



УДК 519.876.2

DOI 10.17073/0368-0797-2024-6-738-743



Оригинальная статья
Original article

ПЛАНИРОВАНИЕ СИСТЕМЫ РЕМОНТОВ КОНВЕРТЕРОВ В УСЛОВИЯХ КВАЗИПЕРИОДИЧЕСКОГО ФУНКЦИОНИРОВАНИЯ АГРЕГАТОВ

М. Е. Корнет¹, А. В. Зимин², И. В. Буркова³, В. В. Зимин²

¹ Национальный исследовательский технологический университет «МИСИС» (Россия, 119049, Москва, Ленинский пр., 4)

² Сибирский государственный индустриальный университет (Россия, 654007, Кемеровская область – Кузбасс, Новокузнецк, ул. Кирова, 42)

³ Институт проблем управления им. В.А. Трапезникова РАН (Россия, 117997, Москва, ул. Профсоюзная, 65)

✉ marya.kornet@gmail.com

Аннотация. На примере сталеплавильного производства АО «ЕВРАЗ Объединенный Западно-Сибирский металлургический комбинат» рассматривается задача синхронного календарного планирования в интервале нескольких плановых периодов работы конвертеров, конвертерных цехов, производства в целом, а также текущих ремонтов конвертеров сталеплавильного производства (два конвертерных цеха с двумя и тремя конвертерами). Плановые остановки конвертера на ремонт зависят от реальной достигнутой продолжительности кампании по футеровке и производственных календарных планов работы агрегатов. Ремонты выполняются при достижении текущей длительности кампании конвертера заданного нормативного значения. Таким образом, текущая длительность кампании конвертера описывается дискретной, нелинейной квазипериодической функцией, не имеющей фиксированного периода, но обладающей некоторой регулярностью. Формализованы технологические ограничения, определяющие минимальные и максимальные значения количества плавов в сутки, которое может провести каждый из цехов при одном или двух одновременно работающих конвертерах. Сформулированы условия, позволяющие избежать выполнения в одном цехе двух «холодных» ремонтов в одном плановом периоде и обеспечивающие ежесуточную переработку конвертерными цехами всего поступающего из доменного цеха чугуна. В предлагаемой математической постановке задачи требуется найти такие графики ремонтов конвертеров и такие календарные планы их работы, которые удовлетворяют сформулированным ограничениям и оптимизируют нелинейный критерий. Предложенный критерий направлен на обеспечение постоянной готовности цехов для выполнения производственной программы и проектной производительности. Задача сформулирована для условий безаварийной работы и стабильного обеспечения цехов жидким чугуном как основной составляющей металлозавалки конвертерной плавки.

Ключевые слова: сталеплавильное производство, конвертер, длительность кампании, конвертерный цех, квазипериодичность, календарный план, проектная производительность

Для цитирования: Корнет М.Е., Зимин А.В., Буркова И.В., Зимин В.В. Планирование системы ремонтов конвертеров в условиях квазипериодического функционирования агрегатов. *Известия вузов. Черная металлургия*. 2024;67(6):738–743.

<https://doi.org/10.17073/0368-0797-2024-6-738-743>

PLANNING BOF REPAIR SYSTEM IN CONDITIONS OF QUASI-PERIODIC OPERATION OF UNITS

M. E. Kornet¹, A. V. Zimin², I. V. Burkova³, V. V. Zimin²

¹ National University of Science and Technology “MISIS” (4 Leninskii Ave., Moscow 119049, Russian Federation)

² Siberian State Industrial University (42 Kirova Str., Novokuznetsk, Kemerovo Region – Kuzbass 654007, Russian Federation)

³ V.A. Trapeznikov Institute of Control Sciences, Russian Academy of Sciences (65 Profsoyuznaya Str., Moscow 117997, Russian Federation)

✉ marya.kornet@gmail.com

Abstract. Using the example of the steelmaking production of JSC EVRAZ United West Siberian Metallurgical Plant, the paper considers the task of synchronous calendar planning in the interval of several planned periods of operation of basic oxygen furnace (BOF), BOF shops, production as a whole, as well as ongoing repairs of BOF for steelmaking production (two BOF shops with two and three BOFs). Scheduled stops

of the BOF for repair depend on the actual achieved duration of the lining campaign and production schedules of the units and are performed when the current duration of the BOF campaign reaches a given standard value. Thus, the current duration of the BOF campaign is described by a discrete, nonlinear quasi-periodic function that does not have a fixed period, but has some regularity. Technological limitations were formalized, determining the minimum and maximum values of the number of melts per day that each of the workshops can produce with one or two BOFs operating simultaneously. The authors formulated the conditions to avoid performing two “cold” repairs in one shop in one planned period and ensuring daily processing by BOF shops of all cast iron coming from the blast furnace shop. In the proposed mathematical formulation of the problem, it is required to find such schedules of BOF repairs and such calendar plans of their work that satisfy the formulated constraints and optimize the non-linear criterion. The proposed criterion is aimed at ensuring the constant readiness of the shops for implementation of the production program and design productivity. The task is formulated for the conditions of trouble-free operation and stable provision of the shops with liquid cast iron as the main component of the metal charge of BOF smelting.

Keywords: steelmaking, BOF, campaign duration, BOF shop, quasi-periodicity, calendar plan, design productivity

For citation: Kornet M.E., Zimin A.V., Burkova I.V., Zimin V.V. Planning BOF repair system in conditions of quasi-periodic operation of units. *Izvestiya. Ferrous Metallurgy*. 2024;67(6):738–743. <https://doi.org/10.17073/0368-0797-2024-6-738-743>

ВВЕДЕНИЕ

В соответствии с современными представлениями кислородно-конвертерный процесс наиболее полно отвечает задачам повышения экономической эффективности и улучшения качества металлопродукции [1 – 3].

Состояние конвертерного производства России практически полностью отражает основные проблемы мировой практики как по определению оптимального состава перерабатываемой шихты, так и по направлениям снижения потерь и расходных показателей процесса [4 – 6]. При этом современные экономические условия предопределяют необходимость совершенствования организации планирования производства, развития технологии, разработки новых огнеупорных материалов и способов ремонтов футеровки конвертеров, сопровождающихся значительным продлением срока кампании агрегатов и сокращением потребления огнеупоров [6 – 9]. Именно поэтому проблемы планирования производственных показателей организации и ремонтов агрегатов и вспомогательного оборудования всегда относятся к важнейшим задачам, обеспечивающим достижение максимально возможных технико-экономических показателей работы конвертерных цехов [10 – 12].

Задачи сквозного планирования ремонтов конвертеров сталеплавильного производства имеют существенные особенности, которые заключаются в необходимости одновременного многофакторного решения при построении календарного плана работы конвертеров. При планировании ремонтов других металлургических агрегатов график ремонта конвертеров является частью исходных данных для их общего календарного планирования [13 – 15]. Это отличие обусловлено тем, что конвертер останавливают на ремонт после того, как количество проведенных плавов на рассматриваемой футеровке достигает значений, определяемых как нормативная длительность кампании конвертера [16; 17]. Время достижения нормативной длительности кампании определяется зависимостью от календарного времени работы агрегата и, как правило, в производственных условиях приводит к выполнению ремонтов с нерегулярной периодичностью [18 – 20].

ОСНОВНЫЕ ПОНЯТИЯ И ОБОЗНАЧЕНИЯ

Обозначим через $O = \{O_I, O_{II}\}$ структуру сталеплавильного производства, включающую два конвертерных цеха: $O_I = \{o_1, o_2, o_3\}$ и $O_{II} = \{o_4, o_5\}$, т.е. в первом цехе функционирует три конвертера одного типоразмера, а во втором – два. Интервал планирования ремонтов конвертеров зависит от нормативной продолжительности кампании конвертеров, их садки и месячных объемов чугуна, поступающего для переработки. Пусть $(T_1, T_2, \dots, T_j, \dots, T_p)$ – последовательность месяцев интервала планирования ремонтов конвертеров; $T_j = (\Delta t_{s_j} | s_j = \overline{1, S_j})$; S_j – количество суток в j -ом месяце. Тогда $g(O_I)$ и $g(O_{II})$ – объемы перерабатываемого чугуна за один цикл плавки конвертерами первого и второго цехов; ρ_I, ρ_{II} – расходные коэффициенты по чугуну для выплавки тонны стали в соответствующем цехе; K_I и K_{II} – нормативные показатели длительностей кампаний конвертеров в первом и втором цехах. Обозначим через $\left\{ \left(s_{j^c}^{r^n}, s_{j'}^{r^e} \right) | c = \overline{1, 2, \dots} \right\}, i = \overline{1, 5}$ – искомые

интервалы плановых ремонтов конвертеров; где $s_{j^c}^{r^n}$ и $s_{j'}^{r^e}$ – сутки начала и окончания c -го ремонта i -го конвертера. При $j = j'$ ремонт начинается и заканчивается в плановом периоде j . При $j \neq j'$ ремонт начинается в периоде j , а заканчивается в периоде j' , причем в j -ом периоде ремонт длится $\left(S_j - s_{j^c}^{r^n} \right)$ суток, а в периоде j' – $s_{j'}^{r^e}$ суток.

Заметим, что сокращение предложений поставки металлолома в рыночных условиях привело к сопоставимости цен на металлолом с себестоимостью производства чугуна. Вследствие этого коэффициенты ρ_I, ρ_{II} расхода чугуна на тонну стали перестали рассматриваться в качестве констант, а получили интервальную оценку:

$$\begin{aligned} \rho_I &\in (\rho_I^{\min}, \rho_I^{\max}); \\ \rho_{II} &\in (\rho_{II}^{\min}, \rho_{II}^{\max}). \end{aligned} \quad (1)$$

Благодаря совершенствованию технологии конвертерного производства (внедрению внепечной обработки стали, оперативной оценки текущего состояния футеровки конвертера, организации периодических «горячих» ремонтов между очередными плановыми с заменой футеровки), длительность кампаний конвертера существенно увеличилась и в настоящее время достигает 6 тысяч и более плавов. При этом сократилось общее число «холодных» ремонтов конвертера. Кроме того, различные поставщики специализированных материалов для выполнения «горячих» ремонтов гарантируют различную длительность кампаний конвертеров (общепринятым стал термин гарантированная стойкость конвертера). В современных условиях продолжительность кампании уже обеспечивается конкретным поставщиком огнеупоров, с которым заключается контракт:

$$\begin{aligned} K_I &= (K_I^{\min}, K_I^{\max}); \\ K_{II} &= (K_{II}^{\min}, K_{II}^{\max}). \end{aligned} \quad (2)$$

Существенно изменилось представление о длительности «холодного» ремонта, под которым изначально понимался период времени замены футеровки конвертера. В настоящее время, как правило, такой ремонт конвертера совмещают с ремонтами вспомогательного оборудования и других металлургических агрегатов. Вследствие этого длительность остановки конвертера на ремонт может превышать длительность текущего планового периода.

Далее, если не оговорено специально, будем исходить из того, что оценки введенных параметров носят точечный, а не интервальный характер.

Обозначим через $m_{ij}(\Delta t_{s_j})$, $m_{Ij}(\Delta t_{s_j})$, $m_{IIj}(\Delta t_{s_j})$ количество плавов, выпускаемых конвертером i , цехами O_I , O_{II} в сутки Δt_{s_j} . Очевидно, что

$$\begin{aligned} \sum_{i=1}^3 m_{ij}(\Delta t_{s_j}) &= m_{Ij}(\Delta t_{s_j}); \\ \sum_{i=4}^5 m_{ij}(\Delta t_{s_j}) &= m_{IIj}(\Delta t_{s_j}). \end{aligned} \quad (3)$$

Под календарным планом работы i -го конвертера в j -ом месяце будем понимать последовательность

$$m_{ij}(\Delta t_{s_j}) | s = \overline{1, P}. \quad (4)$$

На совместную работу конвертеров в цехах накладываются технологические ограничения, определяющие диапазон изменения количества плавов в сутки в каждом цехе при одном или двух одновременно работающих конвертерах:

$$\underline{m}_i \leq m_{ij}(\Delta t_{s_j}) \leq \overline{m}_i, \quad i = \overline{1, 3}, j = \overline{1, P}; \quad (5)$$

$$\underline{m}_{II} \leq m_{ij}(\Delta t_{s_j}) \leq \overline{m}_{II}, \quad i = \overline{4, 5}, j = \overline{1, P}; \quad (6)$$

$$\begin{aligned} 2\underline{m}_I &\leq (m_{ij}(\Delta t_{s_j}) + m_{i'j}(\Delta t_{s_j})) \leq 2\overline{m}_I; \\ i &\neq i', i, i' = \overline{1, 3}, j = \overline{1, P}; \end{aligned} \quad (7)$$

$$2\underline{m}_{II} \leq (m_{4j}(\Delta t_{s_j}) + m_{5j}(\Delta t_{s_j})) \leq 2\overline{m}_{II}, \quad j = \overline{1, P}, \quad (8)$$

где $\underline{m}_I$, $\overline{m}_I$, $\underline{m}_{II}$, $\overline{m}_{II}$, $2\underline{m}_I$, $2\overline{m}_I$, $2\underline{m}_{II}$, $2\overline{m}_{II}$ – минимальное и максимальное количество плавов, выпускаемых в первом и втором цехах при работе одного конвертера, а также минимальное и максимальное количество плавов, выпускаемых в цехах при работе двух конвертеров.

Работа трех конвертеров в первом цехе технологически сложно реализуема.

Введем функцию $k_{ij}(s_j)$, описывающую количество плавов, выпущенных i -ым конвертером на окончание s_j суток j -го периода. Количество плавов ограничено длительностями кампаний конвертеров

$$k_{ij}(s_j) \leq \begin{cases} K_I, & i = \overline{1, 3}; \\ K_{II}, & i = \overline{4, 5}. \end{cases} \quad (9)$$

Множество времени $s_j^{r_c}$ начала ремонта конвертеров определяется соотношениями

$$\begin{aligned} \{s_j^{r_c} | k_{ij}(s_j) \geq K_I\}, & \quad i = \overline{1, 3}; \\ \{s_j^{r_c} | k_{ij}(s_j) \geq K_{II}\}, & \quad i = \overline{4, 5}. \end{aligned} \quad (10)$$

Время $s_j^{r_c}$ окончания соответствующих ремонтов определяется их заданной длительностью r_c , $c = 1, 2, \dots$

Проектные решения и система организации ремонтов в сталеплавильном производстве не допускают выполнения в одном цехе двух «холодных» ремонтов в одном плановом периоде, причем первый цех спроектирован исходя из требования постоянной работоспособности двух конвертеров (третий находится в ремонте или резерве). Таким образом, в каждом цехе реализуется в каждом плановом периоде T_j один из четырех возможных режимов работы:

1. Не выполняется ремонт ни одного из двух работающих конвертеров

$$(s_j^{r_c}, s_j^{r_c}) \not\subset T_j. \quad (11)$$

2. Ремонтируется один из работающих конвертеров

$$(s_j^{r_c}, s_j^{r_c}) \subset T_j. \quad (12)$$

3. Завершается ремонт одного из работающих конвертеров, начатый в периоде

$$T_{j-1} \left(s_{j-1}^{r^n}, s_j^{r^e} \right) \cap T_j = \overline{s_j^{r^e}}. \quad (13)$$

4. Начинается ремонт одного из работающих конвертеров, который завершится в периоде

$$T_{j+1} \left(s_j^{r^n}, s_{j+1}^{r^e} \right) \cap T_j = \overline{s_{j+1}^{r^n}}, S_j. \quad (14)$$

Обозначим через k_{ij}^n количество плавов, выпущенных i -ым конвертером на начало j -го периода планирования. Тогда с учетом выражения (4) количество плавов k_{ij}^e , выпущенных i -ым конвертером на конец j -го планового периода, для каждого из режимов работы описывается функциями

$$k_{ij}^e = k_{ij}^n + \sum_{l=1}^{S_j} m_l(\Delta t_{s_j}); \quad (15)$$

$$k_{ij}^e = k_{ij}^n + \sum_{l=1}^{s_j^{r^n}} m_l(\Delta t_{s_j}) + \sum_{l=s_j^{r^n}+1}^{S_j} m_l(\Delta t_{s_j}); \quad (16)$$

$$k_{ij}^e = k_{ij}^n + \sum_{l=s_j^{r^n}+1}^{S_j} m_l(\Delta t_{s_j}); \quad (17)$$

$$k_{ij}^e = k_{ij}^n + \sum_{l=1}^{s_j^{r^n}} m_l(\Delta t_{s_j}). \quad (18)$$

Функция $k_{ij}(s_j)$, описывающая количество плавов, выпущенных i -ым конвертером на конец s_j суток, обладает свойством квазипериодичности (реализует нерегулярную периодичность). Она имеет «пилообразный» вид, максимальное значение составляет K_I для конвертеров первого цеха и K_{II} – для второго. Размер основания «зуба пилы» зависит от количества плавов, выпускаемых конвертером в каждые сутки до достижения функцией максимума, после которого она обращается в ноль. Расстояние между зубьями пилы представляет собой время ремонта конвертера, в течение которого функция также равна нулю.

Колебания функции $k_{ij}(s_j)$ следуют регулярному шаблону, но не имеют фиксированного периода.

Последовательностями

$$\left(g_j^{\text{BX}}(\Delta t_{s_j}) | s_j = \overline{1, S_j} \right),$$

$$\left(g_{lj}^{\text{BX}}(\Delta t_{s_j}) | s_j = \overline{1, S_j} \right),$$

$$\left(g_{llj}^{\text{BX}}(\Delta t_{s_j}) | s_j = \overline{1, S_j} \right)$$

опишем посуточное поступление жидкого чугуна из доменного производства в целом в сталеплавильное производство, в первый и второй цехи для

производства стали в j -ом периоде. Очевидно, что $g_{lj}^{\text{BX}}(\Delta t_{s_j}) + g_{llj}^{\text{BX}}(\Delta t_{s_j}) = g^{\text{BX}}(\Delta t_{s_j})$, $s_j = \overline{1, S_j}$. Пусть

$$\sum_{s_0=1}^{S_j} g_j^{\text{BX}}(\Delta t_{s_j}) = G_{T_j}^{\text{BX}},$$

где $G_{T_j}^{\text{BX}}$ – месячный объем требующего переработки чугуна. Аналогично определим величины $G_{IT_j}^{\text{BX}}$ и $G_{IIT_j}^{\text{BX}}$, $G_{IT_j}^{\text{BX}} + G_{IIT_j}^{\text{BX}} = G_{T_j}^{\text{BX}}$. Для определения описываемого последовательностью $\left(g_{lj}^{\text{BX}}(\Delta t_{s_j}) | s_j = \overline{1, S_j} \right)$ количества плавов, требующихся для переработки поступающего чугуна в s_j -е сутки, используем следующую рекурсивную процедуру:

$$m_{lj}^{\text{BX}}(\Delta t_1) = \left[\frac{g_{lj}^{\text{BX}}(\Delta t_1)}{g(O_I)} \right]; \quad (19)$$

$$m_{lj}^{\text{BX}}(\Delta t_2) = \left[\frac{g_{lj}^{\text{BX}}(\Delta t_2) + g_{lj}^{\text{BX}}(\Delta t_1) - m_{lj}^{\text{BX}}(\Delta t_1)g(O_I)\rho_I}{g(O_I)} \right]$$

и так далее до $s_j = S_j$.

В результате получим последовательность $\left(m_{lj}^{\text{BX}}(\Delta t_{s_j}) | s_j = \overline{1, S_j} \right)$, описывающую количество плавов, которое должен выпускать каждые сутки первый цех. Аналогично вычисляется последовательность $\left(m_{llj}^{\text{BX}}(\Delta t_{s_j}) | s_j = \overline{1, S_j} \right)$ для второго цеха. Обозначим через $M_{IT_j} = \sum_{s_j=1}^{S_j} m_{lj}^{\text{BX}}(\Delta t_{s_j})$ и $M_{IIT_j} = \sum_{s_j=1}^{S_j} m_{llj}^{\text{BX}}(\Delta t_{s_j})$ месячные объемы требующего переработки чугуна в первом и втором цехах, выраженные в количестве плавов. Очевидно, что $M_{IT_j}g(O_I) + M_{IIT_j}g(O_{II}) = G_{T_j}^{\text{BX}}$.

Достигнутый в настоящее время уровень длительностей кампаний конвертеров кратно превышает месячный объем производства соответствующего цеха:

$$M_{IT_j} \ll K_I; M_{IIT_j} \ll K_{II}. \quad (20)$$

Сформулируем условие, которое позволяет избежать выполнения в одном цехе двух «холодных» ремонтов в одном плановом периоде. Сделаем это сначала для второго цеха с двумя конвертерами. Вследствие свойства квазипериодичности функций $k_{4j}(s_j)$ и $k_{5j}(s_j)$, а также одинаковой длительности K_{II} кампаний соответствующих конвертеров максимально возможная разность значений функций $k_{4j}(s_j)$ и $k_{5j}(s_j)$ равна $K_{II}/2$:

$$|k_{4j}(s_j) - k_{5j}(s_j)| \leq K_{II}/2. \quad (21)$$

Таким образом, наилучший способ «развести» во времени ремонты четвертого и пятого конвертеров – постоянно поддерживать приближенное равенство

$$|k_{4j}(s_j) - k_{5j}(s_j)| \approx K_{II}/2. \quad (22)$$

Из соотношения (20) также следует, что при остановке на ремонт одного из конвертеров остается достаточно мощностей другого конвертера, позволяющих отработать весь текущий плановый период.

Проектные решения для первого цеха с тремя конвертерами предусматривают режим постоянной работоспособности двух конвертеров, при этом третий находится в ремонте или резерве и включается в работу в момент остановки на ремонт одного из работающих конвертеров. При такой схеме работы с двумя постоянно работающими конвертерами в качестве условия «разведения» во времени их ремонтов, как и для второго цеха, можно записать

$$|k_{ij}(s_j) - k_{i'j}(s_j)| \approx K_I/2; i, i' \in \{1, 2, 3\}, \quad (23)$$

где $i, i' \in \{1, 2, 3\}$ – работающие в первом цехе в сутки s_j конвертеры.

ПОСТАНОВКА ЗАДАЧИ ПЛАНИРОВАНИЯ РЕМОНТОВ И РАБОТЫ КОНВЕРТЕРОВ В ПЛАНОВЫХ ПЕРИОДАХ $(T_1, T_2, \dots, T_j, \dots, T_P)$

Требуется найти такие последовательности

$$(m_{ij}(\Delta t_{s_j}) | s_j = \overline{1, S_j}), i = \overline{1, 5}, j = \overline{1, P} \quad (24)$$

и такие графики ремонтов конвертеров

$$(s_{jc}^{r^n}, s_{jc}^{r^e}) \subset \bigcup_{j=1}^P T_j, i = \overline{1, 5}, c = \overline{1, 2, \dots}, \quad (25)$$

которые удовлетворяют уравнениям (5) – (8), ограничению

$$g(O_I) \sum_{i=1}^3 m_{ij}(\Delta t_{s_j}) + g(O_{II}) \sum_{i=4}^5 m_{ij}(\Delta t_{s_j}) = g_j^{BX}(\Delta t_{s_j}), \quad (26)$$

условиям (11) – (14) выполнения ремонтов конвертерами в технологических режимах работы и минимизируют критерий

$$Q = \sum_{j=1}^P \left\{ \left(|k_{ij}^e - k_{i'j}^e| - 0,5K_I \right) + \left(|k_{4j}^e - k_{5j}^e| - 0,5K_{II} \right) \right\} \rightarrow \min, \quad (27)$$

где $i, i' \in \{1, 2, 3\}$ – индексы работающих в первом цехе в сутки s_j конвертеров, а значения k_{ij}^e определяются в соответствии с правилами (15) – (18).

Критерий направлен на создание условий для реализации проектных производительностей цехов в каждом плановом периоде.

Выводы

На примере сталеплавильного производства АО «ЕВРАЗ Объединенный Западно-Сибирский металлургический комбинат» рассмотрена задача синхронного календарного планирования в интервале нескольких плановых периодов работы конвертеров, конвертерных цехов, производства в целом, а также текущих ремонтов конвертеров сталеплавильного производства. Плановые остановки конвертера на ремонт зависят от реальной достигнутой продолжительности кампании по футеровке и производственных календарных планов работы агрегатов и выполняются по достижении текущей длительности кампании конвертера заданного нормативного значения.

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: Изд-во: АО «Металлургический завод «Электросталь»; 2016:56–65.
2. Гузела Д., Оливейра Дж., Стаудингер Г., Муллер Дж. Новейшая модель кислородного конвертера как результат полувекowego развития технологии. В кн.: *Труды IX конгресса сталеплавильщиков*. Москва: Черметинформация; 2014:153–163.
3. Petrushka R., Manley S. Improvement in oxygen lance life. In: *Steelmaking Conference Proceedings*. 2000:245–250.
4. Tabata Y., Marsh R.C., Kelly P., etc. Improvement of BOP steel refining blowing control using wide angle lance nozzles. In: *Steelmaking Conference Proceedings*. 1998:451–457.
5. Brun L. Overcapacity in steel: China's Role in a Global Problem. Center on Globalization, Governance & Competitiveness, Duke University; 2016:54.
<https://doi.org/10.13140/RG.2.2.11923.48161>
6. Mutumi Ohji. Recent trends and future in steelmaking technology in Japan. *ISIJ International*. 1996;36:S2–S5.
https://doi.org/10.2355/isijinternational.36.Suppl_S2
7. Springorum D. The management of research and technology in the German steel industry with respect to the European Union. *ISIJ International*. 1998;38(9):935–942.
<https://doi.org/10.2355/isijinternational.38.935>
8. Macanley D. Engineering developments lead to greater economy. *Steel Times International*. 1996;(5):12–14.
9. Rymarchyk N. Post combustion lances in Basic Oxygen Furnace (BOF) operations. In: *Steelmaking Conference Proceedings*. 1998:445–449.
10. Messina C.J. Slag splashing in the BOF – world wide status, practices and results. *Iron and Steel Engineer*. 1996;(5):17–19.
11. Протопопов Е.В., Темлянцев М.В. Совершенствование технологии повышения стойкости футеровки кислородных конвертеров. Новосибирск: СО РАН; 2023:324.
12. Шоухин Т., Яньвэнь Ю. Повторное использование и восстановление отработанных огнеупоров. *Огнеупоры и техническая керамика*. 2007;(5):29–34.
Shoukhin' T., Yan'ven' Yu. Reuse and restoration of used refractories. *Ogneupory i tekhnicheskaya keramika*. 2007;(5):29–34.

13. Лэсдон Л. Оптимизация больших систем. Москва: Наука; 1975:432.
14. Russell R.O., Donaghy N., Meyer E.C., Goodson K.M. Everlasting BOF linings at LTV Steel? In: *Proceedings of the 1st European Oxygen Steelmaking Congress, Düsseldorf/Neuss, June 21–23, 1993*. Verlag Stahleisen GmbH; 1993:220–225.
15. Прохоров И.М., Зимин А.В., Буркова И.В., Зимин В.В. Постановка и декомпозиция задачи календарного планирования ремонтов и работы конвертеров сталеплавильного производства. *Системы управления и информационные технологии*. 2024;(2(96)):38–40.
Prokhorov I.M., Zimin A.V., Burkova I.V., Zimin V.V. Formulation and decomposition of the task of calendar planning of repairs and operation of steelmaking converters. *Sistemy upravleniya i informatsionnye tekhnologii*. 2024;(2(96)):38–40. (In Russ.).
16. Прохоров И.М., Зимин А.В., Буркова И.В., Зимин В.В. О процедуре решения задачи построения расписания ремонтов конвертеров сталеплавильного цеха с двумя агрегатами. *Системы управления и информационные технологии*. 2024;(2(96)):64–67.
Prokhorov I.M., Zimin A.V., Burkova I.V., Zimin V.V. On the procedure for solving the problem of scheduling repairs of converters of a steelmaking workshop with two units. *Sistemy upravleniya i informatsionnye tekhnologii*. 2024;(2(96)):64–67. (In Russ.).
17. Зимин В.В. Построение согласованных расписаний для производственных звеньев комплекса «сталь-прокат»: автореф. канд. дис. 05.13.06. Москва: МИСиС; 1979:21.
18. Lohmer J., Lasch R. Production planning and scheduling in multi-factory production networks: A systematic literature review. *International Journal of Production Research*. 2021;59(7):2028–2054.
<https://doi.org/10.1080/00207543.2020.1797207>
19. Moghaddam M., Moosavi E. A view on recent developments for production scheduling optimization. In: *Proceedings of the 26th Int. Mining Congress and Exhibition of Turkey (IMCET 2019)*. 2019:166–173.
20. Li Y., Goga K., Tadei R., Terzo O. Production scheduling in industry 4.0. In: *Complex, Intelligent and Software Intensive Systems, Advances in Intelligent Systems and Computing*. Barolli L., Poniszewska-Maranda A., Enokido T. eds. 2020;1194.

Сведения об авторах

Information about the Authors

Мария Евгеньевна Корнет, старший преподаватель кафедры инженерной кибернетики, Национальный исследовательский технологический университет «МИСИС»

ORCID: 0000-0003-4100-5644

E-mail: marya.kornet@gmail.com

Алексей Валерьевич Зимин, д.т.н., доцент, заведующий кафедрой автоматизации и информационных систем, Сибирский государственный индустриальный университет

ORCID: 0000-0002-0485-9846

E-mail: zimin.0169@yandex.ru

Ирина Владимировна Буркова, д.т.н., доцент, ведущий научный сотрудник, Институт проблем управления им. В.А. Трапезникова РАН

ORCID: 0000-0002-4671-0847

E-mail: irbur27@gmail.com

Валерий Викторович Зимин, д.т.н., профессор кафедры автоматизации и информационных систем, Сибирский государственный индустриальный университет

ORCID: 0000-0003-4152-3572

E-mail: zimin1945@sibsiu.ru

Maria E. Kornet, Senior Lecturer of the Chair of Engineering Cybernetics, National University of Science and Technology "MISIS"

ORCID: 0000-0003-4100-5644

E-mail: marya.kornet@gmail.com

Aleksei V. Zimin, Dr. Sci. (Eng.), Assist. Prof., Head of the Chair of Automation and Information Systems, Siberian State Industrial University

ORCID: 0000-0002-0485-9846

E-mail: zimin.0169@yandex.ru

Irina V. Burkova, Dr. Sci. (Eng.), Assist. Prof., Leading Researcher, V.A. Trapeznikov Institute of Control Sciences, Russian Academy of Sciences

ORCID: 0000-0002-4671-0847

E-mail: irbur27@gmail.com

Valerii V. Zimin, Dr. Sci. (Eng.), Prof. of the Chair of Automation and Information Systems, Siberian State Industrial University

ORCID: 0000-0003-4152-3572

E-mail: zimin1945@sibsiu.ru

Вклад авторов

Contribution of the Authors

М. В. Корнет – постановка задачи исследования, разработка и реализация алгоритма, анализ полученных результатов.

А. В. Зимин – постановка проблемы, формирование выводов.

И. В. Буркова – постановка задач исследования, анализ данных.

В. В. Зимин – технологическое описание поставленной задачи, обоснование направления исследований, анализ полученных результатов.

M. V. Kornet – formulation of research tasks, development and implementation of the algorithm, analysis of the results.

A. V. Zimin – formulation of the problem, formation of conclusions.

I. V. Burkova – formulation of research tasks, data analysis.

V. V. Zimin – technological description of the task, justification of the research direction, analysis of the results.

Поступила в редакцию 16.09.2024

После доработки 24.09.2024

Принята к публикации 25.09.2024

Received 16.09.2024

Revised 24.09.2024

Accepted 25.09.2024