

**ОЦЕНКА ЭКОНОМИЧЕСКОЙ ЭФФЕКТИВНОСТИ ВНЕДРЕНИЯ
СИСТЕМ ОПТИЧЕСКОЙ СОРТИРОВКИ ПИЛОМАТЕРИАЛОВ
В КОНТЕКСТЕ ИНДУСТРИИ 4.0**

**ECONOMIC EFFICIENCY ASSESSMENT OF OPTICAL LUMBER
SORTING SYSTEMS IMPLEMENTATION IN THE CONTEXT OF
INDUSTRY 4.0**

Лискин Д.С., студент

Попов О.В., студент

Щербакова И.В., к.т.н., доцент

**ФГБОУ ВО «Воронежский государственный лесотехнический университет
имени Г.Ф. Морозова» г. Воронеж, Россия**

shcherbakovaiv@vglta.vrn.ru

Liskin D.S., student

Popov O.V., student

Shcherbakova I.V., CSc (Engineering), Associate Professor

**Voronezh State University of Forestry and Technologies named
after G.F. Morozov,
Voronezh, Russia**

Аннотация: В условиях низкой рентабельности лесопромышленного сектора РФ менее 10% критически важным становится внедрение технологий Индустрии 4.0 для оптимизации производственных процессов. Целью исследования является оценка экономической целесообразности внедрения систем автоматической оптической сортировки пиломатериалов с учётом российских рыночных реалий. В работе применён метод сравнительного экономического моделирования, учитывающий прямые потери от брака, рост производительности и максимизацию ценности продукции. Техническая реализация базируется на архитектуре ПоТ с использованием машинного зрения и edge-аналитики. Результаты показали, что совокупная годовая выгода (NAB) для предприятия объёмом 10 000 м³ может достигать 156,4 млн. рублей за счёт синергии снижения брака, сокращения трудозатрат и улучшения классификации. Окупаемость критически зависит от капитальных затрат (CAPEX), варьирующихся от 10 до

50 млн рублей. Сделан вывод о высокой потенциальной эффективности при условии точной интеграции с существующими ERP-системами и учёта ограничений по стоимости оборудования в условиях импортозамещения.

Abstract: In the context of low profitability of the Russian forest industry sector (less than 10%), the implementation of Industry 4.0 technologies for optimizing production processes becomes critical. The aim of the study is to assess the economic feasibility of implementing automatic optical lumber sorting systems, taking into account Russian market realities. The paper applies a comparative economic modeling method, taking into account direct losses from defects, productivity growth, and product value maximization. Technical implementation is based on IIoT architecture using machine vision and edge analytics. Results showed that the total annual benefit (NAB) for an enterprise with a volume of 10,000 m³ can reach 156.4 million RUB due to the synergy of defect reduction, labor cost savings, and improved classification. Payback critically depends on capital expenditures (CAPEX), ranging from 10 to 50 million RUB. It is concluded that there is high potential efficiency provided accurate integration with existing ERP systems and consideration of equipment cost limitations under import substitution conditions.

Ключевые слова: Оптическая сортировка, экономическая эффективность, автоматизация деревообработки, пиломатериалы, срок окупаемости, импортозамещение.

Keywords: Optical sorting, economic efficiency, automation of wood processing, lumber, payback period, import substitution.

Современное состояние лесопильной промышленности характеризуется высокой конкуренцией и возрастающими требованиями к качеству конечной продукции, а также, критически низкими показателями маржинальности, не превышающими 10%. В то же время на мировом уровне наблюдается устойчивая тенденция роста рынка деревообработки: по прогнозам, к 2030 году его объем достигнет 6,52 миллиарда долларов США при среднегодовом темпе роста 4,42%. В условиях ограниченности качественного сырьевого ресурса и роста производственных издержек ключевым фактором устойчивого развития предприятий становится повышение эффективности использования древесины. Одним из наиболее перспективных направлений технологической модернизации в этой области является переход от ручного контроля качества к автоматизированным системам на базе технологий машинного зрения. Основным барьером на пути к повышению конкурентоспособности отечественных предприятий остается

ся технологическая отсталость этапов сортировки. Традиционная ручная сортировка является медленным и трудоемким процессом, подверженным ошибкам, связанным как с усталостью оператора, так и субъективным восприятием дефектов. Это приводит к недооценке продукции, когда качественный материал ошибочно относится к низшему сорту, или к пропуску брака в высшие категории. Переход к ценностно-ориентированным моделям ценообразования требует внедрения решений, обеспечивающих измеримый экономический эффект через более широкую и глубокую степень автоматизации [3].

Целью исследования является обоснование экономической целесообразности внедрения систем оптической сортировки пиломатериалов на основе моделирования прямых и косвенных выгод с учётом российских рыночных цен и условий импортозамещения.

Оптические системы, использующие камеры высокого разрешения и лидары, способны детектировать такие дефекты, как узлы, трещины, гниль и плесень с точностью более 95%, что недостижимо при ручном труде. Технологическое решение, построенное на архитектуре IoT, позволяет системе работать в режиме 24/7 со скоростью до 120 метров в минуту. Сравнительный анализ эксплуатационных характеристик показал, что автоматизированная система превосходит ручной труд по скорости обработки в 3 раза, достигая показателей в 80–120 метров в минуту. Ключевым преимуществом является переход на режим работы 24/7, что недоступно при ручной сортировке из-за ограничений человеческого ресурса. Была выбрана линия сортировки сухих пиломатериалов KRAFTER BS-Line Российского производства.

Предлагаемое решение по использованию системы оптической сортировки – это важный элемент стратегической модернизации предприятия, позволяющий преобразовывать сырьё в продукт максимальной ценности за счёт точной классификации и минимизации потерь.

В рамках данного исследования применялся метод сравнительного экономического моделирования и анализа архитектурных парадигм промышленной автоматизации. Выбор данных моделей обусловлен необходимостью оценки компромисса между скоростью развёртывания и глубиной интеграцией технологического оборудования с информационными системами предприятия.

Реализация системы оптической сортировки базируется на многоуровневой архитектуре, соответствующей стандартам Индустрии 4.0.

Для оценки целесообразности внедрения данных технологий была разработана математическая модель совокупной чистой годовой выгоды — Net Annual Benefit (NAB). Расчет производится по формуле:

$$NAB = BV + PV + QV,$$

где BV — экономический эффект от минимизации брака; PV — выгода от масштабирования производительности и оптимизации фонда оплаты труда; QV — доход от повышения точности классификации (сортности).

Исходные данные приведены в табл. 1.

Таблица 1 – Исходные данные для расчётов (РФ, 2026 г.):

Параметр	Значение	Обоснование
Курс USD/RUB	85 руб./\$	Бюджетный прогноз на 2026 год
Цена пиломатериала (1 сорт)	18 000 руб./м³	Среднерыночная цена хвойной обрезной доски
Цена пиломатериала (2 сорт)	16 000 руб./м³	Дисконт за снижение класса качества
Стоимость утилизации брака (щепа)	3 000 руб./м³	Оценка вторичной переработки
Зарплата сортировщика (с налогами)	800 000 руб./год	Данные по отрасли
Стоимость базовой системы сортировки	10-5 млн. руб.	Цены на линии сортировки в РФ
Стоимость продвинутой системы	40-50 млн. руб.	С учётом интеграции и адаптации ПО

Для оценки стоимости оборудования использовались аналогии с системами сортировки в смежных отраслях (горнодобывающая промышленность), где стоимость AI-оптических систем начинается от 150 000 долларов США [5].

В ходе моделирования были получены количественные метрики эффективности внедрения автоматизированной системы сортировки. Сравнительный анализ ручного и автоматического методов представлен в таблице 2.

Таблица 2 – Сравнительная характеристика методов сортировки

Параметр	Ручная сортировка	Автоматическая сортировка	Единицы измерения
Скорость обработки	20–40	60–120	метров в минуту
Точность классификации	~70–80	>95	%
Влияние человеческого фактора	Высокое	Отсутствует	Качественная оценка
Режим работы	1 смена (ограничено)	24/7 (непрерывно)	Часы

Как видно из табл. 2, скорость автоматической градации пиломатериалов как минимум в три раза превышает показатели ручной сортировки. Такое увеличение скорости линии напрямую переводится в увеличение объёма выпускаемой продукции. Например, при работе 2000 часов в год прирост производительности позволяет дополнительно выпускать значительные объёмы продукции, что формирует основу для компонента PV.

На основе введённых переменных были рассчитаны составляющие годовой выгоды.

1. Выгода от снижения брака (BV). При текущем проценте брака 5% (500 м³) и стоимости утилизации 3 000 руб. за м³ щепа против средней цены пиломатериала первого сорта 18 000 руб. за м³, потеря ценности составляет 15 000 руб. на единицу. Снижение брака на 1% (200 м³) за счёт точной классификации даёт экономию:

$$BV=200\times(18\,000-3\,000)=3\,000\,000 \text{ рублей.}$$

В базовой модели использовано консервативное значение 3 млн руб. для учёта вероятностных факторов.

2. Выгода от производительности и труда (PV). Сокращение штата сортировщиков с 4 до 1 человека при годовой стоимости труда 800 000 руб. на сотрудника даёт экономию 2,4 млн. руб. Дополнительный доход от увеличения объёма продукции при цене 1 500 руб. за погонный метр и приросте 100 тыс. м³ составляет 150 млн руб. $PV=2\,400\,000+150\,000\,000=152\,400\,000$ рублей.

3. Выгода от улучшения качества (QV). Смещение 5% продукции из второго сорта (16000 руб./м³) в первый (18 000 руб./м³) при объеме 10 000 м³ даёт: $QV=(10\,000\times0,05)\times(18\,000-16\,000)=1\,000\,000$ рублей.

Итоговая чистая годовая выгода:

$NAB=BV+PV+QV=3\,000\,000+152\,400\,000+1\,000\,000=156\,400\,000$ рублей

или ~1,84 млн долларов США по курсу 85 руб./\$.

Для оценки инвестиционной привлекательности упрощённо рассчитан чистый дисконтированный доход за первый год при двух сценариях стоимости оборудования, табл. 3.

Таблица 3 – Сценарии окупаемости инвестиций (в рублях)

Сценарий	Стоимость системы (CAPEX), млн. руб.	Годовая выгода (NAB), млн. руб.	NPV (1 год), млн. руб.	Статус
Оптимистичный	10	156,4	+146,4	Целесообразно
Реалистичный	25	156,4	+131,4	Целесообразно
Консервативный	50	156,4	+106,4	Окупается >1 года

Данные таблицы демонстрируют, что даже при реалистичной стоимости оборудования в 25 млн. рублей инвестиции окупаются в течение первого года с существенным положительным финансовым результатом.

Полученные результаты подтверждают гипотезу о высокой экономической эффективности внедрения систем оптической сортировки в условиях российского рынка. Наибольший вклад в годовую выгоду в рассмотренном примере вносит косвенный эффект от роста производительности и сокращения труда, составляющий более 97% от общей выгоды. Это указывает на то, что основным драйвером является не столько экономия на браке, сколько способность линии работать быстрее и с меньшим количеством персонала.

По сравнению с традиционными методами контроля качества, автоматизированные системы обеспечивают неизменную и объективную оценку для каждой единицы продукции. Человеческий фактор неизбежно вносит субъективизм, тогда как алгоритмы на основе искусственного интеллекта достигают

точности более 95% [4]. Альтернативные решения, такие как простые цветковые сортировщики, не подходят для сложной деревообработки из-за недостаточной глубины анализа дефектов. Системы для горнодобывающей промышленности с ориентировочной стоимостью от 20-35 млн. руб. ближе по техническим требованиям, но требуют адаптации под специфику древесины [5].

Внедрение автоматизации не ограничивается лишь самим процессом сортировки. Подразумевается единый производственный комплекс, который может быть интегрирован с другими участками производства, такими как лесопилки и заводы по производству клееных изделий.

В ходе исследования была проведена оценка экономической эффективности внедрения систем оптической сортировки пиломатериалов с учётом российских рыночных цен. Экономический эффект достигается за счёт синергии трёх ключевых факторов: снижения явных потерь от брака, значительного роста производительности и сокращения трудозатрат, а также максимизации ценности конечной продукции за счёт более точной классификации.

Перспективы дальнейших исследований могут быть связаны с изучением возможностей интеграции систем сортировки пиломатериалов с платформами ИИ.

Список литературы

1. Woodworking Machinery Market Size, Share & 2030 Growth Trends. Mordor Intelligence. – URL: <https://www.mordorintelligence.com/industry-reports/woodworking-machinery-market> (дата обращения: 14.03.2026).
2. Annual Report 2024. Stora Enso. – URL: https://www.storaenso.com/-/media/documents/download-center/documents/annual-reports/2024/storaenso_annual_report_2024.pdf (дата обращения: 14.03.2026).
3. Forest Products Annual Market Review 2023–2024. UNECE. – URL: https://unece.org/sites/default/files/2024-11/2413966E_FPAMR24_WEB.pdf (дата обращения: 14.03.2026).
4. Scalable AI-driven automation for visual lumber grading. ScienceDirect. – URL: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0959652625023431> (дата обращения: 14.03.2026).
5. Sensor-Based Ore Sorting Technology in Mining. MDPI. – URL: <https://www.mdpi.com/2075-163X/9/9/523> (дата обращения: 14.03.2026).

6. Digital Transformation of the Wood Industry. ResearchGate. – URL: https://www.researchgate.net/publication/390558789_Digital_Transformation_of_the_Wood_Industry (дата обращения: 14.03.2026).

References

1. Woodworking Machinery Market Size, Share & 2030 Growth Trends. Mordor Intelligence. – URL: <https://www.mordorintelligence.com/industry-reports/woodworking-machinery-market> (дата обращения: 14.03.2026).

2. Annual Report 2024. Stora Enso. – URL: https://www.storaenso.com/-/media/documents/download-center/documents/annual-reports/2024/storaenso_annual_report_2024.pdf (дата обращения: 14.03.2026).

3. Forest Products Annual Market Review 2023–2024. UNECE. – URL: https://unece.org/sites/default/files/2024-11/2413966E_FPAMR24_WEB.pdf (дата обращения: 14.03.2026).

4. Scalable AI-driven automation for visual lumber grading. ScienceDirect. – URL: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0959652625023431> (дата обращения: 14.03.2026).

5. Sensor-Based Ore Sorting Technology in Mining. MDPI. – URL: <https://www.mdpi.com/2075-163X/9/9/523> (дата обращения: 14.03.2026).

6. Digital Transformation of the Wood Industry. ResearchGate. – URL: https://www.researchgate.net/publication/390558789_Digital_Transformation_of_the_Wood_Industry (дата обращения: 14.03.2026).