

ISSN 0132-0890
www.rudmet.ru

Черные металлы

Издается с 1961 года
(№ 1084)

4.2022

С Днем космонавтики!



ЧЕРНЫЕ МЕТАЛЛЫ

Издательский дом
«Руда и Металлы»

№ 4 (1084), апрель 2022 г.

Издается с 1961 г.

Ежемесячный научно-технический и производственный журнал
по актуальным проблемам металлургии и машиностроения

Учредители:

Акционерное общество
«Издательский дом
«Руда и Металлы»

Федеральное государственное автономное
образовательное учреждение высшего
профессионального образования
«Национальный исследовательский
технологический университет «МИСиС»

Федеральное бюджетное автономное
образовательное учреждение высшего
профессионального образования
«Магнитогорский государственный технический
университет им. Г. И. Носова»

При участии:

ПАО «ММК»
ОАО «БМЗ — управляющая компания холдинга «БМК»
Государственного Эрмитажа

Официальный информационный орган
Федерального УМО
«Технологии материалов»

Редакционный совет:

Главный редактор: В. М. Колокольцев
Первый зам. главного редактора: К. Л. Косырев
Зам. главного редактора: А. Г. Воробьев, Е. В. Цирульников
А. М. Беленький, В. Блек (Германия), Ю. Л. Бобарикин (Беларусь), О. И. Борискин, И. В. Буторина,
Р. М. Валеев, Е. П. Волынкина, А. В. Выдрин, С. П. Галкин, Е. А. Голи-Оглу (Дания), Я. М. Гордон (Канада),
Д. Г. Еланский, Н. А. Зюбан, И. Е. Илларионов, Л. М. Капуткина, А. А. Казаков, А. П. Коликов,
А. Г. Корчунов, А. В. Кушнарев, И. О. Леушин, И. П. Мазур, Ю. Ю. Пиотровский, А. Н. Савенок (Беларусь),
А. В. Серебряков, И. А. Султангузин, С. С. Ткаченко, А. Я. Травянов, Н. А. Чиченев, М. В. Чукин,
П. Шеллер (Германия), Е. А. Яценко

Редакция:

Зам. главного редактора: Е. В. Цирульников
Ответственный секретарь: Е. Ю. Рахманова
Редактор: Э. Э. Бабаки

Издатель — АО «Издательский дом «Руда и Металлы»
Адрес издателя: 119049, Москва, Ленинский просп., 6,
стр. 2, МИСиС, оф. 622

Адрес редакции:
• фактический: 119049, Москва, Ленинский проспект 6,
стр. 2, МИСиС, оф. 617

• почтовый: 119049, Москва, а/я № 71

Телефон/факс: (495) 955-01-75

Эл. почта: chernet@rudmet.ru, tsirulnikov@rudmet.ru

www.rudmet.ru

Ежемесячный научно-технический и производственный журнал
по актуальным проблемам металлургии и машиностроения
«Черные металлы» № 4 (1084), апрель 2022 г.

Журнал зарегистрирован Федеральной службой по надзору в сфере
связи, информационных технологий и массовых коммуникаций
(Свидетельство ПИ № ФС77-48681 от 28.02.2012 г.)

Товарный знак и название «Черные металлы» являются исключительной
собственностью Издательского дома «Руда и Металлы»

Отпечатано с предоставленных готовых файлов
в типографии «Кандлер»
150044, Россия, Ярославль, ул. Полушкина Роща, 16. стр. 66А.
Тел. (4852) 58-76-33

Дата выхода в свет: 06.05.2022. Формат 60х90/8.

Печ. л. 9,5. Offsetная печать. Бумага offsetная.

Тираж 800 экз. Цена свободная

За достоверность рекламной информации ответственность несет рекламодатель
За достоверность научно-технической информации ответственность несет автор
Перепечатка материалов возможна только с письменного разрешения редакции
При перепечатке ссылка на «Черные металлы» обязательна
«Реклама» — материал публикуется на правах рекламы
Публикуемые материалы не обязательно отражают точку зрения редакции
и редсовета журнала

ISSN 0132-0890



Подписные индексы:
12985 («Пресса России»)

9 770132 089006 >

© Оформление. АО «Издательский дом «Руда и Металлы», «Черные металлы», 2022

© Фото для обложки предоставлено пресс-службой РКК «Энергия» им. С. П. Королева

На фото: Ракета с кораблем-модулем «Прогресс М-УМ» с узловым модулем «Причал» перед стартом на космодроме Байконур, ноябрь 2021 г.

СОДЕРЖАНИЕ

Производство чугуна

- К. В. Голощапов, О. А. Кобелев, А. Е. Титлянов, Р. Ю. Казбеков.* Разработка теплоизолирующей вставки в дутьевой канал воздушной фурмы доменной печи с применением математического моделирования 4

Производство стали

- Р. А. Гизатулин, А. И. Мусатова, Н. В. Мартюшев, Д. В. Валуев, А. И. Карлина.* Разработка и применение нормативных тактовых моделей для модернизации электросталеплавильного цеха. . . 10

Литейное производство

- И. О. Леушин, А. Н. Грачев, Л. И. Леушина, П. М. Явтушенко.* Жидкоподвижная самотвердеющая смесь улучшенной технологичности для изготовления форм и стержней стального литья. 17
- Т. Р. Гильманшина, А. А. Ковалева, С. А. Худоногов, Д. Ю. Крицкий.* Использование графисодержащего шлама в составе противопопригарных покрытий 23

Прокатка и термообработка

- Д. Л. Шварц, А. М. Михайленко, Е. И. Салихьянова.* Оптимизация калибровок валков для прокатки швеллеров. Сообщение 2. Пространство швеллерных калибров 27
- О. Б. Крючков, А. В. Крохалев, П. И. Маленко, Э. В. Седов.* Экспериментально-расчетное исследование эквивалентного коэффициента теплопроводности при нагреве рулона ленты. . . . 34

Химические технологии

- И. В. Скворцова, Е. А. Елисеева, С. Л. Березина, В. С. Болдырев.* Особенности анодного поведения хрома в кислотном электролите 41

Нанесение покрытий и обработка поверхности

- Ю. Н. Гойхенберг, Д. С. Полухин.* Структура, свойства и качество композитного никель-фосфорного покрытия, наносимого на стальные подложки различного состава 46

Энергетика и экология

- И. А. Султангузин, П. А. Шомов, А. В. Егоров, И. В. Евсеенко, Ю. В. Яворовский.* Топливо-энергетический баланс электрометаллургического мини-комплекса 50
- В. С. Дубинин, Т. А. Степанова, С. О. Шкарупа, В. П. Крупский.* Новые способы производства электроэнергии с использованием пара систем испарительного охлаждения высокотемпературных установок черной металлургии 57

Машиностроительные технологии

- В. Д. Кухарь, В. А. Коротков, С. С. Яковлев, А. А. Шишкина.* Анализ напряженно-деформированного состояния при получении рифлей в стальной цилиндрической заготовке 62
- Е. А. Даниленко, А. С. Ямников, А. А. Маликов.* Влияние упругих деформаций нежесткой коробчатой заготовки, лимитированных конструкцией приспособления, на точность обработанных поверхностей. 66
- В. В. Истоцкий.* Конструктивные особенности концевых фрез с комбинацией режущих и деформирующих зубьев для обработки вязко-пластичных сплавов 71

Журнал «Черные металлы» по решению ВАК Министерства образования и науки РФ включен в «Перечень ведущих рецензируемых научных журналов и изданий, в которых должны быть опубликованы основные научные результаты диссертаций на соискание ученой степени доктора и кандидата наук» по металлургии

Журнал «Черные металлы» включен в Международную базу данных Chemical Abstracts Service

Журнал «Черные металлы» включен в Международную базу данных Scopus, II квартал (2020)

(по версии SCIMAGO)

Разработка и применение нормативных тактовых моделей для модернизации электросталеплавильного цеха

Р. А. Гизатулин, профессор кафедры металлургии цветных металлов и химической технологии¹, доцент, докт. техн. наук, эл. почта: gizatulin_ra@sibsiu.ru

А. И. Мусатова, старший преподаватель кафедры менеджмента и отраслевой экономики¹, эл. почта: musatova-ai@yandex.ru

Н. В. Мартюшев, доцент отделения материаловедения Инженерной школы новых производственных технологий², канд. техн. наук, эл. почта: martjushev@tpu.ru

Д. В. Валуев, доцент³, канд. техн. наук, эл. почта: valuev@bk.ru

А. И. Карлина, научный сотрудник⁴, канд. техн. наук, эл. почта: karlinat@mail.ru

¹ ФГБОУ ВО «Сибирский государственный индустриальный университет», Новокузнецк, Россия.

² ФГБОУ ВПО «Национальный исследовательский Томский политехнический университет», Томск, Россия.

³ Юргинский технологический институт (филиал) ФГБОУ ВПО «Национальный исследовательский Томский политехнический университет», Юрга, Россия.

⁴ Московский государственный строительный университет, Москва, Россия.

Перспективным направлением эффективности функционирования сложных производственных комплексов является построение и анализ их нормативных моделей. С целью обоснования нормативной производительности электросталеплавильного цеха (ЭСПЦ) созданы нормативные тактовые модели работы каждой единицы оборудования в отделениях ЭСПЦ: зонах подготовки шихтовых материалов, печной и внепечной обработки, непрерывной разливки стали. Приведен процесс построения тактовой модели, включающий следующие этапы: декомпозицию объекта (цеха), классификацию производственных операций и элементов, выбор метода определения нормативных значений тактов, установление расчетной единицы продукции, вычисление тактов процессов для каждого отделения, оценивание такта работы объекта. Детально представлена структура тактовых моделей функционирования оборудования основного (печного), а также вспомогательных отделений. Сформирован алгоритм определения такта работы ЭСПЦ. Проведенные комплексные исследования (мониторинг работы оборудования, хронометражные наблюдения, обработка статистических данных) в ЭСПЦ значения тактов, полученные моделированием, выявили имеющиеся «узкие» места (диспропорции), которые снижают производительность цеха, рекомендован вариант модернизации в отделении внепечной обработки стали. Выполнен сравнительный анализ нормативных значений основных технико-экономических показателей до и после предлагаемой реконструкции, который позволит сократить такт работы печного отделения, уменьшить горячие простои, увеличить производительность, действительный фонд времени работы цеха и выпуск продукции, при этом произойдет снижение себестоимости продукции, повышение прибыли и рентабельности от реализации товарной продукции.

Ключевые слова: производительность, такт, декомпозиция, методика, моделирование, нормативы, результаты.

DOI: 10.17580/chm.2022.04.02

Введение

Маркетинговые исследования рынка товаров показали, что производственная стратегия металлургического предприятия, как правило, предполагает расширение ассортимента, улучшение качества и увеличение объема электростали для дальнейшего передела и товарной продукции [1–4]. Увеличение объема выпуска стали может быть достигнуто как расширением производства, так и нередко за счет планирования производства. В практике оперативного планирования производства продукции при составлении планов-графиков в качестве норматива интенсивного использования оборудования обычно принимают среднюю фактически достигнутую суточную производительность цеха. При этом усредняют возможные производственные ситуации, не выполняя динамические

расчеты загрузки основного и вспомогательного оборудования. Недостаточность научно и технически обоснованных ситуационных (многовариантных) нормативов производительности цеха приводит к неэффективному использованию оборудования, создает резкие колебания объемов незавершенного производства из-за непредусмотренных простоев металла на разных стадиях обработки, затрудняет равномерный выпуск продукции в электросталеплавильных цехах [5, 6].

Производительность — это показатель, который предназначен для решения задач стратегического, календарного и оперативно-производственного планирования [7–10]. Фактическую производительность цеха определяют по отчетным данным о выпуске продукции и фонде времени за определенный период его работы. Расчетную производительность

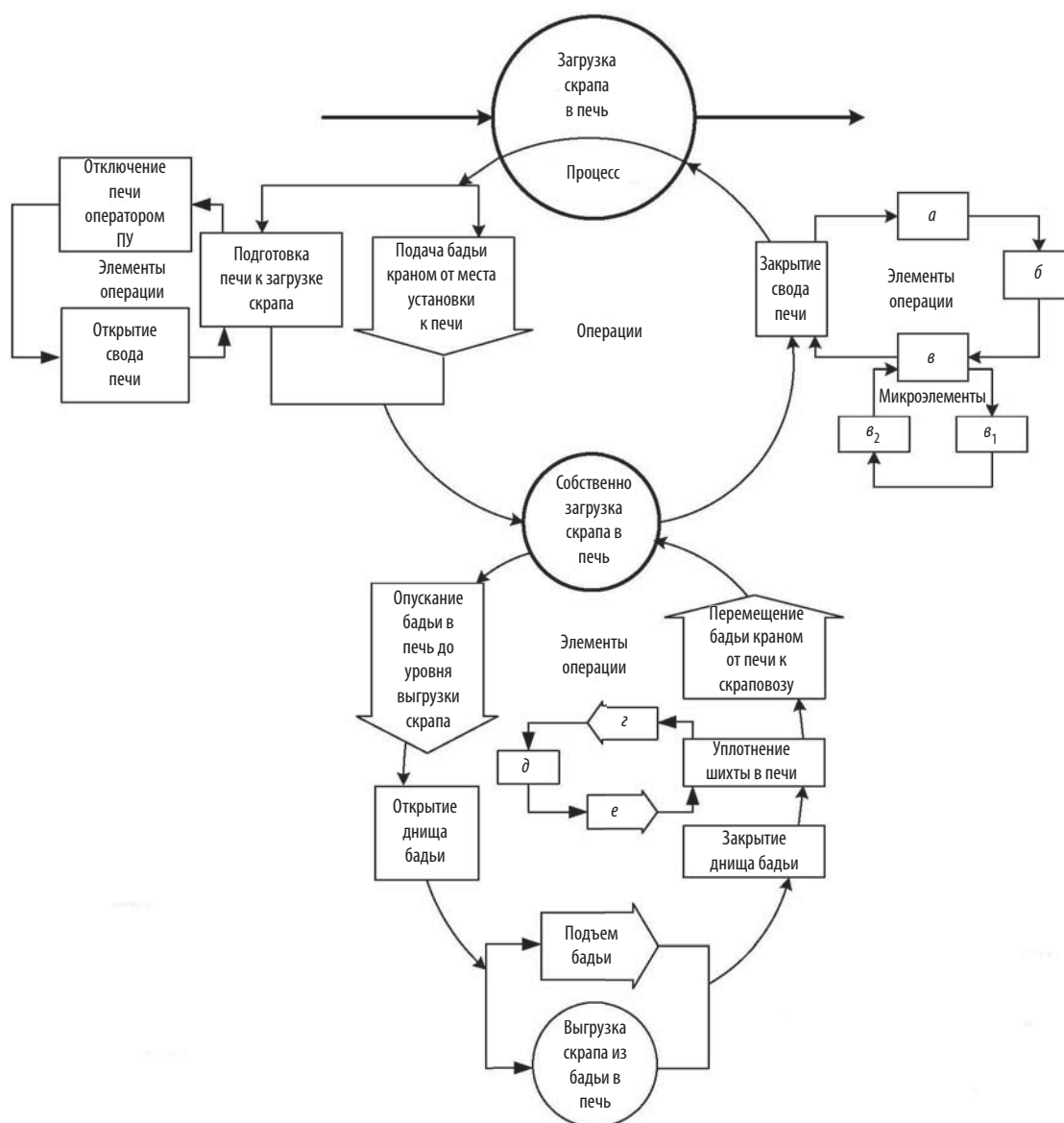


Рис. 1. Схема декомпозиции процесса загрузки скрапа в печь:

a — поворот свода печи механизмом поворота; *б* — опускание свода печи механизмом; *в* — подготовка печи к запуску; *в₁* — наведение труботечек в свод печи; *в₂* — опускание электродов в печь; *г* — опускание бадьи краном в печь; *д* — собственно уплотнение шихты под давлением веса бадьи; *е* — подъем бадьи краном на высоту перемещения

цеха (системы) с последовательной структурой подразделений (подсистем) традиционно устанавливают через их производительности, которые сравнивают между собой, а затем выбирают из них наименьшее значение. Основным недостатком такого подхода является необходимость предварительной оценки производительности каждой подсистемы, для выполнения которой отсутствует соответствующее методическое обеспечение [11–15]. Авторами разработана процедура оценивания производительности электросталеплавильного цеха (ЭСПЦ) на базе тактов работы подсистем. Предлагаемый тактовый подход теоретически обоснован на примере комплексных исследований функционирования ЭСПЦ в работе [16].

В работе сформировано алгоритмическое обеспечение ранее созданной методики, которая уточнена и реализована

для действующего ЭСПЦ. Выполнена оценка нормативных тактов работы основного и вспомогательного оборудования, участков отделений и цеха в целом, которая позволила выявить «узкие» места и рассмотреть варианты их устранения путем модернизации оборудования.

Нормативная производительность ЭСПЦ представляет собой функцию следующих факторов [17–19]: массы плавки, продолжительности (такта) процесса, коэффициента загрузки оборудования. Такт процесса выплавки стали в агрегате (работы оборудования) включает продолжительность транспортной операции (загрузку сырья, материалов, полуфабрикатов в агрегат), длительность основной технологической операции (обработку сырья в агрегате), время вспомогательной операции (выгрузку полуфабрикатов

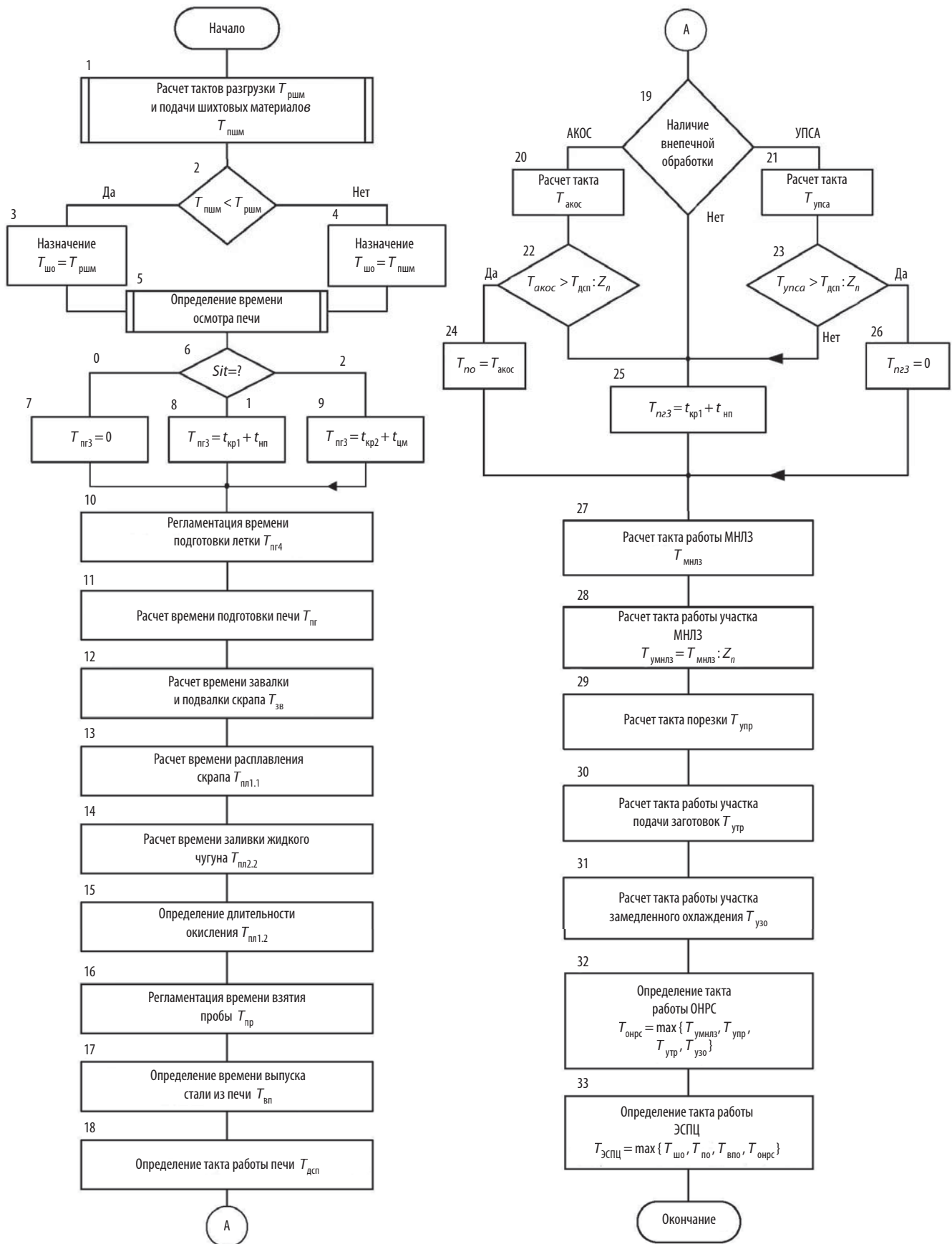


Рис. 2. Алгоритм определения такта работы ЭСПЦ

из агрегата), период вспомогательной операции (подготовку агрегата к следующему циклу работы). При расчете такта процесса производства стали учитывали, что такт работы цеха определяют на основе предварительного выбора тактов процессов в отделениях [20].

Этапы построения нормативных тактовых моделей

Процесс построения нормативной модели функционирования ЭСПЦ состоит из следующих этапов:

- декомпозиция объекта идентификации на подобъекты, которые, в свою очередь, подразделяются на участки и единицы оборудования;
- разделение и классификация производственного процесса на операции, элементы и микроэлементы на базе таких признаков, как важность, степень механизации и автоматизации, контролируемости и визуальной наблюдаемости;
- выбор методов определения нормативных значений микроэлементов, элементов и операций;
- определение расчетной единицы продукции (штука, плавка, пакет, партия) каждого вида оборудования;
- оценивание нормативных тактов для производственной системы (объекта) в целом.

Таким образом, тактовую модель функционирования ЭСПЦ можно оценить на основе следующего соотношения:

$$T_{\text{ЭСПЦ}}^H = \max \{ T_{\text{шо}}^H, T_{\text{по}}^H, T_{\text{впо}}^H, T_{\text{онрс}}^H \}, \quad (1)$$

где $T_{\text{шо}}^H, T_{\text{по}}^H, T_{\text{впо}}^H, T_{\text{онрс}}^H$ — такты процессов в шихтовом и печном отделении, а также в зонах внепечной обработки и непрерывной разливки стали соответственно.

Методика построения тактовой модели работы печного отделения

Функционирование печного отделения (при автономном его рассмотрении) напрямую зависит от работы электропечей, на которые значительное влияние оказывает такт, соответствующий длительности процесса выплавки стали. Тактовую модель работы печного отделения определяют следующим образом:

$$T_{\text{по}} = T_{\text{ДСП1}} : Z_n; T_{\text{ДСП1}} = T_{\text{пг}} + T_{\text{зв}} + T_{\text{пл}} + T_{\text{вп}}, \quad (2)$$

где $T_{\text{ДСП1}}$ — такт работы одной дуговой сталеплавильной печи (ДСП); Z_n — число работающих однотипных печей; $T_{\text{пг}}$ — продолжительность подготовки ДСП к процессу плавания; $T_{\text{зв}}$ — длительность завалки металлошихты и шлакообразующих материалов в печь; $T_{\text{пл}}$ — время плавления металла (скрапа) в печи; $T_{\text{вп}}$ — период выпуска металла из печи в ковш.

Структура элементов такта работы ДСП ($T_{\text{пг}}, T_{\text{зв}}, T_{\text{пл}}, T_{\text{вп}}$) детализируется на 5–7 уровней. Фрагмент многоуровневой детализации процесса загрузки скрапа в ДСП представлен на рис. 1.

Длительность подготовки ДСП к процессу плавления включает следующие составляющие:

- открытие свода печи ($T_{\text{пг1}}$);
- визуальный осмотр сталеваром основных элементов ДСП ($T_{\text{пг2}}$);

– нанесение магнезитового порошка с помощью поддона на местные (незначительные) дефекты футеровки печи или с помощью центробежной машины на протяженные (значительные) дефекты футеровки печи ($T_{\text{пг3}}$);

– подготовку (ремонт) сталевогопускного отверстия печи к следующему выпуску металла ($T_{\text{пг4}}$), $T_{\text{пг}} = T_{\text{пг1}} + T_{\text{пг2}} + T_{\text{пг3}} + T_{\text{пг4}}$, которое также имеет свои элементы.

Длительность завалки металлошихты и шлакообразующих материалов в печь включает следующие компоненты:

$$T_{\text{зв}} = t_{\text{крз}} + t_{\text{вг}} + t_{\text{ут}} + T_{\text{зк}}, \quad (3)$$

где $t_{\text{крз}}$ — длительность крановой операции по доставке скрапа в печь; $t_{\text{вг}}$ — продолжительность загрузки скрапа в печь; $t_{\text{ут}}$ — время уплотнения скрапа в печи; $T_{\text{зк}}$ — период закрытия свода печи ($T_{\text{зк}} = T_{\text{пг1}}$).

Длительность плавления металла в печи состоит из следующих операций.

Длительность плавления скрапа под током состоит из элементов:

$$T_{\text{пл1}} = T_{\text{пл1.1}} + T_{\text{пл1.2}}, \quad (4)$$

где $T_{\text{пл1.1}}$ — длительность расплавления металлошихты и шлакообразующих в печи (определяется с учетом марки стали, массы садки печи, качества металлошихты, числа интенсификаторов и других факторов); $T_{\text{пл1.2}}$ — время окисления металла в печи.

Период плавления без тока включает продолжительность подвалки скрапа в печь $T_{\text{пл2.1}}$, заливки жидкого чугуна в печь $T_{\text{пл2.2}}$ и прочих технологически необходимых простоев печи $t_{\text{пр}}$:

$$T_{\text{пл2}} = T_{\text{пл2.1}} + T_{\text{пл2.2}} + t_{\text{пр}}. \quad (5)$$

Длительность выпуска металла из ДСП в сталеразливочный ковш состоит из следующих компонентов: наклона ДСП в сторону выпуска жидкого металла $t_{\text{нк}}$, выпуска стали из ДСП в сталь-ковш $t_{\text{вп}}$ и возврата ДСП в исходное положение $t_{\text{взп}}$:

$$T_{\text{вп}} = t_{\text{нк}} + t_{\text{вп}} + t_{\text{взп}}. \quad (6)$$

Методика построения тактовых моделей работы вспомогательных отделений

Такт работы шихтового отделения $T_{\text{шо}}$ соотносится с тактами работы участка подачи шихтовых материалов к ДСП $T_{\text{пшм}}$ и зоны разгрузки железнодорожных составов с шихтовыми материалами $T_{\text{ршм}}$:

$$T_{\text{шо}} = \begin{cases} T_{\text{ршм}}, & \text{при } T_{\text{пшм}} < T_{\text{ршм}} \\ T_{\text{пшм}}, & \text{при } T_{\text{пшм}} > T_{\text{ршм}} \end{cases}; T_{\text{пшм}} = T_{\text{пшм1}} : Z_n; \quad (7)$$

$$T_{\text{пшм1}} = T_{\text{зг}} + t_{\text{зги}} + t_{\text{вз}} + T_{\text{тр}} + T_{\text{зск}} + T_{\text{прх}}$$

где $T_{\text{зг}}$ — продолжительность загрузки грейферной бадьи металлошихтой; $t_{\text{зги}}$ — длительность загрузки извести в бадью; $t_{\text{вз}}$ — период взвешивания бадьи на весах; $T_{\text{тр}}$ — время транспортных операций скраповоза; $T_{\text{зск}}$ и $T_{\text{прх}}$ — продолжительность завалки скрапа в печь и порожнего хода бадьи соответственно.

Такт работы отделения внепечной обработки стали ($T_{\text{впо}}$) при наличии агрегата комплексной переработки сырья (АКОС) и пускового сигнального автономного устройства (УПСА) оценивают и сравнивают с тактом работы печного отделения $T_{\text{по}}$ по условиям:

Таблица 1

Выбор такта работы ЭСПЦ

Производственные отделения ЭСПЦ												Такт работы ЭСПЦ
Шихтовое отделение	Печное отделение с учетом работы печей		Отделение внепечной обработки стали						Отделение непрерывной разливки стали с учетом МНЛЗ			
			Агрегат ковш-печь		Установка продувки стали		Установка вакуумирования стали					
	Число единиц работающего оборудования											
	1	2	1	2	1	2	1	2	1	2	2	
Такты работы производственных отделений до реконструкции												
Технически возможные такты, ч												
0,52	1,28	0,64	0,70	–	1,20	0,6	–	–	1,02	0,51	0,70	
Нормативные такты, ч												
0,57	1,42	0,71	0,80	–	1,35	0,67	–	–	1,10	0,55	0,80	
Фактические такты, ч												
0,86	1,72	0,86	0,86	–	1,72	0,86	–	–	1,72	0,86	0,86	
Такты работы производственных отделений после реконструкции												
Технически возможные такты, ч												
0,52	1,12	0,56	0,66	0,33	–	–	0,54	0,27	1,02	0,51	0,56	
Нормативные такты, ч												
0,57	1,24	0,62	0,73	0,37	–	–	0,68	0,34	1,10	0,55	0,62	

$$T_{\text{впо}} = \begin{cases} T_{\text{по}} = T_{\text{дсп}} : Z_n, & \text{если } T_{\text{акос(упса)}} = 0 \\ T_{\text{по}} = T_{\text{акос(упса)}}, & \text{если } T_{\text{акос(упса)}} > T_{\text{дсп}} : Z_n \\ T_{\text{по}} = T_{\text{дсп}} : Z_n, & \text{если } T_{\text{акос(упса)}} \leq T_{\text{дсп}} : Z_n \end{cases} \quad (8)$$

Такт работы отделения непрерывной разливки стали (ОНРС) выбирают из тактов работы соответствующих участков на основе следующего условия:

$$T_{\text{онрс}} = \max \{T_{\text{унлз}}, T_{\text{упр}}, T_{\text{утр}}, T_{\text{узо}}\}, \quad (9)$$

где $T_{\text{унлз}}, T_{\text{упр}}, T_{\text{утр}}, T_{\text{узо}}$ — такты процессов на участках непрерывного литья заготовок, порезки, транспортировки заготовок до коробов, замедленного охлаждения.

Использование тактовых моделей работы ЭСПЦ

Алгоритм расчета нормативного такта работы ЭСПЦ представлен на **рис. 2**. В нем предусмотрен анализ производственных ситуаций в отделениях разгрузки и подачи шихтовых материалов (блоки 3–9), внепечной обработки стали (блоки 19–26), а также расчет тактов работы участков в зоне непрерывной разливки стали (блоки 27–32).

В результате моделирования работы ЭСПЦ, комплексных исследований, анализа фактических и полученных модельных значений технически возможных и нормативных тактов работы агрегатов и производственных отделений в действующем цехе (**табл. 1**) были выявлены диспропорции технического, технологического и организационного характера. Как видно из табл. 1, отделение внепечной обработки стали является «узким» местом в сложной поточной системе, т. е. такт его работы в качестве вспомогательной подсистемы лимитирует работу основного отделения (печного).

Нормативный такт работы ЭСПЦ до предлагаемой реконструкции:

$T_{\text{ЭСПЦ}} = \max\{0,57; 0,71; 0,80; 0,67; 0,55\} = 0,80$ ч — «узким» местом является отделение внепечной обработки стали.

Для ликвидации диспропорции необходимо разработать организационно-технические мероприятия (модернизация, реконструкция), направленные на сокращение такта работы отделения ВПО. В связи с этим рекомендуется вариант модернизации структуры ЭСПЦ на одном из металлургических предприятий путем совершенствования технологии, технических средств и организации материальных потоков в отделениях цеха.

Рассмотрен вариант модернизации цеха в отделении внепечной обработки путем строительства двух камер вакуумирования, а также второй установки ковш-печь и демонтирования двух установок продувки стали, что позволит сократить такт работы печного отделения (см. табл. 1).

Нормативный такт работы ЭСПЦ после предлагаемой реконструкции:

$T_{\text{ЭСПЦ}} = \max\{0,57; 0,62; 0,37; 0,34; 0,55\} = 0,62$ ч — вспомогательные отделения цеха не сдерживают работу основного (печного) отделения.

Полученные ситуационные оценки тактов работы отделений и цеха в целом с учетом числа единиц одновременно работающего основного и вспомогательного оборудования, технологических режимов, маршрутов и сортамента продукции использованы для расчета нормативной производительности ЭСПЦ до и после реконструкции. Выполнена оценка основных технико-экономических показателей (**табл. 2**), которая показала возможность реализации предлагаемой реконструкции.

Проведенная оценка показала различные варианты модернизации структуры ЭСПЦ на металлургических предприятиях путем совершенствования технологии, технических средств и организации материальных потоков в отделениях цеха. Результаты выполненной работы были представлены компании АО «ЕВРАЗ Объединенный Западно-Сибирский металлургический комбинат (АО «ЕВРАЗ ЗСМК»)

Таблица 2

Основные технико-экономические показатели ЭСПЦ

Показатель	Нормативные значения	
	до рекон- струкции	после рекон- струкции
Производственная мощность, т/год	1 271 449,87	1 600 852,7
Выпуск продукции, т/год	1 091 567,77	1 436 651,48
Товарная продукция, т/год	327 470,33	430 995,44
Горячие простои, сут	6,31	5,62
Действительное время, сут	337,56	340,06
Средняя длительность плавки, ч	0,81	0,62
Производительность цеха, т/сут	3 233,7	4 224,7
Производительность труда, т на 1 человека	1 394,08	1 780,24
Расходы по пределу, руб/т	1 616,9	1 525,43
Себестоимость единицы продукции, руб/т	4 612,95	4 519,65
Годовая экономия, млн руб	–	151,87
Реализация товарной продукции, млн руб.	2 039,32	2 684,02
Прибыль от реализации продукции, млн руб.	401,83	563,48
Рентабельность товарной продукции, %	35	38,17
Инвестиции, млн руб.	–	350,0
Срок окупаемости инвестиций, г.	–	3,2

(Новокузнецк), было принято решение о внедрении результатов на производственных участках ЭСПЦ.

Выводы

Представлен тактовый подход, методика и основные формулы, позволяющие построить комплексный алгоритм оценки технически возможной и нормативной производительности ЭСПЦ с учетом сортамента стали и производственных ситуаций. Формулы включают расчет тактов работы участков и отделений ЭСПЦ на основе декомпозиции производственного процесса на элементы и микроэлементы, оценка длительности которых определена с учетом технических характеристик оборудования, режимов его работы, рациональной технологии, оптимальных приемов труда и других факторов.

Многовариантная имитация производственного процесса в условиях наличия жесткой и гибкой связей между агрегатами выявила совокупность факторов, влияющих на согласованность их работы, которая достигается путем нормирования продолжительности операций и процессов в каждом отделении ЭСПЦ.

Разработанные нормативные тактовые модели позволяют определить «узкие» места, оценить эффективность предлагаемых вариантов модернизации структуры цеха (каждого отделения, участка и агрегата) по ситуациям на основании сравнительного анализа отчетных и нормативных технико-экономических показателей, что позволит сократить такт работы печного отделения с 0,80 до 0,56 ч, уменьшить горячие простои с 6,31 до 5,62 сут, увеличить производительность на 990 т/сут, действительный фонд

времени работы цеха на 3,5 сут и выпуск товарной продукции на 103 500 т/год. При этом произойдет снижение себестоимости единицы продукции на 93 руб/т, повышение прибыли и рентабельности от реализации товарной продукции (в литых заготовках и слябах) на 3,2 %. Предлагаемый вариант реконструкции после обсуждения был принят к реализации в электросталеплавильном цехе АО «ЕВРАЗ ЗСМК». 

Библиографический список

1. Гуо Д., Де Бурс Д., Свикард Д. Непрерывное совершенствование технологии кислородно-конвертерной плавки на Arcelormittal Burus Harbor — производственная практика на базе теоретического анализа // Новости черной металлургии за рубежом. 2013. № 3. С. 38–41.
2. Синельников В. А., Филиппов Г. А. Получение качественных слябов при непрерывной разливке трещиноватой стали // Электрометаллургия. 2014. № 6. С. 3–8.
3. Adrian I., Constantiu N., Petru M. Constructive and functional modernization of EAF // IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. 2015. Vol. 85. P. 012014. DOI: 10.1088/1757-899X/85/1/012014.
4. Xiaojun Xi, Shufeng Yang, Jingshe Li, Jinqiang Wu, Mengjing Zhao et al. Physical model experiment and theoretical analysis of scrap melting process in electric arc furnace combined blowing system // Ironmaking and Steelmaking. 2019. Vol. 47, Iss. 7. P. 748–756. DOI: 10.1080/03019233.2019.1594549.
5. Бигеев В. А., Федянин А. Н., Малофеев А. Е., Тухватулин Д. Р. Моделирование технологии выплавки стали в ДСП с применением альтернативного сырья // Теория и технология металлургического производства. 2011. № 11. С. 1–6.
6. Кудасов А. М., Еланский Д. Г. Определение параметров электросталеплавильного производства и компьютерное моделирование его логистики // Достижения вузовской науки. 2013. № 7. С. 219–223.
7. Yujuan R., Hong B. Modeling and simulation of metallurgical process based on hybrid petri net // IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. 2016. Vol. 157. P. 012018. DOI: 10.1088/1757-899X/157/1/012018.
8. Haapala Karl R., Catalina Adrian V., Johnson Michael L., Sutherland John W. Development and application of models for steelmaking and casting environmental performance // Journal of Manufacturing Science and Engineering. 2012. Vol. 134, Iss. 5. P. 1–13. DOI: 10.1115/1.4007463.
9. Sunday A., Williams E., Bolarinwa G. O., Owolabi B. Process modeling of steel refining in electric arc furnace (EAF) for optimum performance and waste reduction // Chemical and Process Engineering Research. 2014. Vol. 28. P. 66–77.
10. Matino I., Alcamisi E., Colla V., Batagida S., Moni P. Process modelling and simulation of electric arc furnace steelmaking to allow prognostic evaluations of process environmental and energy impacts // Matériaux and Techniques. 2016. Vol. 104, No. 1. DOI: 10.1051/mattech/2016004.
11. Xiaojun Xi, Shufeng Yang, Jingshe Li, Jinqiang Wu, Mengjing Zhao, Maolin Ye. Physical model experiment and theoretical analysis of scrap melting process in electric arc furnace combined blowing system // Ironmaking and Steelmaking. 2019. Vol. 47. P. 1–9.
12. Murua M., Boto F., Anglada E., Cabero J. M., Fernandez L. A slag prediction model in an electric arc furnace process for special steel production // Procedia Manufacturing. 2021. Vol. 54. P. 178–183.
13. Межуков В. Я. Производственные мощности и их использование. — М.: Московский государственный университет печати, 2002. — 246 с.
14. Albagachiev A. Yu., Keropyan A. M., Gerasimova A. A., Pashkov A. N. Mathematical models of temperature in electric discharge rolling of metals // CIS Iron and Steel Review. 2021. Vol. 21. P. 43–46.
15. Savchenkov S. A., Bazhin V. Y., Volkova O. Tendencies of innovation development of the russian iron and steel industry on the base of patent analytics for the largest national metallurgical companies // CIS Iron and Steel Review. 2020. Vol. 20. P. 76–82.
16. Kulakov S. M., Musatova A. I., Kadykov V. N., Baranov P. P. Timing models in the reengineering of metallurgical production systems // Steel in translation. 2015. Vol. 45, No 5. P. 367–375.
17. Ахметов Д. В., Васильев Е. Н., Воскобойник М. М. и др. Новый комплекс оборудования для внепечной обработки и непрерывной разливки стали в ККЦ ОАО «ЧМК» // Сталь. 2013. № 3. С. 17–20.

18. Волков К. В., Кузнецов Е. П., Бойков Д. В. и др. Освоение производства рельсовой стали на модернизированной МНЛЗ № 1 ЭСПЦ ОАО ЕВРАЗ ЗСМК // Черная металлургия. Бюллетень научно-технической и экономической информации. 2014. № 6. С. 25–29.
19. Зинуров И. Ю., Тулеевский Ю. Н. Достижения в технологии плавки и конструкции современных высокоомощных дуговых сталеплавиль-

ных печей // Черная металлургия. Бюллетень научно-технической и экономической информации. 2014. № 4. С. 48–56.

20. Колесников Ю. А., Бигеев В. А., Сергеев Д. С. Метод моделирования процесса выплавки стали в конвертере с использованием производственных данных // Теория и технология металлургического производства. 2015. № 1 (16). С. 53–56.

"Chernye metalli", 2022, No. 4, pp. 10–16
DOI: 10.17580/chm.2022.04.02

Development and application of normative timing models for the modernization of an electric steel-smelting shop

Information about authors

R. A. Gizatulin, Dr. Eng., Associate Professor, Professor Dept. of Nonferrous Metallurgy and Chemical Technology¹, e-mail: gizatulin_ra@sibsisu.ru;

A. I. Musatova, Senior Lecturer, Dept. of Management and Sectoral Economics¹, e-mail: musatova-ai@yandex.ru;

N. V. Martyshev, Cand. Eng., Associate Professor, Dept. of Materials Science, Engineering School of New Production Technologies², e-mail: martyshev@tpu.ru;

D. V. Valuev, Cand. Eng., Associate Professor³, e-mail: valuevdy@bk.ru;

A. I. Karlina, Cand. Eng., Researcher⁴, e-mail: karlinat@mail.ru

¹ Siberian State Industrial University, Novokuznetsk, Russia.

² National Research Tomsk Polytechnic University, Tomsk, Russia.

³ Yurga Technological Institute (branch) of the National Research Tomsk Polytechnic University, Yurga, Russia.

⁴ Moscow State University of Civil Engineering, Moscow, Russia.

Abstract: A promising direction of the effectiveness of the functioning of complex industrial complexes is the construction and analysis of their normative models. In order to substantiate the normative productivity of the electric steel-making shop, standard clock models have been created for the operation of each piece of equipment in the departments of the electric steel-making shop: preparation of charge materials, furnace, out-of-furnace treatment, continuous casting of steel. The process of building a clock model is given, including the following stages: decomposition of an object (shop); classification of production operations and elements, the choice of the method for determining the standard values of the ticks, the establishment of the calculated unit of production; calculation of process cycles for each department, estimation of the unit operation cycle. The structure of clock models of functioning of the equipment of the main (furnace), as well as auxiliary departments is presented in detail. An algorithm for determining the cycle of work of an electric steel-making shop has been formed. Comprehensive studies (monitoring of equipment operation, timing observations, processing of statistical data) in electric steel-smelting shops and the values of cycles obtained by modeling revealed the existing «bottlenecks» (disproportions) that reduce the productivity of the shop and a recommended option for modernization in the out-of-furnace department steel processing. A comparative analysis of the normative values of the main technical and economic indicators before and after the proposed reconstruction, which will allow to reduce the cycle of the furnace department, reduce hot downtime, increase productivity, the actual fund of the workshop operation and production output, is carried out, while there will be a decrease cost of production, increasing profits and profitability from the sale of commercial products.

Key words: productivity, clock cycles, decomposition, technique, modeling, standards, results.

References

1. Guo D., De Beers D., Swickard D. Continuous improvement of the BOF smelting technology at Arcelormittal Burus Harbor – field practice based on theoretical analysis. *Novosti chernoy metallurgii za rubezhom*. 2013. No. 3. pp. 38–41.
2. Sinelnikov V. A., Filippov G. A. Obtaining high-quality slabs during continuous casting of crack-sensitive steel. *Elektrometallurgiya*. 2014. No. 6. pp. 3–8.

3. Adrian I., Constantiu N., Petru M. Constructive and functional modernization of EAF. *IOP Conference Series. Materials Science and Engineering*. 2015. Vol. 85.
4. Xiaojun Xi, Shufeng Yang, Jingshe li, Jinqiang Wu, Mengjing Zhao et al. Physical model experiment and theoretical analysis of scrap melting process in electric arc furnace combined blowing system. *Ironmaking and Steelmaking*. 2019. Vol. 47. Iss. 7. pp. 748–756.
5. Bigeev V. A., Fedyanin A. N., Malofeev A. E., Tukhvatulin D. R. Modeling of steel smelting technology in EAF using alternative raw materials. *Teoriya i tekhnologiya metallurgicheskogo proizvodstva*. 2011. No. 11. pp. 1–6.
6. Kudasov A. M., Elanskiy D. G. Determination of parameters of electric steelmaking and computer modeling of its logistics. *Dostizheniya vuzovskoy nauki*. 2013. No. 7. pp. 219–223.
7. Yujuan R., Hong B. Modeling and simulation of metallurgical process based on hybrid petri net. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*. 2016. Vol. 157. p. 012018.
8. Haapala Karl R., Catalina Adrian V., Johnson Michael L., Sutherland John W. Development and application of models for steelmaking and casting environmental performance. *Journal of Manufacturing Science and Engineering*. 2012. Vol. 134. Iss. 5. pp. 1–13.
9. Sunday A., Williams E., Bolarinwa G. O., Owolabi B. Process modeling of steel refining in electric arc furnace (EAF) for optimum performance and waste reduction. *Chemical and Process Engineering Research*. 2014. Vol. 28. pp. 66–77.
10. Matino I., Alcamisi E., Colla V., Batagida S., Moni P. Process modelling and simulation of electric arc furnace steelmaking to allow prognostic evaluations of process environmental and energy impacts. *Matériaux and Techniques*. 2016. Vol. 104. No. 1. DOI: 10.1051/mattech/2016004.
11. Xiaojun Xi, Shufeng Yang, Jingshe li, Jinqiang Wu, Mengjing Zhao, Maolin Ye. Physical model experiment and theoretical analysis of scrap melting process in electric arc furnace combined blowing system. *Ironmaking and Steelmaking*. 2019. Vol. 47. pp. 1–9.
12. Murua M., Boto F., Anglada E., Cabero J. M., Fernandez L. A slag prediction model in an electric arc furnace process for special steel production. *Procedia Manufacturing*. 2021. Vol. 54. pp. 178–183.
13. Medikov V. Ya. Production facilities and their use. Moscow: Moskovskiy gosudarstvenny universitet pechati, 2002. 246 p.
14. Albagachiev A. Yu., Keropyan A. M., Gerasimova A. A., Pashkov A. N. Mathematical models of temperature in electric discharge rolling of metals. *CIS Iron and Steel Review*. 2021. Vol. 21. pp. 43–46.
15. Savchenkov S. A., Bazhin V. Y., Volkova O. Tendencies of innovation development of the russian iron and steel industry on the base of patent analytics for the largest national metallurgical companies. *CIS Iron and Steel Review*. 2020. Vol. 20. pp. 76–82.
16. Kulakov S. M., Musatova A. I., Kadykov V. N., Baranov P. P. Timing models in the reengineering of metallurgical production systems. *Steel in Translation*. 2015. Vol. 45. No. 5. pp. 367–375.
17. Akhmetov D. V., Vasilyev E. N., Voskoboinik M. M. et. al. A new set of equipment for out-of-furnace processing and continuous casting of steel at the JSC ChMK BOF shop. *Stal*. 2013. No. 3. pp. 17–20.
18. Volkov K. V., Kuznetsov E. P., Boykov D. V. et. al. Mastering the production of rail steel at the modernized caster No. 1 of the OJSC EVRAZ ZSMK MSP. *Chernaya metallurgiya. Byulleten nauchno-tekhnicheskoi i ekonomicheskoi informatsii*. 2014. No. 6. pp. 25–29.
19. Zinurov I. Yu., Tuluevskiy Yu. N. Advances in smelting technology and design of modern high power arc steelmaking furnaces. *Chernaya metallurgiya. Byulleten nauchno-tekhnicheskoi i ekonomicheskoi informatsii*. 2014. No. 4. pp. 48–56.
20. Kolesnikov Yu. A., Bigeev V. A., Sergeev D. S. A method for modeling the process of steelmaking in a converter using production data. *Teoriya i tekhnologiya metallurgicheskogo proizvodstva*. 2015. No. 1 (16). pp. 53–56.

НОВОСТИ:

ГОРНОЙ И МЕТАЛЛУРГИЧЕСКОЙ

ПРОМЫШЛЕННОСТИ

ИЗДАТЕЛЬСКОГО ДОМА «РУДА И МЕТАЛЛЫ»

ПОДПИСЫВАЙТЕСЬ НА TELEGRAM-КАНАЛ
t.me/OreMet

РЕКЛАМА

12+