1}^{K^f} \sum_{m=1}^{N_k^f} \frac{G_k^f |R_m|_k}{100} + \sum_{k=1}^{K^r} \sum_{m=1}^{N_k^r} \frac{G_k^r \{R_m\}_k}{100} = \\ & = \sum_{n=1}^{N_m} \frac{G_m [R_n]}{100} + \sum_{n=1}^{N_{\text{шл}}} \frac{G_{\text{шл}} (R_n)}{100} + \sum_{n=1}^{N_r} \frac{G_r \{R_n\}}{100}. \end{aligned}$$

Для того, чтобы определить состав фаз выходных потоков, составляются уравнения баланса по каждому элементу  $E_i$ , который может присутствовать в разных фазах в виде различных соединений:

$$\begin{aligned} & \sum_{k=1}^{K^f} \sum_{m=1}^{N_k^f} \frac{G_k^f |E_{ix_m} E_{jy_m}|_k}{100} \frac{x_m M_{E_i}}{M_{E_{ix_m} E_{jy_m}}} + \\ & + \sum_{k=1}^{K^r} \sum_{m=1}^{N_k^r} \frac{G_k^r \{E_{ix_m} E_{jy_m}\}_k}{100} \frac{x_m M_{E_i}}{M_{E_{ix_m} E_{jy_m}}} = \\ & = \frac{G_m [E_i]}{100} + \sum_{n=1}^{N_{\text{шл}}^{E_i}} \frac{G_{\text{шл}} (E_{ix_n} E_{jy_n})}{100} \frac{x_n M_{E_i}}{M_{E_{ix_n} E_{jy_n}}} + \\ & + \sum_{n=1}^{N_r^{E_i}} \frac{G_r \{E_{ix_n} E_{jy_n}\}}{100} \frac{x_n M_{E_i}}{M_{E_{ix_n} E_{jy_n}}}, \end{aligned}$$

где  $|E_{ix_m} E_{jy_m}|_k$ ,  $\{E_{ix_m} E_{jy_m}\}_k$  – концентрация  $m$ -го вещества, содержащего элемент  $E_i$  в  $k$ -ом конденсированном или газообразном входном потоке соответственно, %;  $[E_i]$  – концентрация вещества, состоящего из элемента  $E_i$ , в металле, %;  $(E_{ix_n} E_{jy_n})$ ,  $\{E_{ix_n} E_{jy_n}\}$  – концентрация  $n$ -го вещества, содержащего элемент  $E_i$  в шлаковой и газовой фазах выходного потока соответственно, %;  $N_k^{E_i^f}$ ,  $N_{\text{шл}}^{E_i}$ ,  $N_r^{E_i}$  – количество веществ, содержащих элемент  $E_i$ , в  $k$ -ом входном потоке, шлаке и газе;  $x_m$ ,  $y_m$  – стехиометрические коэффициенты  $m$ -го соединения элемента  $E_i$ ;  $M_{E_i}$ ,  $M_{E_{ix_m} E_{jy_m}}$  – молярные массы  $E_i$  элемента и его соединений, кг/моль.

Общая масса конденсированного вещества  $R$ , поступающего в систему с входными потоками, составляет:

$$G_{|R|}^{\text{BX}} = \sum_{k=1}^{K^f} \sum_{m=1}^{N_k^f} \frac{G_k^f |R_m|_k}{100}.$$

Масса газообразного вещества  $R$ , поступающего в систему с входными потоками, также определяется с учетом его содержания в газообразных входных потоках:

$$G_{|R|}^{\text{BX}} = \sum_{k=1}^{K^r} \sum_{m=1}^{N_k^r} \frac{G_k^r \{R_m\}_k}{100}.$$

Состав фаз выходного потока определяется следующим образом. В соответствии с коэффициентами распределения элементов между фазами количество элемента  $E_i$  в металле определяется по формуле:

$$G_{[E_i]} = G_{E_{ii}}^{\text{BX}} L_{[E_i]},$$

здесь  $L_{[E_i]}$  – коэффициент распределения элемента  $E_i$  в металле.

Количество оксида элемента  $E_i$  в шлаке соответственно составляет

$$G_{(E_{ix_n} O_{jy_n})} = G_{E_i}^{\text{BX}} L_{(E_i)} \frac{M_{E_{ix_n} O_{jy_n}}}{x_n M_{E_i}}.$$

Определяем количество кислорода, которое остается в системе после окисления всех компонентов и затрачивается на окисление железа:

$$\begin{aligned} G_O &= \sum_{k=1}^{K^f} \sum_{m=1}^{N_k^f} \frac{G_k^f |E_{ix_m} O_{jy_m}|_k}{100} \frac{0,016 y_m}{M_{E_{ix_m} O_{jy_m}}} - \\ & - \sum_{n=1}^{N_{\text{шл}}^{O_2}} \frac{G_{\text{шл}} (E_{ix_n} O_{jy_n})}{100} \frac{0,016 y_n}{M_{E_{ix_n} O_{jy_n}}}. \end{aligned}$$

Определяем количество оксидов железа в шлаке:

$$G_{(\text{FeO})} = G_O \eta_{\text{FeO}};$$

$$G_{(\text{Fe}_2\text{O}_3)} = G_O (1 - \eta_{\text{FeO}}).$$

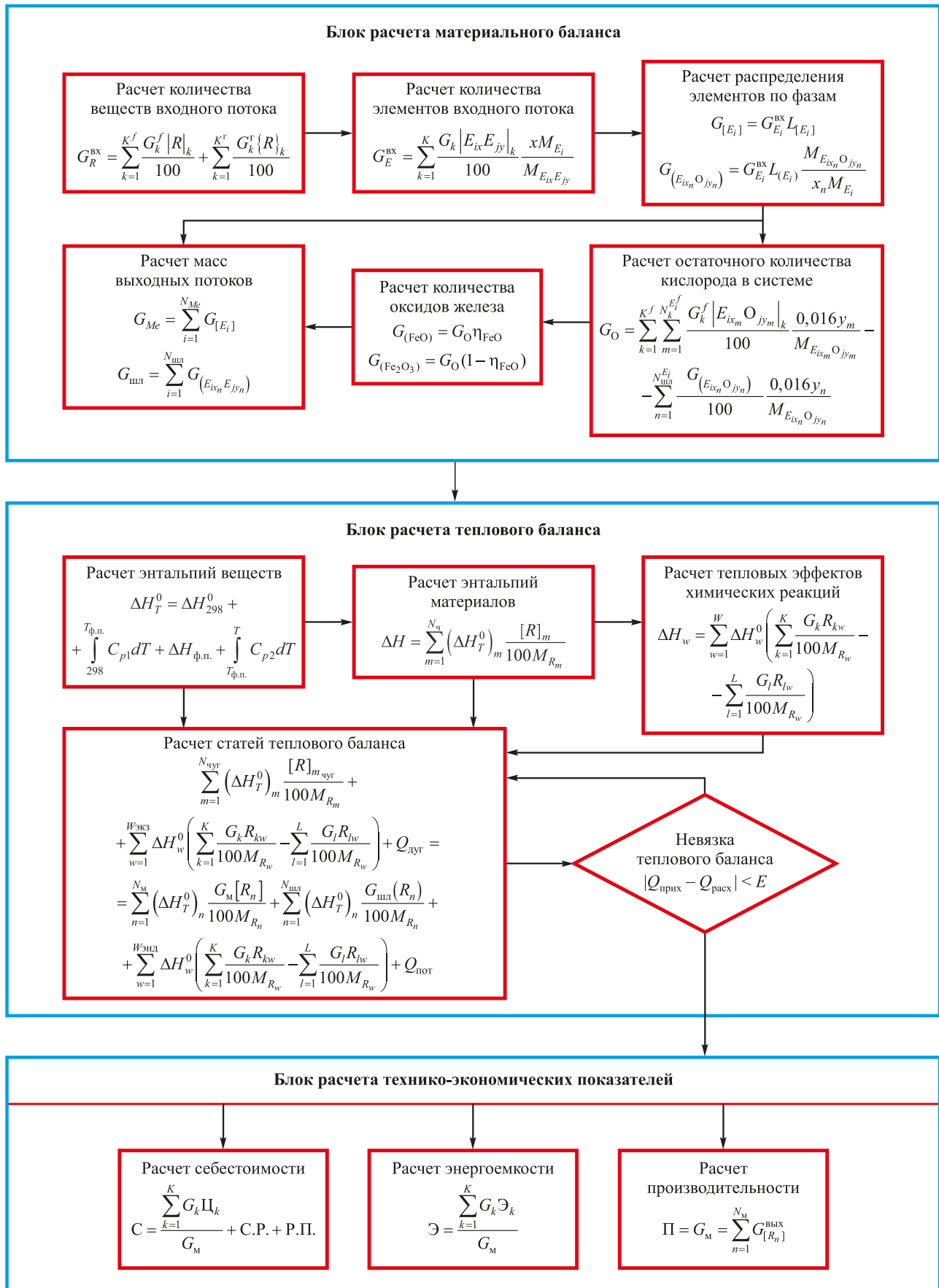


Рис. 2. Алгоритм расчета материального и теплового балансов

Fig. 2. Algorithm for calculating material and thermal balances



Тогда количество железа в металле определим следующим образом:

$$G_{[Fe]} = G_{Fe}^{BX} - G_{(FeO)} \frac{0,056}{0,072} - G_{Fe_2O_3}^{BX} \frac{0,112}{0,160}.$$

Соответственно массы металла и шлака будут составлять:

$$G_{Me} = \sum_{i=1}^{N_{Me}} G_{[E_i]};$$

$$G_{шл} = \sum_{i=1}^{N_{шл}} G_{(E_{i,zn} E_{i,yn})}.$$

Аналогично проводится расчет состава и массы фаз в ковше, только в данном случае входными потоками являются металл, полученный в печи, и шлак, частично попадающий в ковш при сливе.

Для расчета состава компонентов газовой фазы предложен следующий механизм образования отходящих газов в электропечи. В технологии с применением природного газа сделано допущение его полного сгорания, что приводит к химическому составу газов в выходном потоке при классическом разложении.

При полном сгорании природного газа образуются  $CO_2$  и  $H_2O$ :

$$G_{(CO_2)}^{гор} = G_{(CH_4)}^{BX} (1 - \eta_{конв}) \frac{0,044}{0,016};$$

$$G_{(H_2O)}^{гор} = G_{(CH_4)}^{BX} (1 - \eta_{конв}) \frac{0,018}{0,016}.$$

Количество  $CO$ , образующегося при горении углерода шихты, можно определить следующим образом:

$$G_{(CO)} = \eta_{CO} \left( \sum_{k=1}^{K^f} \frac{G_k^f |C|_k}{100} - \frac{G_m[C]}{100} \right) \frac{0,028}{0,012}.$$

С учетом горения природного газа количество  $CO_2$  в отходящих газах будет составлять:

$$G_{(CO_2)} = (1 - \eta_{CO}) \times \left( \sum_{k=1}^{K^f} \frac{G_k^f |C|_k}{100} - \frac{G_m[C]}{100} \right) \frac{0,044}{0,012} + G_{(CO_2)}^{гор}.$$

Общее количество водорода в отходящих газах составляет:

$$G_{(H_2)} = G_{(H_2)}^{BX}.$$

Количество водяных паров определяется как

$$G_{(H_2O)} = G_{(H_2O)}^{BX} + G_{(H_2O)}^{гор}.$$

Количество азота в отходящих газах равно количеству азота, поступающего с входными потоками в единицу времени:

$$G_{(N_2)} = G_{(N_2)}^{BX}.$$

Количество  $SO_2$  в отходящих газах определяется в соответствии с коэффициентом перехода серы в газовую фазу:

$$G_{(SO_2)} = G_S^{BX} \alpha_{[S]} \frac{0,064}{0,032}.$$

Общая масса газа составляет:

$$G_r = G_{(CO)}^{ВЫХ} + G_{(CO_2)}^{ВЫХ} + G_{(H_2)}^{ВЫХ} + G_{(H_2O)}^{ВЫХ} + G_{(SO_2)}^{ВЫХ} + G_{(N_2)}^{ВЫХ}.$$

При выводе уравнений теплового баланса принято, что основными определяющими процессами для теплового состояния являются: физическое тепло шихтовых материалов; теплообмен с окружающей средой; тепло от горения электрической дуги; химические реакции с соответствующими тепловыми эффектами. Уравнения теплового баланса строили на основе закона сохранения энергии  $Q_{прих} = Q_{расх}$ .

С учетом теплосодержания входных-выходных потоков, общего тепла химических реакций, протекающих в системе, тепла дуги, а также теплообмена с окружающей средой уравнение теплового баланса имеет следующий вид:

$$\sum_{k=1}^{K^f} G_k^f \Delta H_k^f + \sum_{k=1}^{K^r} G_k^r \Delta H_k^r + Q_{дуг} =$$

$$= \sum_{l=1}^L G_l \Delta H_l + \Delta H_{x.p.} + Q_{пот},$$

где  $\Delta H_k^f$ ,  $\Delta H_k^r$ ,  $\Delta H_l$  – энтальпии единицы массы  $k$ -го конденсированного либо газообразного входного и  $l$ -го выходного потоков относительно нормальных условий и температуры 298 К;  $Q_{дуг}$  – приход тепла в систему от горения дуги;  $Q_{пот}$  – тепловые потери в окружающую среду;  $\Delta H_{x.p.}$  – суммарный тепловой эффект химических реакций.

Энтальпию, отличную от нуля, имеет только жидкий чугун, тогда энтальпия единицы массы жидкого чугуна относительно  $T = 298$  К будет равна:

$$\Delta H_{чуг} = \sum_{m=1}^{N_{чуг}} (\Delta H_T^0)_m \frac{[R]_{m_{чуг}}}{100 M_{R_m}},$$

где  $(\Delta H_T^0)_m$  – изменение энтальпии  $m$ -го вещества жидкого чугуна при нагреве от 298 К до  $T_k$ , кДж/моль;  $[R]_{m_{чуг}}$  – концентрация вещества  $R_m$ , %;  $M_{R_m}$  – молярная масса вещества  $R_m$ , кг/моль.

Энтальпии единицы массы металла, шлака и газа соответственно равны:

$$\Delta H_{\text{м}} = \sum_{n=1}^{N_{\text{м}}} (\Delta H_T^0)_n \frac{[R_n]}{100 M_{R_n}};$$

$$\Delta H_{\text{шл}} = \sum_{n=1}^{N_{\text{шл}}} (\Delta H_T^0)_n \frac{(R_n)}{100 M_{R_n}};$$

$$\Delta H_{\text{г}} = \sum_{n=1}^{N_{\text{г}}} (\Delta H_T^0)_n \frac{\{R_n\}}{100 M_{R_n}}.$$

Тепловой эффект химических реакций определяется суммой тепловых эффектов независимых реакций перехода системы из начального состояния в конечное:

$$\Delta H_{\text{х.р.}} = \sum_{w=1}^W \Delta H_w,$$

где  $W$  – число независимых реакций;  $\Delta H_w = \Delta H_w^0 \Delta n_{R_w}$  – тепловой эффект  $w$ -ой химической реакции, кДж/моль;  $\Delta H_w^0$  – стандартный тепловой эффект  $w$ -ой химической реакции;  $\Delta n_{R_w}$  – количество молей вещества  $R$ , прореагировавшего в  $w$ -ой реакции.

Число молей участвовавшего в реакции вещества  $R_w$  определяется разностью его содержания во входных и выходных потоках:

$$\Delta n_{R_w} = \sum_{k=1}^K \frac{G_k R_{kw}}{100 M_{R_w}} - \sum_{l=1}^L \frac{G_l R_{lw}}{100 M_{R_w}}.$$

Тепло от горения дуги определяем с учетом расхода электроэнергии:

$$Q_{\text{дуг}} = 3600E,$$

где  $E$  – расход электроэнергии, кВт·ч.

С учетом вышеизложенного уравнение теплового баланса имеет следующий вид:

$$\sum_{m=1}^{N_{\text{чуг}}} (\Delta H_T^0)_m \frac{[R]_{\text{чуг}}}{100 M_{R_m}} +$$

$$+ \sum_{w=1}^{W_{\text{экз}}} \Delta H_w^0 \left( \sum_{k=1}^K \frac{G_k R_{kw}}{100 M_{R_w}} - \sum_{l=1}^L \frac{G_l R_{lw}}{100 M_{R_w}} \right) + Q_{\text{дуг}} =$$

$$= \sum_{n=1}^{N_{\text{м}}} (\Delta H_T^0)_n \frac{G_{\text{м}} [R_n]}{100 M_{R_n}} + \sum_{n=1}^{N_{\text{шл}}} (\Delta H_T^0)_n \frac{G_{\text{шл}} (R_n)}{100 M_{R_n}} +$$

$$+ \sum_{w=1}^{W_{\text{энд}}} \Delta H_w^0 \left( \sum_{k=1}^K \frac{G_k R_{kw}}{100 M_{R_w}} - \sum_{l=1}^L \frac{G_l R_{lw}}{100 M_{R_w}} \right) + Q_{\text{пот}}.$$

Основными статьями приходной части теплового баланса являются тепло жидкого чугуна, тепло экзотермических реакций окисления компонентов шихты газообразным кислородом, тепло реакций шлакообразова-

ния и тепло горения дуги. К расходной части теплового баланса относятся затраты тепла на нагрев металла, шлака и газа, на разложение карбонатов и оксидов железа, на испарение влаги и тепловые потери в окружающую среду.

Энтальпии входных и выходных потоков рассчитывали с использованием следующих справочных данных: коэффициентов аппроксимационного уравнения для теплоемкости вещества ( $c_0, c_{-1}, c_1, c_2, c_3$ ), изменения энтальпии образования и энтропии при стандартной температуре ( $\Delta_f H_{298}^0, S_{298}^0$ ), данных по фазовым переходам ( $T_{\text{ф.п.}}, \Delta H_{\text{ф.п.}}^0$ ) для индивидуальных веществ.

Решение оптимизационной задачи на основе формальных методов предусматривает выбор различных критериев и задание системы ограничений (требования к составу металла, диапазоны изменения расходов компонентов шихтовых материалов и параметров состояния системы, соблюдение закона сохранения массы на уровне потоков, веществ и элементов; соблюдение закона сохранения энергии).

В качестве критериев могут быть выбраны следующие показатели:

– суммарный расход шихтовых материалов на единицу продукции, кг/т,

$$P = \sum_{k=1}^K g_k = \frac{\sum_{k=1}^K G_k}{G_{\text{м}}} \cdot 1000 \rightarrow \min;$$

– себестоимость продукции, руб/т,

$$C = \frac{\sum_{k=1}^K G_k \Pi_k}{G_{\text{м}}} + \text{О.Р.} + \text{Р.П.} \rightarrow \min;$$

– энергозатраты на единицу продукции, ГДж/т,

$$\Theta = \frac{\sum_{k=1}^K G_k \Theta_k}{G_{\text{м}}} \rightarrow \min;$$

– производительность агрегата

$$\Pi = G_{\text{м}} = \sum_{n=1}^{N_{\text{м}}} G_{[R_n]}^{\text{вых}} \rightarrow \max,$$

где  $\Pi_k$  – цена  $k$ -го материала входных потоков, руб/т; О.Р. – общезаводские затраты, руб./т; Р.П. – расходы по переделу, руб./т;  $\Theta_k$  – удельная энергоемкость  $k$ -го материала, ГДж/т.

Постановка задачи оптимизации заключается в нахождении экстремума одного из критериев при выполнении следующих ограничений:

– на диапазоны изменения расходов шихтовых материалов:

$$G_{k \min} < G_k < G_{k \max};$$

– на параметры металла и шлака:

$$[R_n]_{\min} < [R_n] < [R_n]_{\max} \quad (n = 1 \div N_M);$$

$$(R_n)_{\min} < (R_n) < (R_n)_{\max} \quad (n = 1 \div N_{\text{шл}});$$

$$T_{l \min} < T_l < T_{l \max} \quad (l = 1 \div L);$$

– при соблюдении закона сохранения массы на уровне потоков, веществ и элементов:

$$\begin{aligned} \sum_{k=1}^{K^f} G_k^f + \sum_{k=1}^{K^r} G_k^r &= G_M + G_{\text{шл}} + G_r; \\ \sum_{k=1}^{K^f} \sum_{m=1}^{N_k^f} \frac{G_k^f |R_m|_k}{100} + \sum_{k=1}^{K^r} \sum_{m=1}^{N_k^r} \frac{G_k^r \{R_m\}_k}{100} &= \\ = \sum_{n=1}^{N_M} \frac{G_M [R_n]}{100} + \sum_{n=1}^{N_{\text{шл}}} \frac{G_{\text{шл}} (R_n)}{100} + \sum_{n=1}^{N_r} \frac{G_r \{R_n\}}{100}; \\ \sum_{k=1}^{K^f} \sum_{m=1}^{N_k^f} \frac{G_k^f |E_{ixm} E_{jym}|_k}{100} \frac{x_m M_{E_i}}{M_{E_{ixm} E_{jym}}} + \\ + \sum_{k=1}^{K^r} \sum_{m=1}^{N_k^r} \frac{G_k^r \{E_{ixm} E_{jym}\}_k}{100} \frac{x_m M_{E_i}}{M_{E_{ixm} E_{jym}}} &= \\ = \frac{G_M [E_i]}{100} + \sum_{n=1}^{N_{\text{шл}}} \frac{G_{\text{шл}} (E_{ixn} E_{jyn})}{100} \frac{x_n M_{E_i}}{M_{E_{ixn} E_{jyn}}} + \\ + \sum_{n=1}^{N_r} \frac{G_r \{E_{ixn} E_{jyn}\}}{100} \frac{x_n M_{E_i}}{M_{E_{ixn} E_{jyn}}}; \end{aligned}$$

– закона сохранения энергии:

$$\begin{aligned} \sum_{m=1}^{N_{\text{чуг}}} (\Delta H_T^0)_m \frac{[R]_{m_{\text{чуг}}}}{100 M_{R_m}} + \\ + \sum_{w=1}^{W_{\text{жз}}} \Delta H_w^0 \left( \sum_{k=1}^K \frac{G_k R_{kw}}{100 M_{R_w}} - \sum_{l=1}^L \frac{G_l R_{lw}}{100 M_{R_w}} \right) + Q_{\text{дуг}} = \\ = \sum_{n=1}^{N_M} (\Delta H_T^0)_n \frac{G_M [R_n]}{100 M_{R_n}} + \sum_{n=1}^{N_{\text{шл}}} (\Delta H_T^0)_n \frac{G_{\text{шл}} (R_n)}{100 M_{R_n}} + \\ + \sum_{w=1}^{W_{\text{энд}}} \Delta H_w^0 \left( \sum_{k=1}^K \frac{G_k R_{kw}}{100 M_{R_w}} - \sum_{l=1}^L \frac{G_l R_{lw}}{100 M_{R_w}} \right) + Q_{\text{пот}}; \end{aligned}$$

– выполнение одного из целевых условий:

$$P_{\min} < P < P_{\max};$$

$$C_{\min} < C < C_{\max};$$

$$\mathcal{E}_{\min} < \mathcal{E} < \mathcal{E}_{\max};$$

$$\Pi_{\min} < \Pi < \Pi_{\max}.$$

Таким образом, разработан метод математического моделирования процесса электроплавки и его оптимизации, который включает системное решение взаимосвязанных оптимизационных задач.

## Выводы

Выполнен анализ и разработан метод математического моделирования и оптимизации электросталеплавильного процесса, особенностью которого является системное решение комплекса взаимосвязанных оптимизационных задач по определению приемлемых условий протекания процессов в металлургической системе с использованием методов моделирования и оптимизации. Предложены технологические режимы реализации технологии электроплавки.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ / REFERENCES

1. Григорович К.В. Металлургия XXI века: современное состояние и направления развития. В кн.: *Труды XIV международного конгресса сталеплавильщиков, Москва – Электросталь, 17–21 октября 2016 г.* Москва: ООО «РПК ПринтаП»; 2016:56–65.
2. Григорович К.В. Современное состояние черной металлургии и направления ее развития в цифровой экономике. В кн.: *Труды XV международного конгресса сталеплавильщиков, Москва – Тула, 15–19 октября 2018 г.* Москва: ООО «РПК ПринтаП»; 2018:42–59.
3. Рощин В.Е., Рощин А.В. Электрометаллургия и металлургия стали. Челябинск: ИЦ ЮУрГУ; 2013:572.
4. Zenk C.H., Neumeier S., Engl N.M., Fries S.G., Dolotko O., Weiser M., Virtanen S., Goken M. Intermediate Co/Ni-base model superalloys – Thermophysical properties, creep and oxidation. *Scripta Materialia*. 2015;112:83–86. <https://doi.org/10.1016/j.scriptamat.2015.09.018>
5. Banik A., Green K.A., Hardy M.C., Mourer D.P., Reay T. Low cost powder metal turbine components. *TMS (The Minerals, Metals and Materials Society)*. 2004;571–576. [https://doi.org/10.7449/2004/SUPERALLOYS\\_2004\\_571\\_576](https://doi.org/10.7449/2004/SUPERALLOYS_2004_571_576)
6. Köhle S. Melting special steels. In: *Proceedings of the 7th European Electric Steelmaking Conf. Venice, Italy*; 2002:42–45.
7. Furrer D.U., Groppi G., Bunge G. Forging the future: parts I. *Advanced Materials and Processes*. 2005;163(5):35–37.
8. Das B., Prakash S., Reddy P.S.R., Misra V.N. An overview of utilization of slag and sludge from steel industries. *Resources, Conservation and Recycling*. 2007;50(1):40–57. <https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2006.05.008>
9. Bowman B., Krüger K. Arc Furnace Physics. Düsseldorf: Verlag Stahleisen GmbH; 2009:246.
10. Dorndorf M., Wichert W., Schubert M., Kempken J., Krüger K. Holistic control of EAF's energy and material flows. In: *Materials of the 3rd Int. Steel Conf. on Developments in Metallurgical Process Technologies. Düsseldorf, June 11–15, 2007*. 2007;127(11):63–71.
11. Mees H., Hohl J., Krüger K. Dynamic condition-based scrap melt control: Results of the application at Thyssenkrupp Nirosta in Bochum. In: *Materials of the 10th European Electric Steelmaking Conference. Graz, 25–28 Sep. 2012*. 2012;253–259.



12. Бигеев В.А., Малофеев А.Е., Пантелеев А.В., Ивин Ю.А., Валиахметов А.Х. Особенности материального и теплового балансов ДСП-180 ОАО ММК. *Электрометаллургия*. 2008;(12):16–18.  
Bigeev V.A., Malofeev A.E., Panteleev A.V., Ivin Yu.A., Valiakhmetov A.Kh. Features of material and thermal balances of EAF-180 of PJSC MMK. *Electrometallurgy*. 2008;(12):16–18. (In Russ.).
13. Игнатов И.И. Моделирование и расчет теплообмена в ДСП. *Математическое моделирование и расчет дуговых и плазменных сталеплавильных печей. Сборник научных трудов*. 1983:3–14.
14. Reichel J., Szekely J. Mathematical models and experimental verification in the decarburization of industrial scale stainless steel melts. *Iron and Steelmaker*. 1995;22(5):41–45.
15. Макаров А.Н., Макаров Р.А. Использование математической модели теплообмена для корректирования электрических режимов дуговых сталеплавильных печей. *Тез. докладов междунар. науч. конф. «Математические модели нелинейных возбуждений, переноса, динамики, упр. в конденсированных системах и других средах»*. Тверь, 2-5 июля, 1996. Тверь; 1996:135.
16. Morales R.D., Rodriguez-Hernandez H., Conejo A.N. A mathematical simulator for the EAF steelmaking using direct reduced iron. *ISIJ International*. 2001;41(5):426–435. <https://doi.org/10.2355/isijinternational.41.426>
17. Страшнов М.М., Кац Я.Л. Расчет оптимальных технологических параметров работы ДСП–60/70 для снижения расхода электроэнергии. *Металлург*. 2005;(12):45–50.  
Strashnov M.M., Kats Ya.L. Calculation of the optimum operating parameters of a DSP-60/70 arc steelmaking furnace to reduce its consumption of electric power. *Metallurgist*. 2005;49(12):481–489. <https://doi.org/10.1007/s11015-006-0027-4>
18. Маркс К., Пютц О., Редл З., Хигеман М., Тиман Т. Оптимизация процессов производства стали – применение новых способов моделирования нестационарных состояний процесса. *Черные металлы*. 2001;(10):42–46.  
Marks K., Pyutz O., Redl Z., Khigeman M., Timan T. Optimization of steel production processes – Application of new methods of modeling non-stationary process states. *Chernye metallurgy*. 2001;(10):42–46. (In Russ.).
19. Bekker J.G., Craig I.K., Pistorius P.C. Modelling and simulation of an electric arc furnace process. *ISIJ International*. 1999;39(1):23–32. <https://doi.org/10.2355/isijinternational.39.23>
20. Rybenko I.A. Instrumented system “Engineering-Metallurgy” for solving a wide class of engineering tasks. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*. 2018;411:012066. <https://doi.org/10.1088/1757-899X/411/1/012066>
21. Рыбенко И.А. Разработка оптимальных технологических режимов процессов получения металлов с использованием методов математического моделирования и инструментальных систем. *Черная металлургия. Бюллетень научно-технической и экономической информации*. 2018;(2(1418)):57–62.  
Rybenko I.A. Development of optimal technological modes of metal production processes using mathematical modeling methods and instrumental systems. *Ferrous Metallurgy. Bulletin of Scientific, Technical and Economic Information*. 2018;(2(1418)):57–62. (In Russ.).
22. Рыбенко И.А. Применение методики и инструментальной системы расчета металлургических процессов для разработки ресурсосберегающих технологий. Новокузнецк: Сибирский государственный индустриальный университет; 2016:187.
23. Рыбенко И.А., Протопопов Е.В. Термодинамическое моделирование процессов восстановления железа. *Известия вузов. Черная металлургия*. 2021;64(11):825–831. <https://doi.org/10.17073/0368-0797-2021-11-825-831>  
Rybenko I.A., Protopopov E.V. Thermodynamic modeling of iron recovery processes. *Izvestiya. Ferrous Metallurgy*. 2021;64(11):825–831. (In Russ.). <https://doi.org/10.17073/0368-0797-2021-11-825-831>

## Сведения об авторах

## Information about the Authors

**Инна Анатольевна Рыбенко**, д.т.н., профессор, заведующий кафедрой прикладных информационных технологий и программирования, Сибирский государственный индустриальный университет

**ORCID:** 0000-0003-1679-0839

**E-mail:** rybenkoi@mail.ru

**Евгений Валентинович Протопопов**, д.т.н., профессор кафедры металлургии черных металлов и химической технологии, Сибирский государственный индустриальный университет

**ORCID:** 0000-0002-7554-2168

**E-mail:** protopopov@sibsiu.ru

**Екатерина Михайловна Запольская**, к.т.н., старший научный сотрудник лаборатории электронной микроскопии и обработки изображений, Сибирский государственный индустриальный университет

**ORCID:** 0000-0002-8098-5895

**E-mail:** beloglazova-ekat@mail.ru

**Inna A. Rybenko**, Dr. Sci. (Eng.), Prof., Head of the Chair of Applied Information Technologies and Programming, Siberian State Industrial University

**ORCID:** 0000-0003-1679-0839

**E-mail:** rybenkoi@mail.ru

**Evgenii V. Protopopov**, Dr. Sci. (Eng.), Prof. of the Chair of Ferrous Metallurgy and Chemical Technology, Siberian State Industrial University

**ORCID:** 0000-0002-7554-2168

**E-mail:** protopopov@sibsiu.ru

**Ekaterina M. Zapol'skaya**, Cand. Sci. (Eng.), Senior Researcher of the Laboratory of Electron Microscopy and Image Processing, Siberian State Industrial University

**ORCID:** 0000-0002-8098-5895

**E-mail:** beloglazova-ekat@mail.ru

## Вклад авторов

## Contribution of the Authors

**И. А. Рыбенко** – проведение термодинамических расчетов, обработка результатов.

**Е. В. Протопопов** – технологическое описание поставленной задачи, обоснование направления исследований, анализ результатов.

**Е. М. Запольская** – обработка результатов, оформление статьи.

**I. A. Rybenko** – conducting thermodynamic calculations, processing of the results.

**E. V. Protopopov** – technological description of the task, justification of the research direction, analysis of the results.

**E. M. Zapol'skaya** – processing of the results, design of the article.

Поступила в редакцию 01.07.2025

После доработки 01.08.2025

Принята к публикации 10.09.2025

Received 01.07.2025

Revised 01.08.2025

Accepted 10.09.2025