

**УДК 004.89**

**Применение технологий искусственного интеллекта и цифровых решений  
Warehouse 4.0 в складской логистике металлургического предприятия**

**Тихомирова С.Д.**

**Научный руководитель – доцент (квалификационная категория «ординарный  
доцент») Сажнева Л.П.**

Университет ИТМО

choka0413@gmail.com

**Введение**

Цифровая трансформация промышленности в рамках концепции Industry 4.0 приводит к активному внедрению технологий Warehouse 4.0 в сфере складской логистики. Современные исследования демонстрируют, что интеграция технологий искусственного интеллекта позволяет существенно повысить прозрачность процессов, сократить операционные издержки и улучшить управление ресурсами на складах промышленных предприятий [3, 13, 14].

В металлургической отрасли складская логистика отличается широким ассортиментом продукции, крупногабаритными грузами и сложной организацией внутренних процессов. В этих условиях применение технологий предиктивной аналитики, автоматизации и интеллектуального планирования становится ключевым фактором повышения эффективности [4, 10]. Особое внимание в современных исследованиях уделяется интеграции цифровых двойников и AI-алгоритмов для моделирования складских процессов и оптимизации распределения ресурсов [5, 7, 12].

Целью исследования является выявление возможностей повышения эффективности складских бизнес-процессов металлургического предприятия на основе применения технологий искусственного интеллекта и решений Warehouse 4.0.

**Основная часть**

Анализ научной литературы показывает, что технологии IoT и машинного зрения позволяют автоматизировать процессы идентификации и перемещения грузов, снижая ошибки инвентаризации и повышая точность учета складских операций. В промышленном кейсе применения Warehouse 4.0 продемонстрировано сокращение времени обработки паллет и повышение прозрачности материальных потоков [1, 13].

Благодаря алгоритмам искусственного интеллекта и машинного обучения склад перестает работать «вслепую» и начинает действовать на опережение. ML-модели позволяют прогнозировать пики загрузки, оптимизировать запасы и повышать эффективность распределения персонала [10, 11]. Исследования в области AI в управлении цепями поставок подтверждают положительное влияние интеллектуальных систем на операционную результативность предприятий [4, 8].

Отдельным направлением цифровизации складской логистики является применение технологии цифрового двойника, позволяющей моделировать складские процессы в виртуальной среде и оценивать последствия управленческих решений без физического вмешательства в систему. Исследования показывают, что цифровые двойники способствуют оптимизации внутренних транспортных потоков, сокращению «узких мест» и повышению эффективности планирования [5, 6, 7, 12].

В то же время на практике многие металлургические компании продолжают использовать ERP-системы общего назначения без внедрения полнофункциональных WMS-систем. Анализ деятельности АО «Евраз Маркет», проведенный на основе глубинного интервью с руководителем участка складской логистики, менеджерами и сотрудниками подразделения, а также данные, полученные из системы 1С:ERP, включая показатели движения продукции, времени выполнения складских операций и уровня загрузки персонала, выявили наличие временных «окон» в расписаниях приемки и отгрузки, неравномерную загрузку персонала, высокую издержки инвентаризации и ограниченные возможности прогнозирования пиковых нагрузок. Подобные проблемы описываются в исследованиях как типичные для складов, находящихся на этапе перехода к Warehouse 4.0 [2, 9].

Сравнительный анализ зарубежных практик и текущего состояния складских процессов предприятия позволяет сделать вывод о том, что внедрение элементов IoT, предиктивной аналитики и цифрового двойника может быть реализовано в рамках существующей IT-инфраструктуры без обязательной замены ERP-системы на WMS, что подтверждается результатами исследований [3, 7, 14].

### **Выводы**

Проведенное исследование демонстрирует, что технологии Warehouse 4.0 — включая IoT, искусственный интеллект, машинное обучение и цифровые двойники — обеспечивают значительный потенциал повышения эффективности складских процессов в металлургической компании. Зарубежные практики подтверждают сокращение операционных издержек, повышение точности учета и улучшение планирования ресурсов [1, 4, 10].

Сравнительный анализ данных из научной литературы с текущим состоянием складской логистики АО «Евраз Маркет» позволяет обосновать логичность внедрения элементов Warehouse 4.0 в условиях использования ERP-системы без внедрения WMS. Полученные результаты формируют основу для дальнейшей разработки рекомендаций по цифровой трансформации складских бизнес-процессов металлургического предприятия.

### **Литература**

1. A smart Warehouse 4.0 approach for the pallet management using machine vision and Internet of Things (IoT): A real industrial case study / A. Vukicevic, M. Mladineo, N. Banduka, I. Macuzic // *Advances in Production Engineering & Management*. – 2021. – Т. 16. – A smart Warehouse 4.0 approach for the pallet management using machine vision and Internet of Things (IoT). – № 3. – С. 297-306.
2. A New Sustainable Warehouse Management Approach for Workforce and Activities Scheduling / V. Popović, M. Kilibarda, M. Andrejić [et al.] // *Sustainability*. – 2021. – Vol. 13. – № 4. – P. 2021.
3. Ali, I. Industry 4.0 technologies and sustainable warehousing: a systematic literature review and future research agenda / I. Ali, H. M. Phan // *The International Journal of Logistics Management*. – 2022. – Vol. 33. – Industry 4.0 technologies and sustainable warehousing. – № 2. – P. 644-662.
4. Artificial intelligence in supply chain management: A systematic literature review / R. Toorajipour, V. Sohrabpour, A. Nazarpour [et al.] // *Journal of Business Research*. – 2021. – Vol. 122. – Artificial intelligence in supply chain management. – P. 502-517.

5. Digital Twin in manufacturing: A categorical literature review and classification / W. Kritzinger, M. Karner, G. Traar [et al.] // IFAC-PapersOnLine. – 2018. – Vol. 51. – Digital Twin in manufacturing. – № 11. – P. 1016-1022.
6. Digital twins in logistics: a comprehensive bibliometric analysis for advancing smart cities and sustainable development / A. Galkin, G. Samchuk, D. Kopytkov, R. G. Thompson // Discover Sustainability. – 2025. – Vol. 6. – Digital twins in logistics. – № 1. – P. 853.
7. Félix-Cigalat, J. S. Towards a Digital Twin Warehouse through the Optimization of Internal Transport / J. S. Félix-Cigalat, R. Domingo // Applied Sciences. – 2023. – Vol. 13. – № 8. – P. 4652.
8. Helo, P. Artificial intelligence in operations management and supply chain management: an exploratory case study / P. Helo, Y. Hao // Production Planning & Control. – 2022. – Vol. 33. – Artificial intelligence in operations management and supply chain management. – № 16. – P. 1573-1590.
9. Kembro, J. The transformation from manual to smart warehousing: an exploratory study with Swedish retailers / J. Kembro, A. Norrman // The International Journal of Logistics Management. – 2022. – Vol. 33. – The transformation from manual to smart warehousing. – № 5. – P. 107-135.
10. Machine learning in smart production logistics: a review of technological capabilities / E. Flores-García, D. Hoon Kwak, Y. Jeong, M. Wiktorsson // International Journal of Production Research. – 2025. – Vol. 63. – Machine learning in smart production logistics. – № 5. – P. 1898-1932.
11. Preil, D. Artificial intelligence-based inventory management: a Monte Carlo tree search approach / D. Preil, M. Krapp // Annals of Operations Research. – 2022. – Vol. 308. – Artificial intelligence-based inventory management. – № 1-2. – P. 415-439.
12. The Role of AI in Warehouse Digital Twins: Literature Review / A. Drissi Elbouzidi, A. Ait El Cadi, R. Pellerin [et al.] // Applied Sciences. – 2023. – Vol. 13. – The Role of AI in Warehouse Digital Twins. – № 11. – P. 6746.
13. Tikwayo, L. N. Applications of Industry 4.0 Technologies in Warehouse Management: A Systematic Literature Review / L. N. Tikwayo, T. N. D. Mathaba // Logistics. – 2023. – Vol. 7. – Applications of Industry 4.0 Technologies in Warehouse Management. – № 2. – P. 24.
14. Tubis, A. A. Intelligent Warehouse in Industry 4.0—Systematic Literature Review / A. A. Tubis, J. Rohman // Sensors. – 2023. – Vol. 23. – № 8. – P. 4105.