

На правах рукописи



КЛИМАЧЕВ Сергей Александрович

**ОПТИКО-ЭЛЕКТРОННАЯ СИСТЕМА КОНТРОЛЯ КАЧЕСТВА
ЛИСТОВОГО МЕТАЛЛОПРОКАТА СО СРЕДСТВАМИ
ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНОЙ ПОДДЕРЖКИ РЕШЕНИЙ
ПО УСТРАНЕНИЮ ДЕФЕКТОВ**

Специальность: 2.3.1. – Системный анализ, управление и обработка
информации, статистика (технические науки)

АВТОРЕФЕРАТ
диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Оренбург – 2025

Работа выполнена в федеральном государственном бюджетном образовательном учреждении высшего образования «Оренбургский государственный университет» (ОГУ).

Научный руководитель: доктор технических наук, профессор
Соловьев Николай Алексеевич.

Официальные оппоненты: **Антонов Вячеслав Викторович**,
доктор технических наук, профессор,
заведующий кафедрой автоматизированных систем управления федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Уфимский университет науки и технологий».

Синецкий Роман Михайлович,
кандидат технических наук,
доцент кафедры «Программное обеспечение вычислительной техники» федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Южно-Российский государственный политехнический университет (НПИ) имени М.И. Платова».

Ведущая организация: федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Череповецкий государственный университет».

Защита состоится «10» апреля 2026 г. в 10 часов 00 минут на заседании диссертационного совета 24.2.352.03, созданного на базе федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Оренбургский государственный университет», по адресу: 460018, г. Оренбург, просп. Победы, д. 13, ауд. 170215.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Оренбургский государственный университет» по адресу: 460018, г. Оренбург, просп. Победы, д. 13 и на сайте <http://www.osu.ru/doc/5612/asp/251>.

Автореферат разослан «__» ____ 2026 г.

Учёный секретарь
диссертационного совета 24.2.352.03,
кандидат технических наук

Д.И. Парфёнов

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы исследования. Цифровизация промышленного производства является одной из приоритетных задач отечественной экономики. Политика технологической независимости Российской Федерации, а также уход с российского рынка ряда зарубежных поставщиков программного обеспечения способствовали разработке новых цифровых решений и их внедрению в существующие технологические процессы, в частности, в процесс производства листового металлопроката.

Современное состояние технологии производства листового металлопроката характеризуется повышением требований к качеству готовой продукции при уменьшении прокатной толщины листа. В этих условиях возрастает влияние факторов внешней среды: случайного характера физико-механических свойств горячекатаной заготовки, технического состояния прокатного оборудования, влияния человеческого фактора. Все это определяет положительную динамику роста поверхностных дефектов проката. Поэтому технологические линии оснащены системами контроля качества продукции на основе средств компьютерного зрения, которые позволяют выявить дефекты в процессе производства. Подобные исследования представлены в работах отечественных и зарубежных авторов: Гарбара Е.А., Шаветова С.В., Бугаева Д.П., Мазура И.П., Логуновой О.С., Трофимова В.Б., Кузьмина М.И., Тищенко Д.А., Привезенцева Д.Г., Wu G, Medina J. Li, Zhou S. и др.

Обобщая результаты исследований, можно сделать вывод о том, что в настоящее время сложилась система методов, моделей и средств обеспечения качества поверхности листового металлопроката, разработаны общеметодологические принципы их использования, которые позволяют решать задачу идентификации поверхностных дефектов проката с помощью оптико-электронных систем контроля качества (ОЭСКК).

Часть дефектов проката можно устранить в процессе производства посредством корректировки исходных технологических параметров прокатки. Однако задача изменения параметров полностью возложена на оператора прокатного стана, работающего в условиях дефицита времени, и требует системного анализа влияния факторов воздействия внешней среды. Это способствует увеличению прогонов и, как следствие, приводит к снижению производительности прокатного стана.

Таким образом, возникает проблемная ситуация, которая требует решения научной задачи развития знаний в области средств поддержки принятия решений (СППР) по изменению задающих технологических параметров прокатки для устранения поверхностных дефектов листового металлопроката. Отсюда, тема исследования является актуальной.

Работа выполнена в рамках госбюджетной НИР «Развитие цифровых технологий информационно-телекоммуникационных систем» (№ госрегистрации АААА-А18-118102690042-6).

Объект исследования – оптико-электронные системы контроля качества поверхности листовых материалов.

Предмет исследования – методы, модели и алгоритмы интеллектуальной обработки информации в ОЭСКК для принятия решений по устранению дефектов поверхности листовых материалов.

Цель исследования – повышение эффективности ОЭСКК листовых материалов на основе внедрения средств интеллектуальной поддержки принятия решений по устранению выявленных дефектов.

Задачи достижения цели исследования:

1) разработать концептуальную модель принятия решений по устранению дефектов поверхности листового металлопроката на основе контура управления технической системой с ОЭСКК;

2) разработать методику, модели и алгоритм поддержки принятия решений по устранению дефектов поверхности листового материала при холодной обработке металла давлением с учетом воздействия факторов внешней среды, оказывающих влияние на качество поверхности листа;

3) разработать прототип СППР по устранению дефектов металлопроката в ОЭСКК поверхности листовых материалов;

4) выполнить экспериментальное исследование предложенных технических решений и оценить их эффективность.

Область исследования соответствует паспорту специальности 2.3.1. – «Системный анализ, управление и обработка информации, статистика»: п. 2 – формализация и постановка задач системного анализа, оптимизации, управления, принятия решений, обработки информации и искусственного интеллекта; п. 3 – разработка критериев и моделей описания и оценки эффективности решения задач системного анализа, оптимизации, управления, принятия решений, обработки информации и искусственного интеллекта; п. 4 – разработка методов и алгоритмов решения задач системного анализа, оптимизации, управления, принятия решений, обработки информации и искусственного интеллекта; п. 5 – разработка специального математического и алгоритмического обеспечения систем анализа, оптимизации, управления, принятия решений, обработки информации и искусственного интеллекта.

Научная новизна положений, выносимых на защиту:

1) Концептуальная модель принятия решений по устранению дефектов поверхности листового металлопроката на основе контура управления технической системой с ОЭСКК, отличающаяся наличием научно-обоснованной взаимосвязи технологических параметров холодной обработки металла давлением с показателями качества поверхности листового материала в условиях воздействия внешней среды (п. 2, п. 3).

2) Методика поддержки принятия решений по устранению дефектов поверхности листового материала при холодной обработке металла давлением, отличающаяся наличием модели области дефектов проката с расширенным набором признаков и учетом воздействия факторов внешней среды, оказывающих влияние на качество поверхности проката и особенности дефекта (п. 5).

3) Модель изменения состояний поверхности листового металла в процессе прокатки, *отличающаяся* учетом воздействия факторов, оказывающих влияние на качество поверхности проката: качества заготовки, технического состояния прокатного оборудования, влияния человеческого фактора (п. 3).

4) Алгоритм поддержки принятия решений по устранению дефектов поверхности листового металлопроката, *отличающийся* использованием множества Парето-оптимальных альтернатив устранения дефектов и выбором лучшей альтернативы по критерию уровня дефектности, оцениваемого на основе признаков изображения области дефекта по многопараметрической модели изменения состояний поверхности металлопроката (п. 4, п. 5).

Достоверность и обоснованность научных результатов. Достоверность научных положений работы основана на используемой методологической базе исследования и обеспечивается обоснованностью принятых ограничений при разработке математического аппарата, сходимостью результатов исследования с экспериментальными данными.

Теоретическая значимость диссертационной работы заключается в разработке методики, моделей и алгоритмов интеллектуальной поддержки принятия решений по управлению процессом устранения дефектов листового металлопроката в условиях воздействия внешней среды.

Практическая ценность заключается в разработанной программной системе интеллектуальной поддержки принятия решений по управлению процессом устранения дефектов листового металлопроката, являющейся развитием специального программного обеспечения оптико-электронной системы контроля качества готовой продукции, что подтверждено свидетельством о государственной регистрации программы для ЭВМ.

Внедрение результатов работы. Материалы диссертации внедрены в практику ООО «ГЗОЦМ «Гайская медь» и учебный процесс ФГБОУ ВО «Оренбургский государственный университет».

Методы исследования. Исследования выполнены с использованием теории систем и системного анализа, теории автоматизированного управления, теории принятия решений, методов цифровой обработки изображений, искусственного интеллекта и исследования операций.

Личный вклад автора. Все результаты диссертационной работы получены автором самостоятельно. Направления исследований, формулировка проблем и постановка задач, выдвижение гипотезы их решения обсуждались с научным руководителем – д.т.н., профессором Н.А. Соловьевым, что отражено в совместных публикациях. Системный анализ процессов обнаружения и устранения поверхностных дефектов на основе действующей ОЭСКК, анализ структуры исходной видеинформации, модель математического описания изображения металлопроката на основе признаков области дефекта, методика применения критерия выбора заданного уровня устранения дефектов, образующего множество Парето, информационное и программное обеспечение для обработки полученной информации оптико-электронного контроля качества готовой продукции в ходе имитационного эксперимента, основные результаты принадлежат автору.

Апробация результатов. Основные результаты работы докладывались и обсуждались на 83-й Международной научно-технической конференции «Актуальные проблемы современной науки, техники и образования» (г. Магнитогорск, 2025 г.), II Всероссийской научно-практической конференции «Программное обеспечение для цифровизации предприятий и организаций» (г. Магнитогорск, 2024 г.), VII Всероссийской научной конференции с международным участием «Информационные технологии в моделировании и управлении: подходы, методы, решения» (г. Тольятти, 2024 г.), 82-й Международной научно-технической конференции «Актуальные проблемы современной науки, техники и образования» (г. Магнитогорск, 2024 г.), XIX Международной научно-практической конференции «Электронные средства и системы управления» (г. Томск, 2023 г.), Всероссийской научно-технической конференции «Современные научно-исследовательские и технологические аспекты программной инженерии» (г. Оренбург, 2023 г.), международной научно-технической конференции «Научная сессия ТУСУР-2022» (г. Томск, 2022 г.), всероссийской научно-практической конференции «Наука и образование – 2021» (г. Мурманск, 2021 г.), VI Всероссийской научно-практической конференции «Инженерные технологии: традиции, инновации, векторы развития» (г. Абакан, 2020 г.), всероссийской научно-практической конференции «Университетская наука: решения и инновации» (г. Оренбург, 2018 г.).

Публикации. По теме исследования опубликовано 14 печатных работ, в том числе 3 статьи в журнале из «Перечня...» ВАК. Получено одно свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ.

Структура и объем работы. Диссертация состоит из введения, четырех глав, заключения, библиографического списка из 95 наименований, двух приложений и содержит 111 страниц текста, 47 рисунков и 11 таблиц.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении обоснованы актуальность и значимость диссертационной работы, дана характеристика степени изученности исследуемой проблемы и подходов к её решению, определены объект, предмет, цель и задачи исследования, отражены научная новизна и практическая значимость полученных результатов, сформулированы основные положения, выносимые на защиту.

В первой главе выполнен анализ существующей структуры и характеристик ОЭСКК поверхности листовых материалов в области холодной обработки металла давлением, на базе которой выполняется исследование. Рассмотрены разработки ОЭСКК поверхности листового металлопроката и примеры использования средств поддержки принятия решений в системах контроля качества.

Выполнен обзор дефектов холоднокатанных листов и полос и причин их возникновения, на основе которого выделены группы факторов, оказывающих влияние $V(t)$ на качество поверхности листового проката в процессе холодной обработки металла давлением: качество заготовки $V_1(t)$, техническое состояние оборудования прокатного стана $V_2(t)$, человеческий фактор $V_3(t)$.

$$V(t) = (V_1(t), V_2(t), V_3(t)), \quad (1)$$

где $V(t)$ – комплексное влияние внешних факторов на процесс прокатки металла.

Выполнен системный анализ требований практики и состояния теории процесса холодной обработки металла давлением с контролем качества поверхности листовых материалов, на основе которого выявлена проблемная ситуация между динамикой роста поверхностных дефектов листового металлопроката под воздействием внешних факторов и отсутствием в ОЭСКК СППР по устранению выявленных дефектов (рисунок 1).

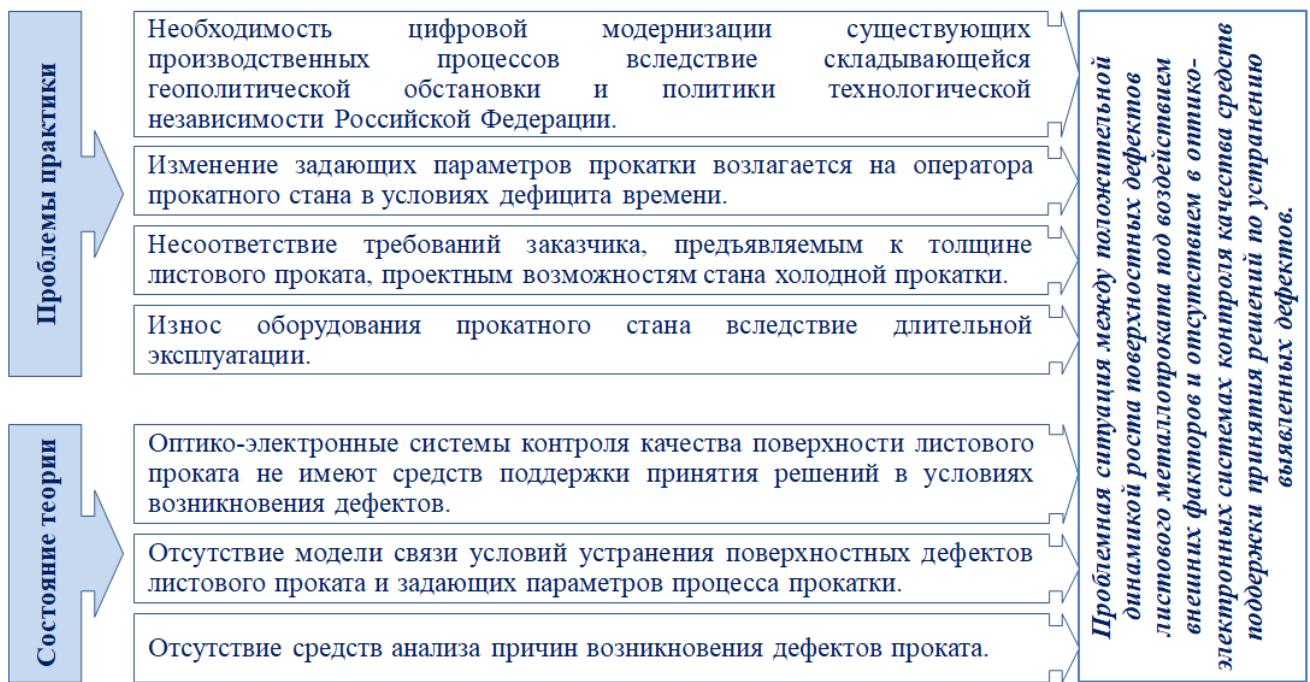


Рисунок 1 – Обоснование проблемной ситуации оптико-электронного контроля качества холодной обработки металла давлением

В соответствии с выявленной проблемой выдвинута гипотеза, согласно которой внедрение СППР по устранению поверхностных дефектов, возникающих в результате воздействия внешних факторов (1), позволит повысить эффективность ОЭСКК поверхности листовых материалов в области холодной обработки металла давлением. Выполнено научное обоснование гипотезы на основе разработанных инструментальных средств исследования закономерностей устранения поверхностных дефектов листового металлопроката.

В соответствии с гипотезой разработана концептуальная модель поддержки принятия решений по устранению дефектов поверхности листового металлопроката (рисунок 2). Используя ресурсы программно-аппаратного обеспечения и средств технического зрения, на основе характеристик листового проката и значений задающих параметров прокатки модель позволяет выполнять подбор коэффициентов корректировки задающих параметров и оценку влияния внешних факторов на качество поверхности проката. Процессы «Регистрация изображения проката», «Обнаружение и классификация дефектов» уже существуют в рамках

автоматизированного контроля качества прокатной продукции с применением ОЭСКК.

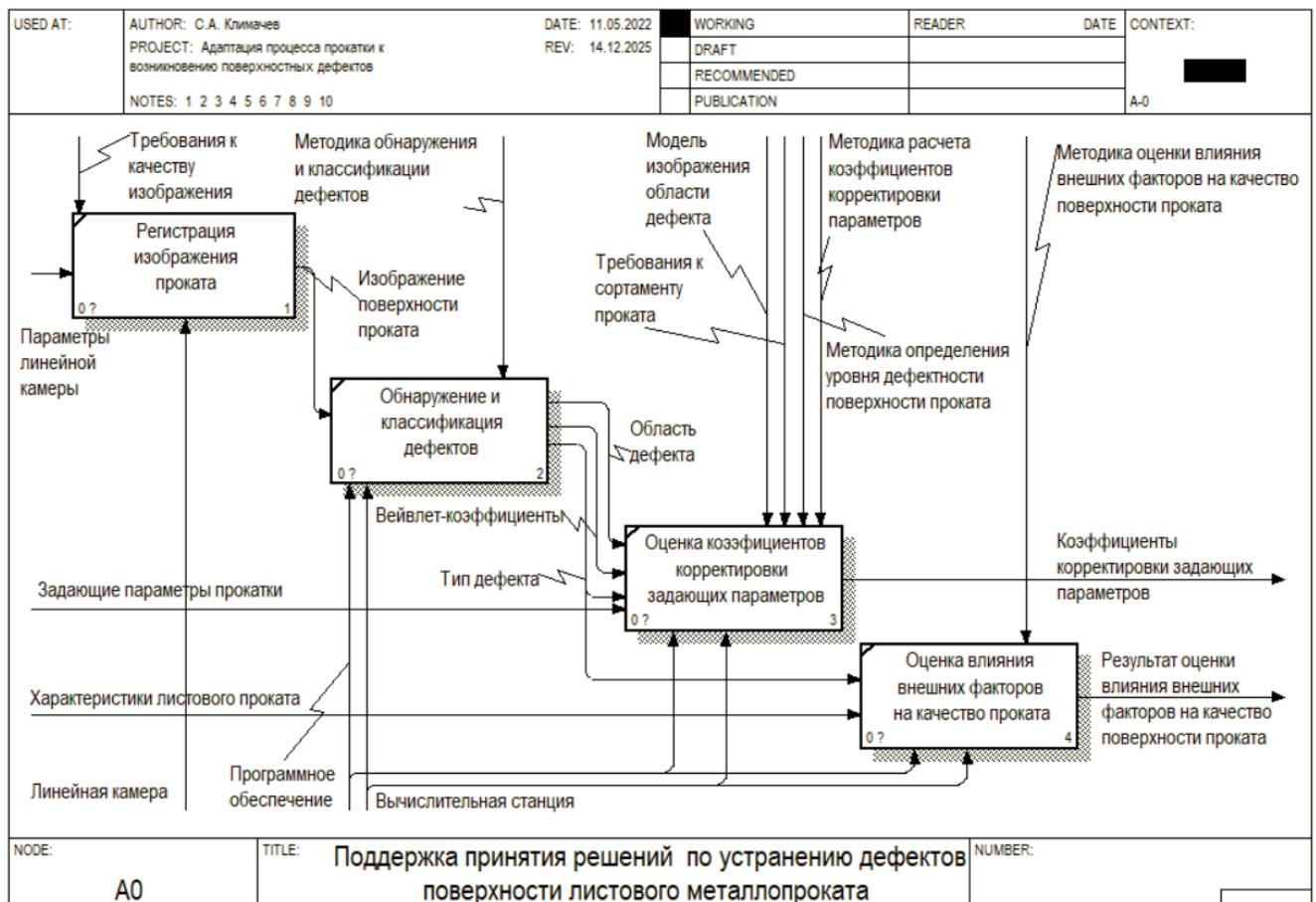


Рисунок 2 – Декомпозиция концептуальной модели поддержки принятия решений

Процессы «Оценка коэффициентов корректировки задающих параметров», «Оценка влияния факторов на качество проката» относятся к разрабатываемым средствам поддержки принятия решений.

Таким образом, решена задача № 1.

Во второй главе разработано специальное математическое и алгоритмическое обеспечение СППР по устранению поверхностных дефектов листового металлопроката.

Для анализа данных, полученных ОЭСКК, средствами поддержки принятия решений разработана модель области дефекта проката на основе признаков изображения поверхности листового материала:

$$Y(t) = \{l, h, P_m, S_m, Q_m, k_{\text{зап.}}, k_{\text{окр.}}, k_{\text{прям.}}, k_{\text{неп.}}, m_I, \sigma_I, mw_z^i, \sigma w_z^i\}(t), \quad (2)$$

где l – длина области дефекта, h – ширина области дефекта, P_m – периметр области дефекта, S_m – площадь области дефекта, Q_m – компактность области дефекта, $k_{\text{зап.}}$ – коэффициент заполнения области дефекта, $k_{\text{окр.}}$ – коэффициент окружности дефекта, $k_{\text{прям.}}$ – коэффициент прямоугольности дефекта, $k_{\text{неп.}}$ – коэф-

фициент отношения периметра дефекта к периметру прямоугольника, описанного вокруг области дефекта, m_I – среднее значение яркости в области дефекта, σ_I – среднеквадратичное отклонение яркости в области дефекта, mw_z^i – средние значения дискретных вейвлет-коэффициентов (ДВК) i -го уровня разложения по z -му направлению преобразования в области дефекта, σw_z^i – среднеквадратичное отклонение ДВК i -го уровня разложения по z -му направлению преобразования в области дефекта.

Для оценки качества поверхности листового материала предложено использовать критерий уровня дефектности, рассчитываемый на основе модели изображения области дефекта (2).

Пусть $Y^{(\mathcal{E})} = \{l, h, P_m, S_m, Q_m, k_{\text{зан.}}, k_{\text{окр.}}, k_{\text{прям.}}, k_{\text{неп.}}, m_I, \sigma_I, mw_z^i, \sigma w_z^i\}^{(\mathcal{E})}$ – модель изображения эталонной поверхности листа проката, на которой отсутствуют дефекты, и $Y^{(\mathcal{D})} = \{l, h, P_m, S_m, Q_m, k_{\text{зан.}}, k_{\text{окр.}}, k_{\text{прям.}}, k_{\text{неп.}}, m_I, \sigma_I, mw_z^i, \sigma w_z^i\}^{(\mathcal{D})}$ – модель области дефекта, который был выявлен ОЭСКК. Тогда отношения $\frac{Y^{(\mathcal{E})}}{Y^{(\mathcal{D})}}$ и $\frac{Y^{(\mathcal{D})}}{Y^{(\mathcal{E})}}$ будут определять координаты начала и конца вектора в n -мерном векторном пространстве, модуль которого будет характеризовать уровень дефектности некоторой области проката и ее отличие от эталонного состояния, выраженное числовым значением. Таким образом, оценка уровня дефектности $L^{d_k}(Y)$ по типу дефекта d_k будет определяться зависимостью:

$$L^{d_k}(Y) = \frac{1}{N} \sum_{j=1}^N \left(\sqrt{\sum_{i=1}^M \left(\frac{y_{ij}^{(\mathcal{D})}}{y_i^{(\mathcal{E})}} - 1 \right)^2} \right), \quad (3)$$

где $y_{ij}^{(\mathcal{D})}$ – значение i -го признака j -ой области дефекта типа d_k , $y_i^{(\mathcal{E})}$ – значение i -го признака модели изображения эталонной поверхности листа, M – количество признаков модели области дефекта, N – количество областей дефекта типа d_k .

Для описания изменения состояний поверхности листового металла в процессе прокатки в условиях воздействия факторов внешней среды (1) разработана модель на основе графа (рисунок 3), каждая вершина S_i которого характеризует состояние поверхности проката и условий, в результате которых оно наступило, в некоторый момент времени t , соответствующий окончанию прогона:

$$S_i(t) = \langle X, X^*, \bar{L}^{d_k}, W \rangle(t),$$

где X – задающие параметры прокатки, X^* – коэффициенты корректировки параметров относительно предыдущих значений, \bar{L}^{d_k} – вектор значений уровней дефектности поверхности листа по каждому выявленному типу дефекта, W – вектор оценок влияния внешних факторов (1) на качество поверхности листового проката.

$$X(t) = \langle h_{\text{вых}}, v_{\text{вых}} \rangle(t),$$

где $h_{\text{вых}}$ – задающее значение толщины ленты проката на выходе из клети, где $v_{\text{вых}}$ – задающее значение скорости прокатки на выходе из клети.

$$X^*(t) = \langle h^*, v^* \rangle(t), \quad (4)$$

где h^* – коэффициент изменения толщины ленты проката, равный отношению нового значения толщины h_{new} к предыдущему h_{prev} ; v^* – коэффициент изменения скорости прокатки на выходе из клети, равный отношению нового значения скорости v_{new} к предыдущему v_{prev} .

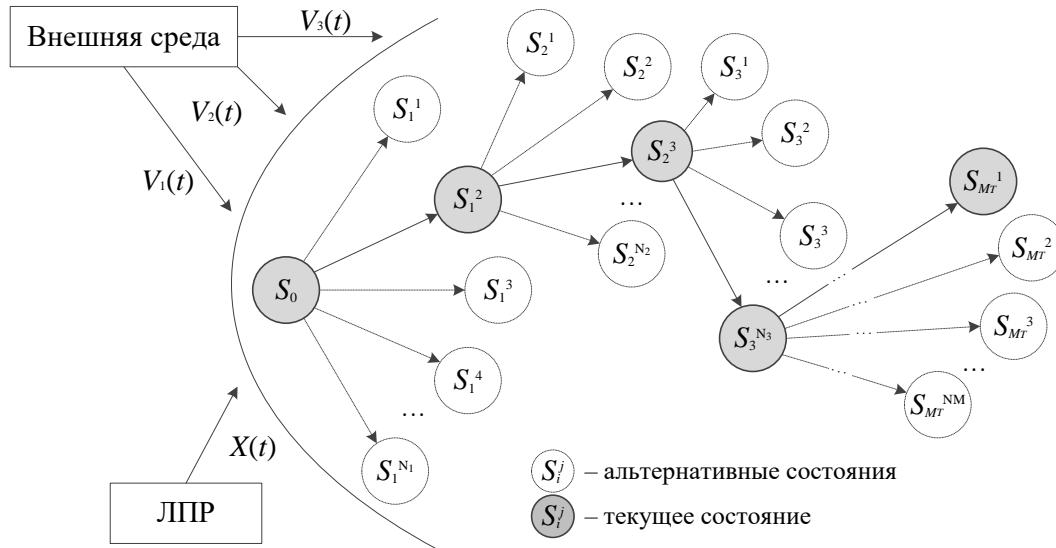


Рисунок 3 – Граф изменения состояний поверхности листового материала в процессе холодной обработки металла давлением

Определена целевая функция поддержки принятия решений. Учитывая, что ряд поверхностных дефектов может быть устранен в процессе прокатки, изменение задающих параметров прокатки необходимо осуществлять таким образом, чтобы при стремлении количества прогонов и соответствующих им состояний S_i к некоторому заданному значению M_T было достигнуто конечное состояние, характеризующееся требуемой толщиной $h_{\text{раб}}$ проката и минимальным уровнем дефектности (3) по каждому типу дефектов:

$$\begin{cases} S_i : h_{\text{вых}} = h_{\text{раб}}, L^{d_k}(Y) \rightarrow \min \\ i \rightarrow M_T \\ X^* = f(A, Y, W) \end{cases}, \quad (5)$$

где $f(A, Y, W)$ – алгоритм определения наилучшего вектора X^* коэффициентов корректировки задающих параметров прокатки из множества альтернатив A для текущих показателей качества Y поверхности листового проката, формирующихся под влиянием W внешних факторов V .

Разработана методика поддержки принятия решений по устранению дефектов поверхности листового материала при холодной обработке металла давлением. Методика включает семь основных этапов, подразумевающих обработку данных как существующей ОЭСКК (этапы 1, 2), так и средствами интеллектуальной поддержки решений, разработанными в результате исследования (этапы 3-7).

Этап 1. Преобразование изображений. Формируется модельное представление цифровых изображений поверхности листа на основе полученных оценок детализирующих вейвлет-коэффициентов разложения изображения проката.

Этап 2. Выделение областей возможных дефектов и их классификация.

Этап 3. Формирование модельного описания областей дефектов на основе признаков изображений поверхности листа.

Этап 4. Оценка уровней дефектности поверхности листа по каждому выявленному типу дефекта.

Этап 5. Оценка коэффициентов корректировки значений задающих параметров прокатки для устранимых типов дефектов.

Этап 6. Оценка влияния внешних факторов на качество поверхности листа.

Этап 7. Формирование рекомендаций для ЛПР (оператора стана) по устранению дефектов поверхности в виде коэффициентов коррекции X^* исходных технологических параметров.

Алгоритм оценки коэффициентов корректировки значений задающих параметров прокатки для устранимых типов дефектов.

Шаг 1. Предобработка данных областей дефектов. Для каждого типа дефекта d_k вычисляется среднее значение признаков $\bar{Y}^{d_k} = \{\bar{y}_1, \bar{y}_2, \dots, \bar{y}_M\} = \left\{ \frac{1}{N} \sum_{j=1}^N \frac{y_i^{(d)}}{y_i^{(\Theta)}} \right\}$ всех его областей, и формируется вектор оценки типа дефекта $P^{d_k} = \left\{ d_k, L^{d_k}, \frac{L^{d_k}}{L}, \bar{Y}^{d_k} \right\}$.

Шаг 2. Формирование множества альтернатив коэффициентов корректировки задающих параметров прокатки. Векторы P^{d_k} подаются на вход вероятностной нейронной сети, суммирующий слой которой составляют пары коэффициентов корректировки параметров (4). Учитывая усредненный способ формирования входных данных, для каждого вектора, подаваемого на вход, выбираются те выходные значения нейронной сети, вероятность которых превышает среднее значение вероятности элементов суммирующего слоя. Выбранные пары составляют множество допустимых альтернатив $A = \{X_1^*, X_2^*, \dots, X_O^*\}$ коэффициентов корректировки.

Шаг 3. Оценка корректировки. Формируется матрица оценки влияния коэффициентов X_l^* на выявленные типы дефектов d_k :

$$\begin{pmatrix} X_1^* & X_1^* & X_1^* & X_1^* & X_2^* & X_2^* & X_2^* & \dots & X_O^* & X_O^* & X_O^* & X_O^* \\ P^{d_1} & P^{d_2} & \dots & P^{d_K} & P^{d_1} & P^{d_2} & \dots & P^{d_K} & \dots & P^{d_1} & P^{d_2} & \dots & P^{d_K} \\ L^{d_{11}} & L^{d_{12}} & \dots & L^{d_{1K}} & L^{d_{21}} & L^{d_{22}} & \dots & L^{d_{2K}} & \dots & L^{d_{O1}} & L^{d_{O2}} & \dots & L^{d_{OK}} \end{pmatrix}, \quad (6)$$

где $L^{d_{lk}}$ – прогнозное значение уровня дефектности, к которому приведет изменение задающих параметров прокатки в соответствии с корректировкой X_l^* при выявленных типах дефектов, описываемых векторами P^{d_k} .

Оценка альтернатив коэффициентов корректировки параметров прокатки осуществлялась с применением метода классификации на основе случайного леса. Алгоритм основан на отнесении входного вектора P^{d_k} к одному из двенадцати кластеров значений уровней дефектности. Оценочным значением при этом является центр кластера, к которому был отнесен объект, характеризующий тип дефекта и коэффициенты корректировки.

Шаг 4. Установление соответствия между коэффициентами корректировки задающих параметров прокатки и возможными уровнями дефектности поверхности листа. Матрица (6) преобразуется к виду:

$$L^* = \begin{pmatrix} (L^{d_1}, L^{d_2}, \dots, L^{d_K})_{X_1^*} \\ (L^{d_1}, L^{d_2}, \dots, L^{d_K})_{X_2^*} \\ \dots \\ (L^{d_1}, L^{d_2}, \dots, L^{d_K})_{X_O^*} \end{pmatrix}. \quad (7)$$

Шаг 5. Предварительный отбор коэффициентов корректировки задающих технологических параметров. На основе множества векторов (7) выполняется построение Парето-оптимального множества $P(L^*)$, элементы которого удовлетворяют критерию уровня дефектности проката.

Шаг 6. Выделение наилучшей альтернативы уровней дефектности и соответствующих ей коэффициентов корректировки X_l^* . Выполняется сужение множества $P(L^*)$ в соответствии с целью (5).

Вектор $L_p^* \in L^*$ называется оптимальным по Парето, если не существует такого возможного вектора $L_{X_l^*}^* \in L^*$, для которого $L_{X_l^*}^* \geq L_p^*$. Множество L^* будет Парето-оптимальным, если выполняется условие:

$$P(L^*) = \{L_p \in L^* \mid \exists L_{X_l^*}^* \in L^*, L_{X_l^*}^* \geq L_p\}.$$

Алгоритм построения Парето-оптимального множества альтернатив коэффициентов корректировки задающих параметров прокатки.

Шаг 1. Положить $P(L^*) = L^*$, $i=1$, $j=2$ (в начале алгоритма текущее множество Парето-оптимальных векторов совпадает с множеством L^* , где i – номер текущего элемента Парето-оптимального множества, j – номер текущего элемента исходного множества).

Шаг 2. Если $L_{X_i^*}^* \leq L_{X_j^*}^*$, перейти к шагу 3, в противном случае – к шагу 5.

Шаг 3. Удалить из текущего множества векторов $P(L^*)$ вектор $L_{X_j^*}^*$, перейти к шагу 4.

Шаг 4. Если $j < O$, перейти к рассмотрению следующего вектора: $j=j+1$ и вернуться к шагу 2. В противном случае – перейти к шагу 7.

Шаг 5. Если $L_{X_i^*}^* \geq L_{X_j^*}^*$, перейти к шагу 6, в противном случае – вектора несравнимы, вернуться к шагу 4.

Шаг 6. Удалить из текущего множества векторов $P(L^*)$ вектор $L_{x_i^*}$, перейти к шагу 7.

Шаг 7. Если $i < R-1$, последовательно увеличить i и j : $i=i+1$, $j=j+1$. После этого вернуться к шагу 2. В противном случае Парето-оптимальное множество альтернатив построено полностью.

Ввиду того, что полученное множество альтернатив может быть достаточно широким, выбирается такая альтернатива, при которой разница между допустимым изменением задающего значения толщины листа проката kh и соответствующим альтернативе коэффициентом h^* будет стремиться к нулю, где kh определяется выражением:

$$kh = \begin{cases} \frac{h_{\text{макс}} - h_{\text{текущ}}}{M_T - i}, & \text{если } h_{\text{текущ}} \leq kh_{\text{макс}} \\ kh_{\text{макс}}, & \text{в противном случае} \end{cases},$$

и $kh_{\text{макс}}$ – предельно допустимое изменение толщины листа проката, i – номер состояния S_i .

Алгоритм оценки влияния внешних факторов на качество поверхности листа.

Для оценки степени влияния факторов (1) в работе использован модифицированный метод многокритериального выбора с различным числом альтернатив под критериями с использованием продукционных правил для сравнения альтернатив. В качестве альтернатив приняты внешние факторы (1), критериями выступают: K_1 – тип дефекта «риска», K_2 – тип дефекта «царапина», K_3 – тип дефекта «накол», K_4 – тип дефекта «отпечатки», K_5 – тип дефекта «раскатанная трещина», K_6 – тип дефекта «прокатная пленка», K_7 – тип дефекта «полосы нагартовки», K_8 – периодичность дефекта, K_9 – продольная разнотолщинность полосы, K_{10} – нарушение плоскостности полосы.

Шаг 1. Построение матрицы парных сравнений дефектов X .

Шаг 2. Установление взаимосвязи между внешними факторами $\{V_1, V_2, V_3\}$ и множеством типов дефектов $\{d_1, d_2, \dots, d_S\}$: построение матрицы B , такой что, если фактор V_i оценивается по дефекту d_j , то $b_{ij} = 1$, иначе $b_{ij} = 0$:

$$B = \begin{bmatrix} b_{11} & b_{12} & \dots & b_{1S} \\ b_{21} & b_{22} & \dots & b_{2S} \\ b_{31} & b_{32} & \dots & b_{3S} \end{bmatrix}.$$

Шаг 3. Оценка факторов воздействия внешней среды по дефектам: на основе продукционных правил с учетом матрицы B по методу парного сравнения строится матрица AD :

$$AD = \begin{bmatrix} a_{11} & a_{12} & \dots & a_{1S} \\ a_{21} & a_{22} & \dots & a_{2S} \\ a_{31} & a_{32} & \dots & a_{3S} \end{bmatrix},$$

где оценки $\{a_{ij}\}$ представляют векторы приоритетов факторов V_i относительно дефекта d_j . Если фактор V_i не оценивается по дефекту d_j , то $a_{ij}=0$.

Шаг 4. Обработка матрицы парных сравнений дефектов X , построение нормированного вектора приоритетов дефектов \bar{X} .

Шаг 5. Формирование матрицы L :

$$L = \begin{bmatrix} R_1/N_R & 0 & \dots & 0 \\ 0 & R_2/N_R & \dots & 0 \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ 0 & 0 & \dots & R_S/N_R \end{bmatrix},$$

где R_j – число факторов V_i , оцениваемых по дефекту d_j , $N_R = \sum_{j=1}^S R_j$ – суммарное число факторов, оцениваемых по всем дефектам.

Шаг 6. Рассчитывается оценка влияния внешних факторов на качество поверхности листа: определяется вектор $W = AD \cdot L \cdot \bar{X} \cdot B$, где матрица B предназначена для окончательного нормирования значений вектора W .

Таким образом, решена задача № 2.

В третьей главе разработан прототип программного средства интеллектуальной поддержки принятия решений (рисунок 4) в ОЭСКК.

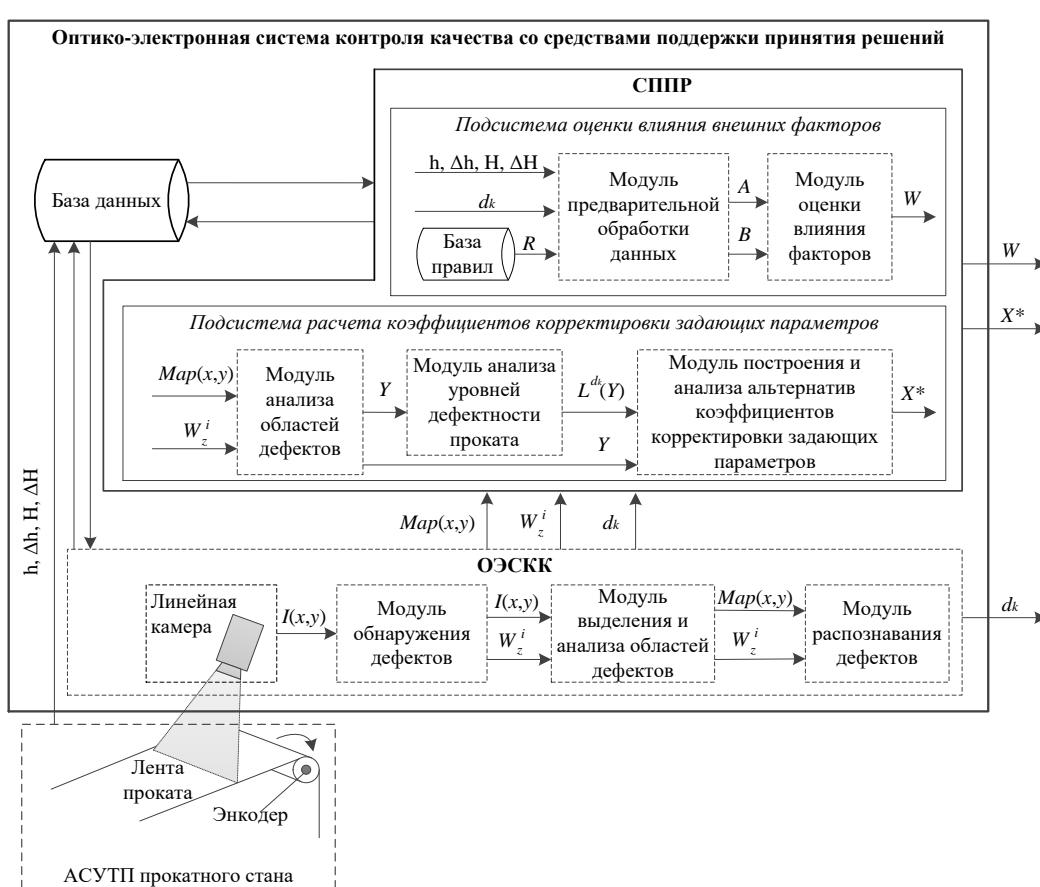


Рисунок 4 – Схема ОЭСКК со средствами интеллектуальной поддержки принятия решений

СППР обрабатывают данные ОЭСКК и АСУТП прокатного стана, вырабатывая рекомендации ЛПР по устранению выявленных дефектов поверхности листового металлопроката.

Таким образом, решена задача № 3.

В четвертой главе приведены результаты экспериментального исследования разработанных решений. Исследования (рисунок 5) проводились с применением среды SimInTech на основе имитационной модели процесса прокатки с учетом данных и рекомендаций по корректировке задающих параметров, полученных на производстве.

Дефекты трех типов возникают случайным образом и регистрируются модулем, имитирующим ОЭСКК. Для каждого выявленного таким образом дефекта формируется вектор признаков изображения области дефекта и через интерфейс вывода данных сохраняется в файловом буфере. Модули СППР считывают информацию из буфера, выполняют анализ и по завершении имитационной моделью режима прокатки вырабатывают рекомендации по изменению задающего параметра скорости.

Для анализа эффективности СППР использованы оценки математического ожидания \bar{m} и дисперсии S^2 количества дефектов на завершающем пропуске ленты при достижении требуемой толщины проката (таблица 1).

Таблица 1 – Оценки результатов имитационного эксперимента

Оценка	ОЭСКК			ОЭСКК с СППР		
	Отпечатки	Царапина	Риска	Отпечатки	Царапина	Риска
\bar{m}	3,4	4,9	3,3	1,6	2,1	1,4
S^2	25,6	14,3	9,8	7,2	2,3	1,6
S	5,1	3,8	3,1	2,7	1,5	1,3

Согласно полученным результатам, использование СППР в ОЭСКК может уменьшить среднее количество дефектов типа «отпечатки» на 47%, «царапина» – на 43%, «риска» - на 42%.

Таким образом, решена задача № 4.

В заключении подведены результаты работы и предложены направления дальнейших исследований.

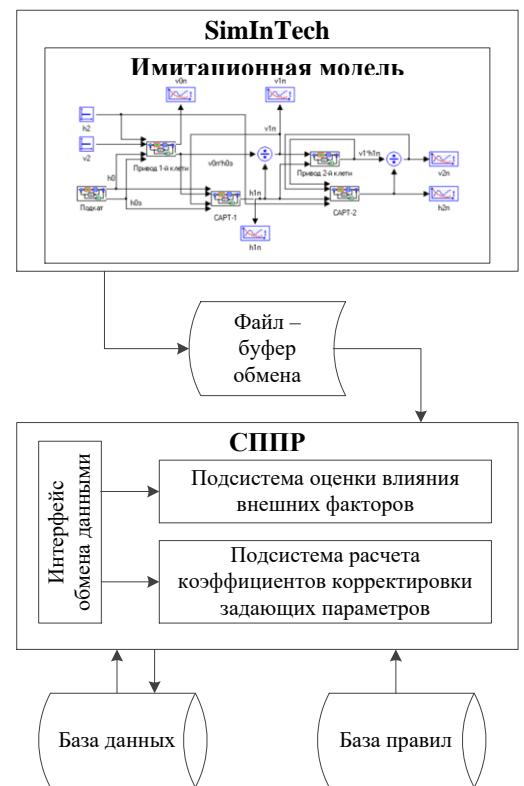


Рисунок 5 – Схема

проведения эксперимента

–

Схема

ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ РАБОТЫ

В диссертационной работе решена важная научная задача развития знаний в области поддержки принятия решений по управлению процессом устранения дефектов поверхности листового металлопроката на основе анализа графической информации и статистических данных.

Основными результатами научных исследований являются:

1. Выделены факторы внешней среды, оказывающие влияние на качество поверхности листового проката в процессе прокатки. Выполнено научное обоснование необходимости внедрения СППР в ОЭСКК на основе использования инструментальных средств исследования закономерностей устранения поверхностных дефектов листового металлопроката. Разработана концептуальная модель поддержки принятия решений по устранению дефектов поверхности листовых материалов на основе контура управления технической системой с ОЭСКК.

2. Разработано специальное математическое и алгоритмическое обеспечение СППР по управлению процессом устранения дефектов проката: модель области дефекта проката на основе признаков изображения поверхности листового металла; модель изменения состояний поверхности листового металла в процессе прокатки с учетом воздействия факторов, оказывающих влияние на качество поверхности проката; методика поддержки принятия решений по устранению дефектов поверхности листового металлопроката; алгоритм оценки уровня дефектности листового проката на основе анализа изображений поверхности; алгоритм расчета коэффициентов корректировки значений задающих параметров прокатки для устранимых типов дефектов; алгоритм построения Парето-оптимального множества альтернатив коэффициентов корректировки задающих параметров прокатки на основе векторов уровней дефектности поверхности проката; алгоритм расчета оценки влияния внешних факторов на качество поверхности листового проката.

3. Разработано программно-информационное обеспечение СППР в ОЭСКК по устранению дефектов листового металлопроката.

4. Выполнены экспериментальные исследования разработанного математического, алгоритмического, программно-информационного обеспечения и оценена их эффективность: использование СППР в ОЭСКК может уменьшить среднее количество дефектов типа «отпечатки» на 47%, «щарапина» – на 43%, «риска» – на 42%.

ОСНОВНЫЕ ПУБЛИКАЦИИ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

Публикации в рецензируемых научных изданиях из «Перечня...» ВАК

1. Климачев, С. А. Интеллектуальная поддержка принятия решений по устранению дефектов поверхности листового проката / С. А. Климачев, Н. А. Соловьев // Программные продукты и системы. – 2025. – № 38 (3). – С. 513-523.
2. Климачев, С. А. Методика принятия решений на основе компьютерного зрения и выбора Парето-оптимальной альтернативы технологических параметров

производства / С. А. Климачев, Н. А. Соловьев // Информационные технологии. – 2023. – № 7 (29). – С. 382-388.

3. Соловьев, Н. А. Инструментарий исследования закономерностей устранения поверхностных дефектов тонколистового металлопроката / Н. А. Соловьев, С. А. Климачев // Научно-технический вестник Поволжья. – 2020. – № 12. – С. 133-136.

Публикации в прочих рецензируемых научных изданиях

4. Климачев, С. А. Оптико-электронная система контроля качества листового металлопроката со средствами интеллектуальной поддержки решений по устранению дефектов в процессе производства / С. А. Климачев // Математическое и программное обеспечение систем в промышленной и социальной сферах. – 2025. – Т.13. – № 1. – С. 26-30.

5. Соловьев, Н. А. Системный анализ проблем производства тонколистового проката цветных металлов / Н. А. Соловьев, С. А. Климачев // Вестник Воронежского института высоких технологий. – 2019. – №1 (28). – С. 20-22.

Свидетельства о государственной регистрации программ для ЭВМ

6. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2024669093 Российской Федерации. Программное средство поддержки принятия решений по управлению процессом устранения дефектов листового проката : № 2024667956/69 : заявл. 25.07.2024 : опубл. 14.08.2024 / С. А. Климачев ; заявитель Климачев Сергей Александрович.

Статьи, материалы и тезисы докладов, опубликованных в трудах международных и всероссийских конференций

7. Климачев, С. А. Корректировка параметров технологического процесса прокатки в условиях воздействия факторов внешней среды / С. А. Климачев // Актуальные проблемы современной науки, техники и образования: тезисы докладов 83-й международной научно-технической конференции. Т. 2. – Магнитогорск: Изд-во Магнитогорск. гос. техн. ун-та им. Г.И. Носова. – 2025. – С. 84.

8. Климачев, С. А. Использование системы поддержки принятия решений для адаптации процесса прокатки листового металла к воздействиям внешней среды. / С. А. Климачев // Программное обеспечение для цифровизации предприятий и организаций: сборник трудов II Всероссийской научно-практической конференции, 1-2 июля 2024 г., Магнитогорск. – Магнитогорск: Изд-во Магнитогорск. гос. техн. ун-та им. Г.И. Носова. – 2024. – С. 50-53.

9. Климачев, С. А. Методика поддержки принятия решений по коррекции параметров технологического процесса листового металлопроката / С. А. Климачев // Актуальные проблемы современной науки, техники и образования: тезисы докладов 82-й международной научно-технической конференции. Т. 2. – Магнитогорск: Изд-во Магнитогорск. гос. техн. ун-та им. Г.И. Носова. – 2024. – С. 137. – 1 с.

10. Климачев, С. А. Система поддержки принятия решений по управлению процессом устранения дефектов ленты проката / С. А. Климачев // Электронные

средства и системы управления : материалы докл. XIX Междунар. науч.-практ. конф., Томск, 15-17 нояб. 2023 г. / Том. гос. ун-т систем упр. и радиоэлектроники. – Томск: В-Спектр. – 2023. – Ч. 2. – С. 152-154.

11. **Климачев, С. А.** Модели и алгоритмы интеллектуальной поддержки принятия решений при управлении процессом устранения дефектов тонколистового проката / С. А. Климачев, Н. А. Соловьев // Современные научно-исследовательские и технологические аспекты программной инженерии : материалы Всероссийской научно-технической конференции . 14 - 15 сентября 2023 г. / Под общей ред. Соловьева Н. А, Горбачева Д. В.; Оренбургский гос. ун-т. – Оренбург: ОГУ. – 2023. – С. 147-150.

12. **Климачев, С. А.** Адаптация процесса прокатки листового металла в условиях возникновения поверхностных дефектов на основе совершенствования АСУТП прокатного стана / С. А. Климачев // Сборник выбранных статей научной сессии ТУСУР : по материалам Междунар. науч.-техн. конф. студентов, аспирантов и молодых ученых «Научная сессия ТУСУР-2022», 18-20 мая 2022 г., г. Томск / Том. гос. ун-т систем упр. – Томск: В-Спектр, 2022. – Ч. 2. – С. 48-51.

13. **Климачев, С. А.** Классификация поверхностных дефектов листового металлопроката на основе случайного леса / С. А. Климачев, Н. А. Соловьев // Наука и образование – 2021 : материалы Всерос. науч.-практ. конф., Мурманск, 1 декабря 2021 г. / Мурм. гос. техн. ун-т. – Мурманск : Изд-во МГТУ. – 2022. – С. 54-56.

14. **Климачев, С. А.** Имитационная модель системы авторегулирования толщины АСУТП прокатного стана / С. А. Климачев, Н. А. Соловьев // Инженерные технологии: традиции, инновации, векторы развития : сб. материалов VI Всерос. науч.-практ. конф. с междунар. участием, 11-13 нояб. 2020 г., Абакан / Федер. гос. бюджет. образоват. учреждение высш. образования «Хакас. гос. ун-т им. Н. Ф. Катанова – Абакан : Изд-во Хакас. гос. ун-т им. Н. Ф. Катанова. – 2020. – С. 23-24.

15. Соловьев, Н. А. Концепция совершенствования АСУТП прокатного стана на основе компьютерного зрения / Н. А. Соловьев, С. А. Климачев // Университетская наука: решения и инновации : материалы Всерос. науч.-практ. конф., 23-25 окт. 2018 г., Оренбург / Федер. гос. бюджет. образоват. учреждение высш. образования «Оренбургский гос. ун-т». – Оренбург : ОГУ. – 2018. – С. 78-81.

Подписано в печать «26» декабря 2025 г.

Формат 60×90/16. Объем – 1,0 усл. печ. л.

Тираж 100 экз. Заказ № 161386.

Отпечатано в типографии «Цифра»

460018, г. Оренбург, просп. Победы, д. 11, офис 1