

СТАТЬИ

УДК 681.518.5

DOI

**АЛГОРИТМ КЛАССИФИКАЦИИ ЧАСТИЦ ФИЗИЧЕСКОЙ
МОДЕЛИ ПЕЧИ КИПЯЩЕГО СЛОЯ ПО КРУПНОСТИ
С ПРЕДВАРИТЕЛЬНОЙ ЦВЕТОВОЙ МАРКИРОВКОЙ ЧАСТИЦ
НА ОСНОВЕ ТЕХНОЛОГИИ ТЕХНИЧЕСКОГО ЗРЕНИЯ****Булатов В.В.**

*Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования
«Санкт-Петербургский государственный университет аэрокосмического приборостроения»,
Санкт-Петербург, Российская Федерация, e-mail: bulatov-vitaly@yandex.ru*

Данное исследование связано с автоматизацией процесса измерений частиц модели печи кипящего слоя. Цель исследования – разработка алгоритма, который позволит оценить крупность частиц физической модели печи кипящего слоя на основе технологии технического зрения. В статье проведен анализ отечественных источников, которые посвящены актуальности исследования процессов в печах кипящего слоя. Рассмотрены примеры применения оптических методов контроля для оценки технологических параметров на промышленных предприятиях. Центральное место в обзоре литературных источников заняли работы, исследующие возможности применения систем технического зрения в металлургии. По результатам анализа литературы не было найдено исследований по рассматриваемому вопросу. Оценка крупности частиц проводилась на базе лабораторного комплекса, включающего: камеру технического зрения, ЭВМ и модель печи, имитирующую процесс окислительного обжига. В качестве объектов контроля использовались пенополистироловые шарики, которые были маркированы красным, желтым и синим цветом. Каждый цвет соответствовал группе крупности – большие, средние и малые. Алгоритм классификации частиц по крупности был реализован в программном комплексе LabVIEW. Разработанная программа включает обработку выборки изображений (бинаризация, фильтрация от шумов) и подсчет количества частиц каждой группы крупности с выводом результатов на отдельные окна. Результаты исследования планируется использовать для моделирования популяционного баланса агломератов. Настоящее исследование может найти практическое применение в образовательном процессе при изучении студентами курсов, связанных с автоматизацией измерений.

Ключевые слова: печь кипящего слоя, система технического зрения, классификация частиц, LabVIEW, модель баланса

**AN ALGORITHM FOR CLASSIFICATION OF PARTICLES
OF A PHYSICAL MODEL OF A FLUID BED FURNACE
BY SIZE WITH PRELIMINARY COLOR MARKING
OF PARTICLES BASED ON MACHINE VISION TECHNOLOGY****Bulatov V.V.**

*Federal State Autonomous Educational Institution of Higher Education
«Saint Petersburg State University of Aerospace Instrumentation»,
Saint Petersburg, Russian Federation, e-mail: bulatov-vitaly@yandex.ru*

This study focuses on the automation of particle size measurements for a fluidized bed furnace model. The objective of the work is to develop an algorithm for estimating the particle size of a physical model of a fluidized bed furnace using machine vision technology. This article analyzes domestic sources devoted to the relevance of studying processes in fluidized bed furnaces. Examples of the application of optical inspection methods to assess process parameters at industrial enterprises are discussed. The literature review focused on studies exploring the potential application of machine vision systems in metallurgy. The literature review revealed no studies on this topic. Particle size assessment was performed using a laboratory complex consisting of a machine vision camera, a computer, and a furnace model simulating the oxidative roasting process. Polystyrene foam balls, marked red, yellow, and blue, were used as test objects. Each color corresponded to a particle size group: large, medium, and small. The particle size classification algorithm was implemented in the LabVIEW software package. The developed program includes image sample processing (binarization, noise filtering) and particle counting for each size group, with the results displayed in separate windows. The study's results are planned to be used to model the population balance of agglomerates. This research may find practical application in educational programs for students studying courses related to measurement automation.

Keywords: fluidized bed furnace, machine vision system, particle classification, LabVIEW, balance model

Введение

Цинк – это один из стратегически важных металлов в современной российской промышленности. Приблизительно 50% мирового производства цинка расходуется

на цинкование для реализации защиты стальных деталей и изделий от коррозии.

Для получения цинка в основном используют сфалерит (ZnS). Гидрометаллургическая переработка цинковых концентрата

тов начинается с операции окислительного обжига, проводимой в печах кипящего слоя.

В печи кипящего слоя (КС) сыпучий материал взаимодействует с проходящим через него нагретым газовым потоком, интенсивно перемещающим твердые частицы в так называемом кипящем слое. Нагрев печи кипящего слоя осуществляют путем сжигания топлива непосредственно в слое или в выносных топках под газораспределительным устройством [1, с. 63]. Данная технология позволяет достигать высокой степени извлечения цинка (до 98 %).

Конструкция печи кипящего слоя, принципы работы и основные преимущества данной технологии получения цинка рассмотрены в [2–4].

По данному направлению был проведен ряд исследований. Так, в работе [5] предложена математическая модель, которая описывает переходные процессы в печи кипящего слоя, что дает возможность определить зависимость температуры слоя и концентрации горючих веществ от расхода шихты.

В статье [6] авторами проанализированы зависимости качественных показателей обжига в печах кипящего слоя. Были идентифицированы ключевые параметры, влияющие на процесс, и предложена методика расчета расхода огарка на основе температуры продукта на выходе из печи.

Данные работы подтверждают актуальность исследования процессов, протекающих в печах кипящего слоя.

Внедрение систем технического зрения (СТЗ) при контроле технологических параметров в металлургии представлено в ряде статей. В этих исследованиях рассматриваются различные задачи: управление процессом производства алюминия в электролизерах [7], слежение за траекторией движения расплава в индукторе [8], детектирование дефектов грузоподъемных канатов металлургического оборудования [9–11]. В работе [12] поднимается вопрос применения СТЗ для обнаружения и классификации дефектов прокатного происхождения на торцах труб. В [13] предложена методика выявления дефекта «плена» отожженного и оцинкованного стального проката на базе технологии технического зрения. Патент [14] описывает модульное применение СТЗ и ультразвукового контроля для выявления дефектов листовых материалов. В статье [15] разработан программный комплекс для системы технического зрения, предназначенный для мониторинга и оценки технологических параметров процесса обжига во вращающихся цементных печах.

Вопрос классификации частиц руды в объеме рабочего псевдоожиженного слоя печи кипящего слоя с применением технологии технического зрения не нашел широкого рассмотрения в отечественной литературе.

Данная работа является логическим продолжением автора исследования, проведенного в 2024 г. [1].

Цель исследования – разработка алгоритма, который позволит оценить крупность частиц физической модели печи кипящего слоя на основе технологии технического зрения.

Материалы и методы исследования

Как показано в статье [1], гранулометрический состав цинкового концентрата является критически важным параметром для эффективной работы псевдоожиженного слоя.

Проведем исследования гранулометрического состава на базе физической модели печи кипящего слоя. В процессе исследования будет использована известная установка, имитирующая процесс окислительного обжига [1, рис. 1]. Основными элементами установки являются:

1. Физическая модель печи кипящего слоя.
2. Камера технического зрения (Basler acA640-120gc).
3. Объектив Ricoh FL-CC2514-2M ($f = 25 \text{ mm}$, C-mount, $bf = 11,5 \text{ mm}$).
4. ЭВМ с прикладным программным обеспечением для обработки изображений (LabVIEW).

Результаты исследования и их обсуждение

На начальном этапе пенополистироловые шарики были подразделены на три группы крупности: крупные, средние и мелкие. Каждая группа в последующем была покрашена в определенный цвет. Цветовая маркировка, размеры и количество частиц, которые участвуют в эксперименте, отражены в таблице.

Соответствие цвета, количества и размеров частиц

Цвет частицы	Реальный размер, мм	Количество частиц в объеме всей печи, шт.
Красный	6–10	35
Желтый	3–6	35
Синий	1–3	40

Источник: составлено автором.

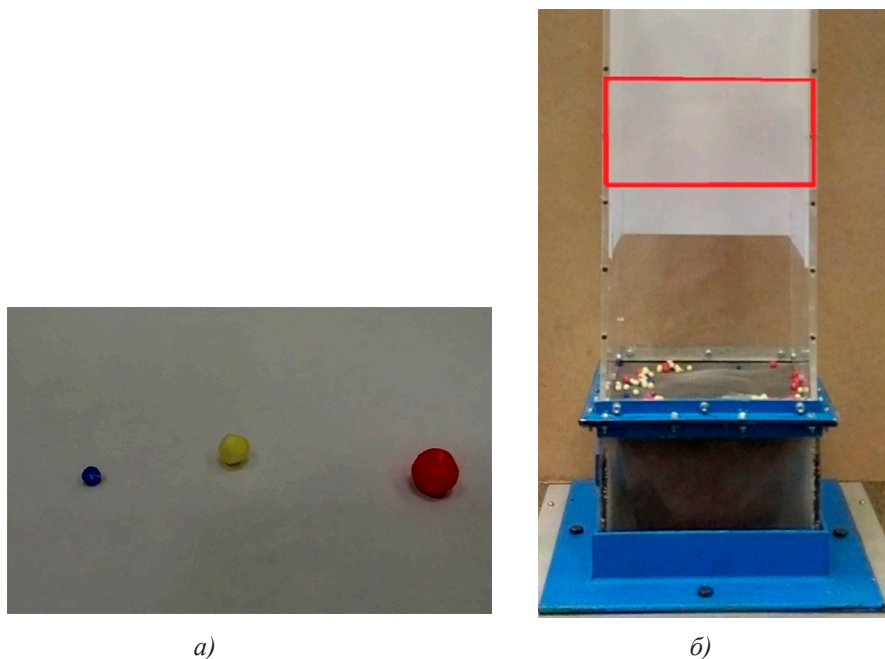


Рис. 1. а) частицы с цветовой маркировкой;
б) рабочая зона анализа частиц печи кипящего слоя
Источник: составлено автором

На следующем этапе все частицы были помещены в физическую модель печи кипящего слоя, где путем регулирования производительности вентилятора устанавливался оптимальный расход псевдоожижающего агента.

После стабилизации псевдоожиженного слоя частиц в физической модели печи кипящего слоя была выполнена съемка серии изображений для последующего анализа.

Внешний вид частиц представлен на рис. 1, а. При помощи предпросмотра с камеры была выбрана зона печи, где будет осуществляться съемка (на рис. 1, б, рабочая зона отмечена красным прямоугольником).

Далее, была разработана блок-схема алгоритма классификации частиц по цветовой маркировке (рис. 2). В начале необходимо получить изображение частиц в кипящем слое физической модели печи. На следующем этапе из одного исходного изображения будет получено три вторичных бинарных изображения за счет ограничения значений по цветовым каналам (RGB) в соответствии с интервалами цветовых каналов для частиц определенной группы крупности. Далее осуществляется фильтрация изображений с целью удаления шумов и отделения частиц, которые наложился друг на друга на изображении.

Затем количество частиц определяется по их площади [1]. Это позволяет исключить из подсчета слишком мелкие частицы, которые могли образоваться в резуль-

тате процедуры разделения изображений частиц.

Алгоритм оценки крупности по цветовой маркировке был программно реализован в среде LabVIEW. Для обработки изображений использовался пакет IMAQ Vision (рис. 3).

Рисунок 4 иллюстрирует распределение частиц по классам, полученное в результате применения алгоритма с предварительной цветовой маркировкой.

Результаты эксперимента, представленные на рис. 5, отображают изменение распределения частиц по фракциям (мелкой, средней, крупной) в процессе проведения опыта.

Графические зависимости отображают классификацию частиц в псевдоожиженном слое (сегрегация частиц). Количество более крупных частиц уменьшается к концу эксперимента, оседая ближе к низу слоя. Количество средних частиц остается примерно неизменным, а число мелких частиц уменьшается и наблюдается активный пылевынос.

К достоинствам алгоритма классификации по крупности для маркированных частиц можно отнести то, что данный метод подходит для исследования большого количества частиц в объеме, а использование отдельных фильтров для каждой группы частиц повышает вероятность точного распознавания объекта на изображении.



Рис. 2. Алгоритм оценки крупности по предварительной цветовой маркировке
Источник: составлено автором

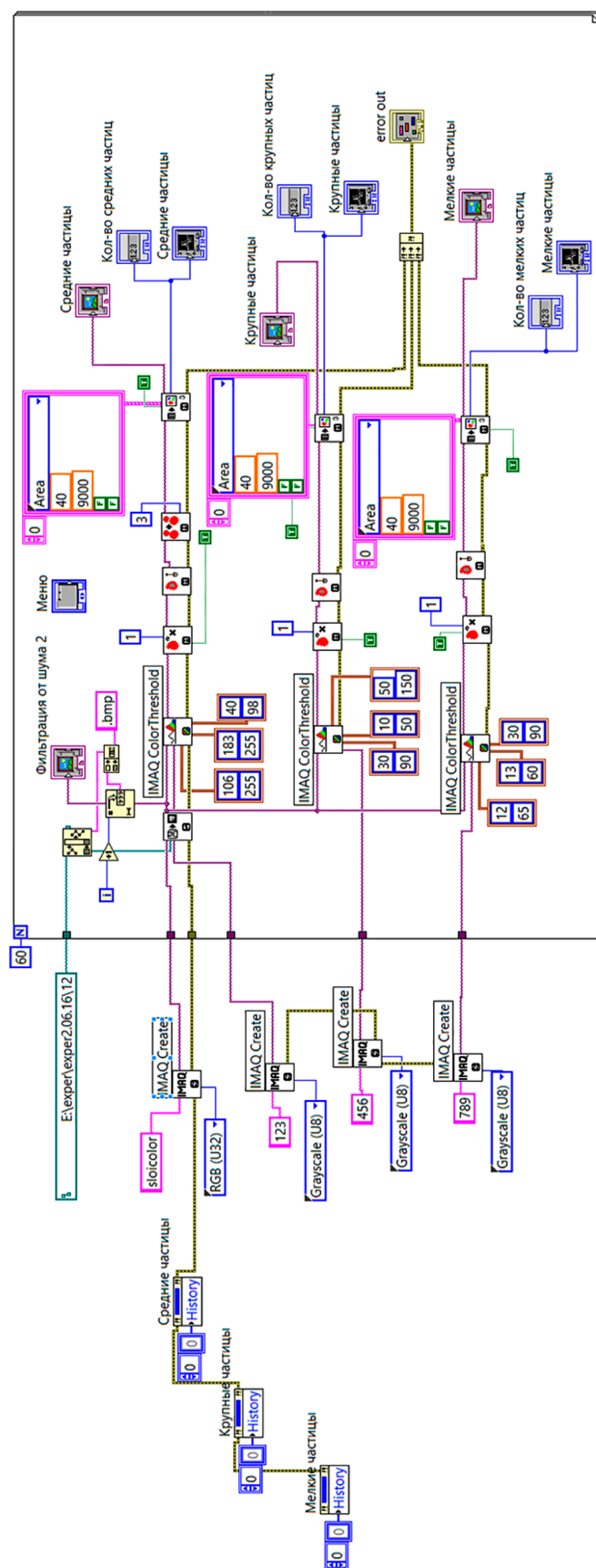


Рис. 3. Компьютерная реализация алгоритма классификации по предварительной цветовой маркировке в среде LabVIEW
 Источник: составлено автором

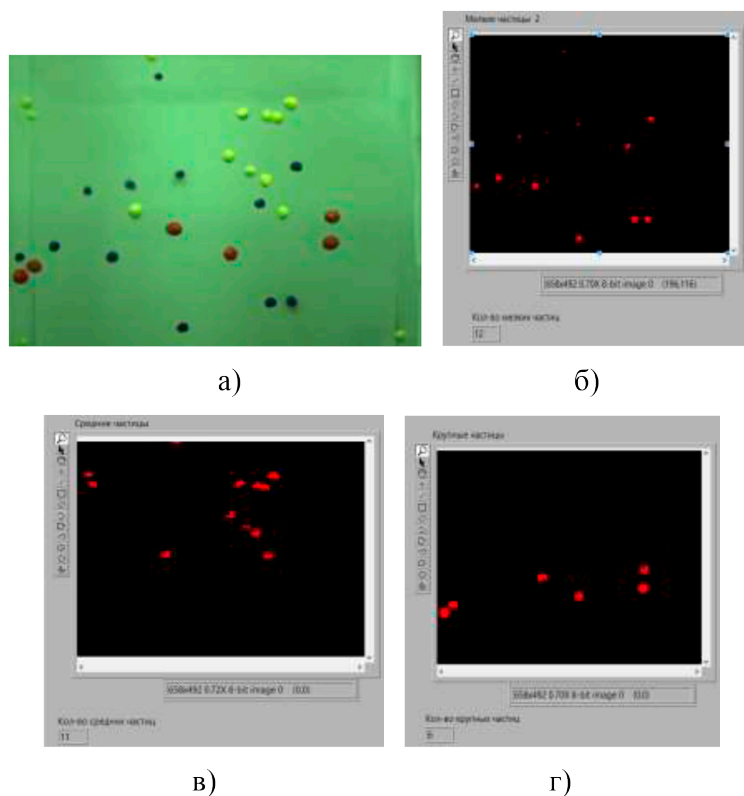


Рис. 4. Классификация по цветовой маркировке:
 а) исходное изображение; б) выявленные мелкие частицы;
 в) выявленные средние частицы; г) выявленные крупные частицы
 Источник: составлено автором по результатам данного исследования

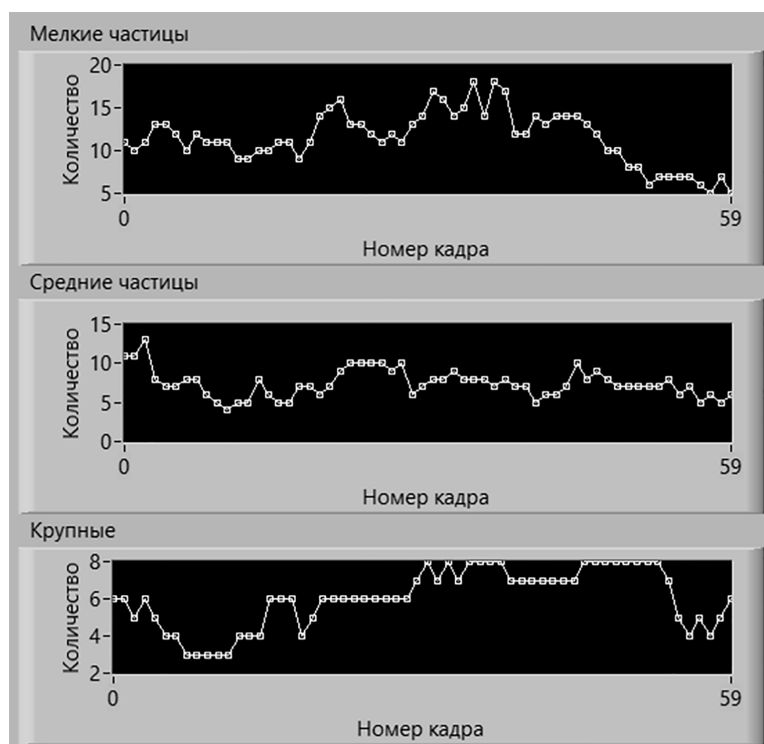


Рис. 5. Результаты эксперимента – изменение количества мелких (а), средних (б) и крупных (в) частиц
 Источник: составлено автором по результатам данного исследования

Однако у данного подхода есть и недостатки, главным из которых является необходимость организации стабильной работы системы освещения, а также следует отметить, что в сравнении с методом, рассмотренным в [1], требуются дополнительные затраты времени на подготовку проведения эксперимента.

Заключение

В статье предложена новая методика для оценки крупности частиц руды в физической модели печи кипящего слоя. Алгоритм и программа классификации по крупности частиц с предварительной цветовой маркировкой реализованы на основе технологии технического зрения.

Предложенная методика может быть использована для подготовки входного распределения частиц для модели баланса популяций для агломератов. Помимо этого, данный материал может быть использован в учебном процессе в качестве практики или лабораторной работы по дисциплинам, связанным с автоматизацией измерений и программированию в среде LabVIEW.

Список литературы

1. Булатов В.В. Оценка крупности частиц физической модели печи кипящего слоя на основе технологии технического зрения // Современные наукоемкие технологии. 2024. № 12. С. 10–16. URL: <https://top-technologies.ru/ru/article/view?id=40238> (дата обращения: 19.09.2025). DOI: 10.17513/snt.40238.
2. Крупнов Л.В., Марченко Н.В., Носова О.В., Рогова Л.И., Каверзин А.В. Промышленные плавильные агрегаты для производства тяжелых цветных металлов: монография. Норильск: ЗГУ, 2022. 234 с. [Электронный ресурс]. URL: <https://e.lanbook.com/book/332873?category=2738> (дата обращения: 19.09.2025).
3. Алкацев В.М., Рутковский А.Л., Макоева А.К. Исследование процесса обжига цинковых концентратов в кипящем слое методом математического моделирования // iPolytech Journal. 2022. Т. 26. № 4. С. 669–676. URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/issledovanie-protssesa-obzhigatsinkovykh-konsentratov-v-kiptyaschem-sloe-metodom-matematicheskogo-modelirovaniya-1> (дата обращения: 19.09.2025).
4. Антропова И.Г., Гуляшинов П.А., Перинов А.А. Исследование процесса обжига сульфидной свинцово-цинковой руды в атмосфере водяного пара // Горный информационно-аналитический бюллетень (научно-технический журнал). 2021. № 11. С. 56–67. URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/issledovanie-protssesa-obzhiga-sulfidnoy-svintsovo-tsinkovoy-rudy-v-atmosfere-vodyanogo-para> (дата обращения: 19.09.2025).
5. Ивакина С.А., Мунц В.А. Печь кипящего слоя для обжига цинковых концентратов как объект регулирования // Известия Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов. 2018. Т. 329. № 9. С. 31–42. URL: https://earchive.tpu.ru/bitstream/11683/51026/1/bulletin_tpu-2018-v329-i9-03.pdf (дата обращения: 19.09.2025).
6. Николаев А.Н., Шариков Ю.В. Применение программного комплекса Proficy Troubleshooter для установления зависимости между входными и выходными переменными обжига никелевого концентрата в печи кипящего слоя // Международный научно-исследовательский журнал. 2016. № 12–5 (54). С. 21–23. URL: <https://research-journal.org/archive/12-54-2016-december/primenenie-programmnogo-kompleksa-proficy-troubleshooter-dlya-ustanovleniya-zavisimosti-mezhdu-vxodnymi-i-vyходnymi-peremennymi-obzhig-nikelevogo-konzentrata-v-pechi-kiptyashhego-sloya> (дата обращения: 19.09.2025). DOI: 10.18454/IRJ.2016.54.092.
7. Кульчицкий А.А., Булатов В.В., Бойков А.В., Комарова Т.Ю., Бажин В.Ю. Применение систем технического зрения для контроля технологических параметров и оборудования на производстве // Новые информационные технологии в автоматизированных системах. 2017. № 20–1. С. 17–22. URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/primenenie-sistem-tehnicheskogo-zreniya-dlya-kontrolya-tehnologicheskikh-parametrov-i-oborudovaniya-na-proizvodstve> (дата обращения: 19.09.2025).
8. Бойков А.В., Пайор В.А. Система технического зрения для мониторинга левитационной плавки цветных металлов // Цветные металлы. 2023. № 4. С. 85–89. URL: <https://www.rudmet.ru/journal/2205/article/36570> (дата обращения: 19.09.2025). DOI: 10.17580/tsm.2023.04.11.
9. Кульчицкий А.А., Мансурова О.К., Николаев М.Ю. Распознавание дефектов грузоподъемных канатов металлургического оборудования оптическим методом с помощью нейронных сетей // Черные металлы. 2023. № 3. С. 81–88. URL: <https://www.rudmet.ru/journal/2199/article/36497> (дата обращения: 19.09.2025). DOI: 10.17580/chm.2023.03.13.
10. Кульчицкий А.А., Николаев М.Ю., Бригаднов И.А., Русинов Л.А. Оптический контроль повреждений грузоподъемных канатов металлургического технологического оборудования // Инженерный вестник Дона. 2025. № 3 (123). С. 133–153. URL: <http://www.ivdon.ru/ru/magazine/archive/n3y2025/9886> (дата обращения: 19.09.2025).
11. Панфилов А.В., Короткий А.А., Иванов Б.Ф., Юсупов А.Р. Контроль канатов при эксплуатации машин с канатной тягой // Научно-технический вестник Брянского государственного университета. 2022. № 4. С. 330–338. URL: <https://ntv-brgu.ru/wp-content/arhiv/2022-N4/2022-04-08.pdf> (дата обращения: 19.09.2025). DOI: 10.22281/2413-9920-2022-08-04-330-338.
12. Билан И.Т., Трубников К.В., Звонарев Д.Ю., Носкова М.Н. Обнаружение и классификация дефектов прокатного происхождения на торцах гильз с использованием сверточной нейронной сети // Вестник Южно-Уральского государственного университета. Серия: Металлургия. 2023. Т. 23. № 1. С. 22–29. URL: <https://vestnik.susu.ru/metallurgy/article/view/13310> (дата обращения: 19.09.2025). DOI: 10.14529/met230103.
13. Маркевич А.В., Полякова М.А. Применение методов неразрушающего контроля для выявления дефектов горячекатаного металлопроката // Известия ТулГУ. Технические науки. 2024. № 3. С. 285–291. URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/primenenie-metodov-nerazrushayuschego-kontrolya-dlya-vyyavleniya-defektov-goryachekatanogo-metalloprokata> (дата обращения: 19.09.2025).
14. Булатов В.В., Прокофьева М.К. Система контроля качества листовых материалов // Патент РФ № 2843082. Патентообладатель ФГАОУ ВО «Санкт-Петербургский государственный университет аэрокосмического приборостроения». 2025. МПК G01N 21/89, G01N 21/88, G01N 29/27; заявлено 22.11.2024; опубл. 07.07.2025 Бюл. № 19.
15. Юдин Д.А., Магергут В.З. Программный комплекс системы технического зрения для оценки состояния процесса обжига // Программные продукты и системы. 2013. № 2. С. 257–262. URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/programmnyy-kompleks-sistemy-tehnicheskogo-zreniya-dlya-otsenki-sostoyaniya-protssesa-obzhiga> (дата обращения: 19.09.2025).

Конфликт интересов: Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Conflict of interest: The authors declare that there is no conflict of interest.