

Вестник Череповецкого государственного университета. 2023. № 1 (112). С. 47–58.
Cherepovets State University Bulletin, 2023, no. 1 (112), pp. 47–58.

Научная статья

УДК 004.41

<https://doi.org/10.23859/1994-0637-2023-1-112-4>

Планирование прокатки и нагрева слэбов на стане 5000 с применением технологий искусственного интеллекта

Максим Александрович Кустов^{1✉}, Евгений Валентинович Ершов²,
Игорь Андреевич Варфоломеев³

^{1,2,3}Череповецкий государственный университет, Череповец,

^{1✉}Kustov.makc@yandex.ru,

²Ershov_ev@mail.ru,

³Igor.varf@gmail.com

Аннотация. Цель исследовательской работы заключается в повышении производительности стана горячей прокатки и обеспечение технологических требований к прокатному производству. В статье рассмотрены методы оптимизации, применяемые для повышения производительности стана, и возможность применения искусственного интеллекта в сфере промышленности. Научная новизна заключается в разработке нового алгоритма оптимизации работы стана 5000, который позволит эффективно планировать процессы прокатки и нагрева.

Ключевые слова: планирование, средства оптимизации, горячекатанный прокат, искусственный интеллект, прокатка, нагрев

Для цитирования: Кустов М. А., Ершов Е. В., Варфоломеев И. А. Планирование прокатки и нагрева слэбов на стане 5000 с применением технологий искусственного интеллекта // Вестник Череповецкого государственного университета. 2023. № 1 (112). С. 47–58. <https://doi.org/10.23859/1994-0637-2023-1-112-4>.

Planning of slab rolling and heating at mill 5000 applying artificial intelligence technologies

Maxim A. Kustov^{1✉}, Evgeny V. Ershov², Igor A. Varfolomeev³

^{1,2,3}Cherepovets State University,

Cherepovets, Russia,

^{1✉}Kustov.makc@yandex.ru,

²Ershov_ev@mail.ru,

³Igor.varf@gmail.com

Abstract. The purpose of the study is to increase the productivity of the hot rolling mill and meet the technological requirements of rolling production. The article discusses the optimization methods used to improve the productivity of the mill and the possibility of applying artificial intelligence in

industry. The scientific novelty lies in the development of a new algorithm for optimizing the operation of the 5000 mill, which will effectively plan the rolling and heating processes.

Keywords: planning, optimization tools, hot-rolled steel, artificial intelligence, rolling, heating

For citation: Kustov M. A., Ershov E. V., Varfolomeev I. A. Planning of slab rolling and heating at mill 5000 applying artificial intelligence technologies. *Cherepovets State University Bulletin*, 2023, no. 1 (112), pp. 47–58. (In Russ.). <https://doi.org/10.23859/1994-0637-2023-1-112-4>.

Введение

Оптимизация производственных процессов является важнейшей задачей на любом промышленном предприятии. Как правило, оптимизация ставит перед собой две приоритетные цели: повышение эффективности производства в целом и сокращение затрат. Конечная цель достигается за счет внедрения более современных технологий, в частности – интеллектуальных решений, и улучшения организации труда¹.

Для любого металлургического производства одной из самых актуальных задач является оптимизация процессов производства. Существующие подходы к решению проблем, которые используются на протяжении нескольких десятков лет, не всегда приносят ожидаемый эффект. Сегодня с использованием новых технологий и различных инструментов работы с указанными данными эти проблемы могут быть решены более эффективно: с помощью внедрения интеллектуальных решений. Промышленные производства заинтересованы в применении данных решений с возможностью получения значительного экономического эффекта, но полного доверия к искусственному интеллекту еще нет².

Составление плана загрузки стана горячей прокатки – главный вопрос, от выполнения которого зависит качество металла и его себестоимость. Прокатный план слэбов – организованная последовательность разносортных слэбов, составленная из разных заказов³.

Задача планирования относится к числу сложных, так как при создании суточного плана загрузки, который формируется из набора заказов потребителей, состоящего из различных сортов металла и марок стали, необходимо учитывать различные требования технологии прокатки и нагрева. Задача усложняется тем, что приходится обрабатывать огромные массивы информации. В этих условиях выполнить все требования технологии нагрева и прокатки слэбов довольно сложно. Потому при планировании плана прокатки нужно уменьшать издержки, появляющиеся при нарушении условий производства, простое оборудования. Зачастую при планировании загрузки станов специалисты применяют локальные правила, полученные опытным

¹ Суворова Я. А. Бережливое производство как эффективный метод оптимизации производства // Международный молодежный симпозиум по управлению, экономике и финансам: Сборник научных статей. Том 1. Казань: Издательство Казанского университета, 2019. С. 266–268.

² Колобов А. В., Варфоломеев И. А. Повышение эффективности бизнес-системы предприятия на основе применения цифровых инструментов в металлургии // Сталь. 2020. №10. С. 69–73.

³ Маляренко И. Планирование и оптимизация // Корпоративные системы. 2006. № 27. С. 29–32.

путем, и пытаются минимизировать количество нарушений при прокатке и нагреве слябов¹.

На данный момент на предприятии ПАО «Северсталь» существует проблема оптимизации работы стана 5000. Необходимо оптимально планировать процессы прокатки и нагрева слябов на стане, чтобы суммарное затраченное время на прокатку и нагрев слябов было минимальным. Максимально эффективно это можно сделать с помощью методов и алгоритмов оптимизации.

Объектом исследования являются автоматизированные системы оптимизации производственных процессов с точки зрения контроля. Предметом – различные методы и алгоритмы оптимизации, используемые в процессе производства².

Цель исследования – повышение эффективности работы стана 5000, т. е. уменьшение суммарного времени прокатки запланированных прокатных партий за счет оптимизации рабочего процесса.

Основная часть

Специфика производства отражается на любом этапе развития интеллектуальной системы. При выполнении задачи необходимо учитывать уникальные условия производства, техники и контроля данных:

- 1) сбор и анализ данных в предметной области,
- 2) разработка математических моделей,
- 3) тестирование разработанного решения.

Прокатка металлов — это такой вид обработки металлов под давлением, в ходе которого выполняется процесс деформации металла, и в результате получается необходимая продукция. В таком процессе металл протягивается между сдавливающими его вращающимися валками, при этом он сжимается в вертикальном направлении и расширяется в поперечном. Таким образом получают продукцию проката из цветных металлов и их сплавов. Сами агрегаты, на которых происходит прокатка металлов, называются прокатными станами³.

В зависимости от температуры катаемого металла прокатка разделяется на горячую и холодную. Прокатку металла, нагретого выше температуры рекристаллизации, называют горячей, а ниже – холодной. Для горячей прокатки свойственны отсутствие упрочнения и малозначительные изменения механических и физико-химических свойств металла. Пластическая деформация не создает неравномерности микроструктуры, но в макроструктуре происходят изменения, создающие анизотропию механических свойств, при которой свойства материала вдоль проката обычно лучше его свойств в поперечном направлении. При холодной прокатке металла про-

¹ Маляренко И. Планирование и оптимизация // Корпоративные системы. 2006. № 27. С. 29–32.

² Богачев Д. В., Ершов Е. В., Варфоломеев И. А. Использование нейро-нечетких методов при управлении технологическими процессами в металлургии // Череповецкие научные чтения – 2012: материалы Всероссийской научно-практической конференции (1 – 2 ноября 2012 г.). Череповец: ЧГУ, 2013. С. 32–35.

³ Борисов И. А., Львова С. С. Выбор стали для валков прокатных станов // Металловедение и термическая обработка металлов. 2009. №6 (648). С. 8–14.

исходит упрочнение, изменяющее механические и физико-химические свойства проката. Изменения затрагивают микро- и макроструктуру металла. В холодном прокате возникает анизотропия не только механических, но и физико-химических свойств. Процесс прокатки осуществляется на стане горячей прокатки¹.

Станы различного проката подразделяются в зависимости от характера прокатного процесса и изготавливаемой продукции на слябинги, листопрокатные, сортовые, трубoproкатные и специальные. Слябы – большие прямоугольные изделия – прокатывают на слябингах, а потом на прокатных станах производятся более мелкие прямоугольные слябы и листы².

Для оптимизации деятельности прокатного стана использовался симплекс-метод. В результате исследования были разработаны математические модели. Представленные математические модели позволяют соединить прокатные группы таким образом, чтобы в итоге получилось наименьшее общее время прокатки всех сформированных партий³.

В данном случае прокатные группы будут формироваться в зависимости от характеристик слэбов (время черновой, чистовой прокатки и время подстуживания). Разработанные модели позволяют сгруппировать прокатные партии и получить наименьшее суммарное время прокатки, которое будет затрачено на выполнение всего плана заказов. Далее рассмотрим эти модели подробнее.

1. Имитационная модель.

Задача имитационной модели – рассчитать длительность прокатки группы для заданного множества слэбов.

На вход данной имитационной модели подаются следующие данные:

- общее количество слэбов – n ;
- длительность черновой прокатки слэбов ($t_{\text{черн}1}, t_{\text{черн}2}, \dots, t_{\text{черн}n}$);
- длительность чистовой прокатки слэбов ($t_{\text{чист}1}, t_{\text{чист}2}, \dots, t_{\text{чист}n}$);
- длительность подстуживания слэбов ($t_{\text{подстуж}1}, t_{\text{подстуж}2}, \dots, t_{\text{подстуж}n}$);
- пауза между чистовыми прокатками в группе ($p_{\text{чист}}$);
- пауза между черновыми прокатками в группе ($p_{\text{черн}}$);
- пауза между последней черновой прокаткой в группе и первой чистовой ($p_{\text{меж}}$);
- ширина слэба $W (w_1, w_2, \dots, w_n)$;
- длина слэба $L (l_1, l_2, \dots, l_n)$.

¹ Березин А. А., Вакула И. А., Леонова С. И. Задача планирования горячей прокатки // Современные проблемы математики и её приложений. Екатеринбург: Институт математики и механики УрО РАН им. Н. Н. Красовского, 2015. С. 98–104.

² Шаталов Р. Л., Генкин А. Л. Автоматизация процесса горячей прокатки плоского металла. Москва: МГОУ, 2009. 256 с.

³ Люгер Дж. Ф. Искусственный интеллект. Стратегии и методы решения сложных проблем. Москва: Вильямс, 2005. 864 с.

Перед тем, как передать данные по характеристикам слэбов в имитационную модель, происходит сортировка слэбов по увеличению черновой прокатки. В результате подтверждается линейная логика, а для решения задачи используются методы линейного программирования.

Начальное время прокатки группы τ_0 примем за 00:00. За $i = 1 \dots c$ примем количество штук в группе. Расчет времени конца черновой прокатки первой штуки $\tau_{к.ч.}$ рассчитывается как

$$\tau_{к.п.1} = \tau_{н.чист.1} = \tau_{к.ч.1} + t_{подстуж1} \quad (1)$$

Также это время равно началу подстуживания $\tau_{н.п.}$ первой штуки. Чтобы рассчитать время конца подстуживания первой $\tau_{к.п.}$ (это то же самое, что и начало чистовой прокатки $\tau_{н.чист.}$), нужно ко времени конца черновой прокатки прибавить длительность подстуживания:

$$\tau_{к.п.1} = \tau_{н.чист.1} = \tau_{к.ч.1} + t_{подстуж1} \quad (2)$$

Чтобы рассчитать время конца чистовой прокатки, необходимо ко времени начала чистовой прокатки прибавить ее длительность:

$$\tau_{к.чист.1} = \tau_{н.чист.1} + t_{чист1} \quad (3)$$

В результате подсчитано общее время прокатки первой штуки в группе. Время прокатки каждой следующей штуки в группе рассчитываем следующим образом: к началу следующей чистовой прокатки прибавляем паузу между чистовыми прокатками $p_{чист}$, т. е.

$$\tau_{н.чист.i} = \tau_{к.чист.i-1} + p_{чист}, \text{ где } i \neq 1, \quad (4)$$

$$\tau_{к.чист.i} = \tau_{н.чист.i} + t_{чистi}, \text{ где } i \neq 1. \quad (5)$$

Время начала подстуживания (конца черновой прокатки) будет равно:

$$\tau_{н.подстуж.i} = \tau_{к.ч.i} = \tau_{н.чист.i} - t_{подстужi}, \text{ где } i \neq 1. \quad (6)$$

Время начала черновой прокатки каждой следующей штуки равно:

$$\tau_{н.ч.i} = \tau_{к.ч.i} - t_{чернi}, \text{ где } i \neq 1. \quad (7)$$

После того, как мы рассчитали время прокатки штуки, необходимо проверить, чтобы выполнялись следующие условия:

$$\tau_{н.ч.i} - \tau_{к.ч.i-1} \geq p_{черн}, \text{ где } i \neq 1;$$

$$\tau_{н.чист.i} > \tau_{к.чист.i-1}, \text{ где } i \neq 1;$$

$$\tau_{\text{к.ч. } i} < \tau_{\text{н.чист. } i-1}, \quad \text{где } i \neq 1;$$

$$\tau_{\text{к.ч. } i} - \tau_{\text{н.чист. } 1} \geq p_{\text{меж}}, \quad \text{где } i \neq 1.$$

Если хотя бы одно из условий не выполняется, то прокатная группа считается неисполнимой и мы ее не рассматриваем.

В результате работы данной имитационной модели получается набор всех возможных сформированных групп $X = (x_1, x_2, \dots, x_m)$, где m – количество групп. Каждая группа имеет свою суммарную длительность $d = (d_1, d_2, \dots, d_m)$.

Далее набор сформированных прокатных групп передается в модель оптимизации прокатных партий.

2. Математическая модель оптимизации прокатных партий.

Задача данной модели оптимизации заключается в том, чтобы определить для заданного перечня слэбов, которые необходимо прокатать на следующие сутки, как их сформировать в прокатные группы с минимальной суммарной длительностью прокатки.

На первом шаге сгенерируем все возможные варианты группировок прокатных групп для данных типов слэбов. Количество типов слэбов обозначим за n .

Так как у нас есть технологическое ограничение, которое заключается в том, что много разных типов слэбов в одну прокатную группу не добавляем, в нашем случае количество типов слэбов в одной прокатной группе z равно 3.

Отсюда можно сделать вывод, что после вызова имитационной модели для генерации всех возможных вариантов остается m групп слэбов, где $m = n \cdot (n-1) \cdot (n-2)$, при $z = 3$.

Имитационная модель для каждой группы слэбов проверяет, можно ли прокатать так слэбы или нет, рассчитывает, сколько они будут кататься.

Дальше обозначим через $X = (x_1, x_2, \dots, x_m)$ какое количество экземпляров таких прокатных групп необходимо взять для выполнения заказа и для решения данной оптимизационной задачи.

Для решения этой задачи необходимо следующее:

- 1) целевая функция

$$F(X) = \sum_{i=1}^n X_i \cdot d_i \rightarrow \min, \quad (8)$$

где d_i – длительность прокатки группы;

- 2) задача оптимизации решается в условиях ограничений, т. е. все слэбы, которые есть в перечне заказов, необходимо сделать за «сегодня». Для этого введем следующие обозначения.

Количество слэбов каждого типа в перечне заказов обозначим множеством $K = (k_1, k_2, \dots, k_n)$.

Множеством $A(a_{11}, a_{12}, \dots, a_{1m}; a_{21}, a_{22}, \dots, a_{2m}; \dots, a_{n1}, a_{n2}, \dots, a_{nm})$ обозначим количество слябов в m -ой группе слябов k -го типа.

Множество ограничений можно представить в виде системы неравенств:

$$\left\{ \begin{array}{l} \sum_{i=1}^n a_{ij} \cdot x_i \leq k_j \\ \sum_{i=1}^n a_{ij} \cdot x_i \geq k_j \end{array} \right\}. \quad (9)$$

Так как данные ограничения являются линейными, поэтому данная задача решалась методом линейного программирования – симплекс-методом.

Симплекс-метод – алгоритм решения оптимизационной задачи линейного программирования путем перебора вершин выпуклого многогранника в многомерном пространстве. Суть метода: построение базисных решений, на которых монотонно убывает линейный функционал до ситуации, когда выполняются необходимые условия локальной оптимальности¹.

Разработанный алгоритм для планирования прокатки и нагрева слябов на стане 5000, представлен на рис. 1.

Далее будет представлено описание работы созданного алгоритма.

1. Получаем данные о технологических параметрах слябов из БД, файла, вводим вручную данные о печах, получаем план заказов.

2. Рассчитываем оптимальное суммарное время прокатки в соответствии с планом заказов:

а) формируем прокатные партии с помощью математической модели оптимизации прокатных партий;

б) с помощью имитационной модели проверяем возможность прокатки групп по отдельности;

в) после проверки групп продолжает свою работу математическая модель оптимизации прокатных партий;

г) получаем оптимизированный график прокатных партий.

4. Полученный график передается на формирование раскладки слябов по печам.

5. Формулировка вывода пользователю о сформированных прокатных группах (рис. 2) и посадке слябов в печи (рис. 3), сохранение результатов.

¹ Самарин В. И., Игнатенко А. М., Макарова И. Л., Якунина Н. Ф. Технология раскрытия темы «симплекс – метод решения задачи линейного программирования» // Вопросы гуманитарных наук. 2016. №2 (83). С. 118–126.

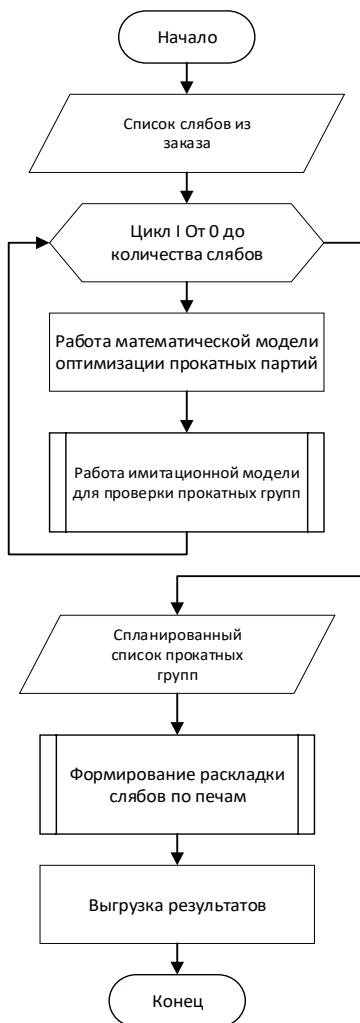


Рис. 1. Блок-схема алгоритма планирования прокатки и нагрева слэбов на стане 5000

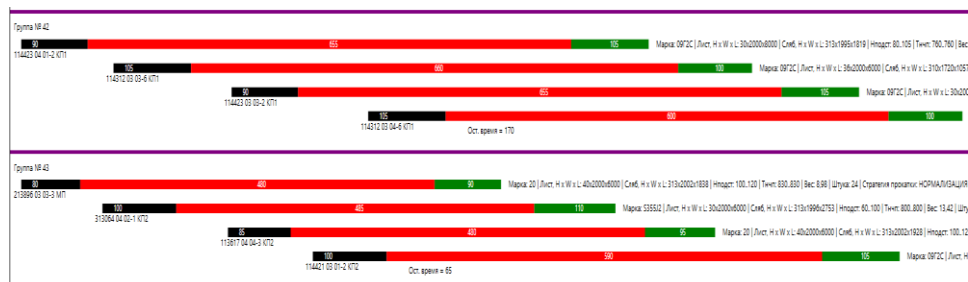


Рис. 2. Сформированные прокатные группы

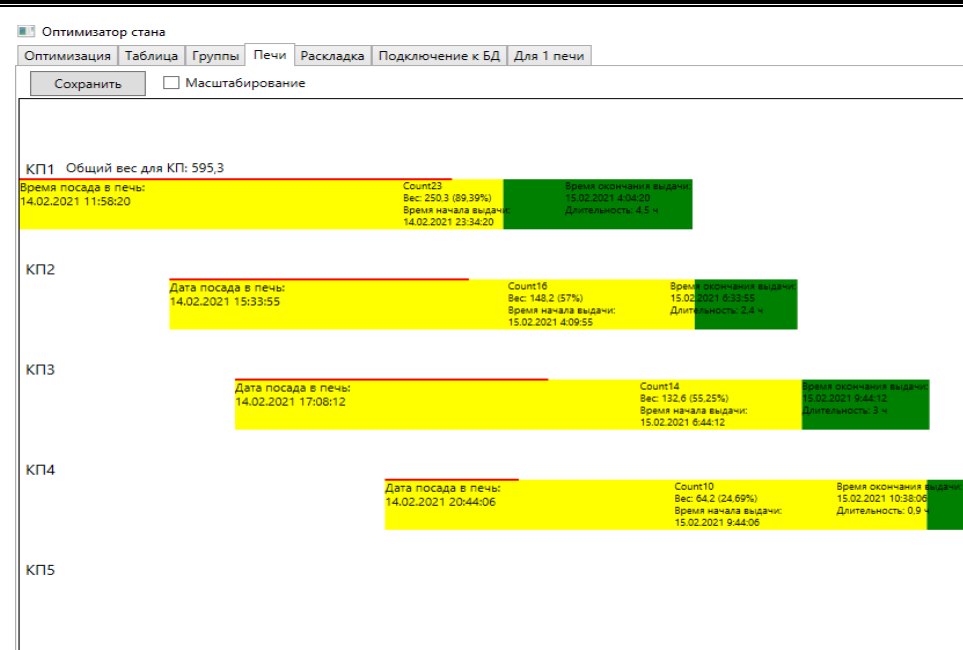


Рис. 3. Раскладка слябов по печам

Разработанный алгоритм позволит быстрее производить необходимый план заказов за счет наиболее выгодного формирования прокатки и нагрева слябов. Программная реализация алгоритма выполнена на языке программирования C# в среде MS Visual Studio 2019. При просмотре сформированных прокатных групп мастер нагревательных печей может увидеть, из каких слябов состоит группа, длительность каждого сляба и оставшееся время в группе между первым и последним слябом. При просмотре заполненности печей мастер может увидеть время посадка слябов в печь, время начала и окончания выдачи слябов, количество слябов внутри печи, общий вес слябов и длительность выдачи всех слябов из конкретной печи. Также после того, как алгоритм отработает, пользователь сможет выгрузить все эти данные в табличном виде.

Результаты. Тестирование разработанного алгоритма было проведено во время промышленной эксплуатации, т. е. непосредственно на производстве. Испытание разработанного интеллектуального решения проводилось в формате A/B-тестирования с разделением плана заказов на следующие сутки на две группы: с применением полученных результатов решения и списком, подготовленным специалистом. Применение разработанного интеллектуального решения в рамках промышленной эксплуатации принесло уменьшение суммарного времени прокатки плана заказов на 2,5–5,0 %, поэтому внедрение решения является целесообразным¹.

¹ Mathis L. A/B Testing // Designed for Use. Pragmatic Bookshelf, 2011. 344 p.

Вестник Череповецкого государственного университета • 2023 • № 1 | ISSN 1994-0637 55
Cherepovets State University Bulletin • 2023 • No. 1 | (print)

Выводы

В результате исследовательской работы был разработан алгоритм для планирования прокатки и нагрева прокатных партий, имитационная и математическая модели оптимизации прокатных партий, разработано программное обеспечение для планирования прокатки и нагрева слэбов на стане 5000, позволяющее через пользовательский интерфейс взаимодействовать между базой данных и алгоритмом.

Результат использования системы показывает, что искусственный интеллект и промышленное производство совместимы, если системно относиться к его реализации и решению проблем, критически рассматривая каждую деталь и особенности производства.

Список источников

Березин А. А., Вакула И. А., Леонова С. И. Задача планирования горячей прокатки // Современные проблемы математики и ее приложений. Екатеринбург: Институт математики и механики УрО РАН им. Н. Н. Красовского, 2015. С. 98–104.

Богачев Д. В., Ершов Е. В., Варфоломеев И. А. Использование нейро-нечетких методов при управлении технологическими процессами в металлургии // Череповецкие научные чтения – 2012: материалы Всероссийской научно-практической конференции (1–2 ноября 2012 г.). Череповец: ЧГУ, 2013. С. 32–35.

Борисов И. А., Львова С. С. Выбор стали для валков прокатных станов // Металловедение и термическая обработка металлов. 2009. №6 (648). С. 8–14.

Колобов А. В., Варфоломеев И. А. Повышение эффективности бизнес-системы предприятия на основе применения цифровых инструментов в металлургии // Сталь. 2020. №10. С. 69–73.

Люгер Дж. Ф. Искусственный интеллект. Стратегии и методы решения сложных проблем. Москва: Вильямс, 2005. 864 с.

Маляренко И. Планирование и оптимизация // Корпоративные системы. 2006. № 27. С. 29–32.

Самарин В. И., Игнатенко А. М., Макарова И. Л., Якунина Н. Ф. Технология раскрытия темы «симплекс-метод решения задачи линейного программирования» // Вопросы гуманитарных наук. 2016. №2 (83). С. 118–126.

Суворова Я. А. Бережливое производство как эффективный метод оптимизации производства // Международный молодежный симпозиум по управлению, экономике и финансам: сборник научных статей. Том 1. Казань: Издательство Казанского университета, 2019. С. 266–268.

Шаталов Р. Л., Генкин А. Л. Автоматизация процесса горячей прокатки плоского металла. Москва: МГОУ, 2009. 256 с.

Mathis L. A/B Testing. Designed for Use. Raleigh: Pragmatic Bookshelf, 2011. 344 p.

References

Berezin A. A., Vakula I. A., Leonova S. I. Zadacha planirovaniia goriachei prokatki [Hot rolling planning problem]. *Sovremennye problemy matematiki i ee prilozhenii* [Modern problems of mathematics and its applications]. Ekaterinburg: Institut matematiki i mekhaniki UrO RAN im. N. N. Krasovskogo, 2015, pp. 98–104.

Bogachev D. V., Ershov E. V., Varfolomeev I. A. Ispol'zovanie neuro-nechetkikh metodov pri upravlenii tekhnologicheskimi protsessami v metallurgii [The use of neuro-fuzzy methods in the management of technological processes in metallurgy]. *Cherepovetskie nauchnye chteniia – 2012: materialy Vserossiiskoi nauchno-prakticheskoi konferentsii (1–2 noiabria 2012 g.)* [Proceedings of the All-Russian research and practice conference (November 1–2, 2012)]. Cherepovets: Cherepovetskii gosudarstvennyi universitet, 2013, pp. 32–35.

Borisov I. A., L'vova S. S. Vybor stali dlia valkov prokatnykh stanov [Choice of steel for rolling mill rolls]. *Metallovedenie i termicheskai obrabotka metallov* [Metal Science and Heat Treatment], 2009, no. 6 (648), pp. 8–14.

Kolobov A. V., Varfolomeev I. A. Povyshenie effektivnosti biznes-sistemy predpriiatiia na osnove primeneniia tsifrovyykh instrumentov v metallurgii [Increasing the business system efficiency of an enterprise based on the application of digital instruments in metallurgy]. *Stal'* [Steel], 2020, no. 10, pp. 69–73.

Liuger Dzh. F. *Iskusstvennyi intellekt. Strategii i metody resheniia slozhnykh problem* [Artificial intelligence. Strategies and methods for solving complex problems]. Moscow: Vil'iams, 2005. 864 p.

Maliarenko I. Planirovanie i optimizatsiia [Planning and optimization]. *Korporativnye sistemy* [Corporate systems], 2006, no. 27, pp. 29–32.

Samarin V. I., Ignatenko A. M., Makarova I. L., Iakunina N. F. Tekhnologiiia raskrytiia temy «simpleks – metod resheniia zadachi lineinogo programmirovaniia» [Technology for exploring the topic "simplex – a method for solving the problem of linear programming"]. *Voprosy gumanitarnykh nauk* [Issues of Humanitarian Sciences], 2016, no. 2 (83), pp. 118–126.

Suvorova Ia. A. Berezhlivoe proizvodstvo kak effektivnyi metod optimizatsii proizvodstva [Lean production as an effective method of production optimization]. *Mezhdunarodnyi molodezhnyi simpozium po upravleniiu, ekonomike i finansam* [International Youth Symposium on Management, Economics and Finance: collection of research papers]. Kazan': Izdatel'stvo Kazanskogo universiteta, 2019, vol. 1, pp. 266–268.

Shatalov R. L., Genkin A. L. *Avtomatizatsiia protsessa goriachei prokatki ploskogo metalla* [Automation process for hot rolling of flat metal]. Moscow: MGOU, 2009. 256 p. Mathis L. *A/B Testing. Designed for Use*. Raleigh: Pragmatic Bookshelf, 2011. 344 p.

Сведения об авторах

Максим Александрович Кустов – студент; kustov.makc@yandex.ru, Череповецкий государственный университет (д. 5, пр-т Луначарского, 162600 г. Череповец, Россия); **Maxim A. Kustov** – Student; Cherepovets State University (5, pr. Lunacharskogo, 162600 Cherepovets, Russia).

Евгений Валентинович Ершов – доктор технических наук, профессор; Ershov_ev@mail.ru, Череповецкий государственный университет (д. 5, пр-т Луначарского, 162600 г. Череповец, Россия); **Evgeny V. Ershov** – Doctor of Technical Sciences, Professor; Ershov_ev@mail.ru, Cherepovets State University (5, pr. Lunacharskogo, 162600 Cherepovets, Russia).

Игорь Андреевич Варфоломеев – кандидат технических наук, доцент; Igor.varf@gmail.com, Череповецкий государственный университет (д. 5, пр-т Луначарского, 162600 г. Череповец, Россия); **Igor A. Varfolomeev** – Candidate of Technical Sciences, Associate Professor; Igor.varf@gmail.com, Cherepovets State University (5, pr. Lunacharskogo, 162600 Cherepovets, Russia).

Заявленный вклад авторов: все авторы сделали эквивалентный вклад в подготовку публикации. Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Contribution of the authors: the authors contributed equally to this article. The authors declare no conflicts of interests.

Статья поступила в редакцию 18.11.2022; одобрена после рецензирования 06.12.2022; принята к публикации 20.12.2022.

The article was submitted 18.11.2022; Approved after reviewing 06.12.2022; Accepted for publication 20.12.2022.