

КОЛЛАБОРАТИВНЫЕ РОБОТЫ В СКЛАДСКОЙ ЛОГИСТИКЕ: ОЦЕНКА ПРОИЗВОДИТЕЛЬНОСТИ И ЭРГОНОМИЧЕСКИЕ АСПЕКТЫ АВТОМАТИЗАЦИИ

COLLABORATIVE ROBOTS IN WAREHOUSE LOGISTICS: PERFORMANCE EVALUATION AND ERGONOMIC ASPECTS OF AUTOMATION

**B. Goryachkin
N. Kalyuta**

Summary. Problem statement. Automation of warehouse processes is a key area of logistics development. However, the introduction of traditional industrial robots poses a significant risk to personnel due to the lack of security systems. Their use requires expensive security fences and special areas, which increases costs and complicates integration into existing work processes.

Goal. To evaluate the efficiency of collaborative robots (cobots) as a safer alternative to industrial robots in warehouse logistics, to compare their performance with manual labor, and to analyze the ergonomic aspects of their implementation.

Results. A comparative analysis of the operation time for stacking and depalletizing tasks performed by humans and cobots was carried out. It was found that automation reduces time costs by 70 %, increasing the accuracy and efficiency of warehouse processes. Three types of stacking (linear, matrix, and custom) and their impact on performance were analyzed.

Practical significance. The use of cobots in a warehouse increases productivity, improves workplace ergonomics, reduces the likelihood of human error, and allows flexible adaptation of warehouse processes to changing conditions. The results obtained can be used to justify the choice of automation technologies for the modernization of logistics systems.

Keywords: warehouse operations, collaborative robots, box stacking, palletizing, depalletizing, automation, logistics, productivity.

Горячкин Борис Сергеевич

кандидат технических наук, доцент,
Московский государственный технический
университет им. Н.Э. Баумана
bsgor@mail.ru

Калюта Никита Игоревич

Московский государственный технический
университет им. Н.Э. Баумана
nekitce@mail.ru

Аннотация. Постановка проблемы. Автоматизация складских процессов является ключевым направлением развития логистики. Однако, внедрение традиционных промышленных роботов представляет значительную опасность для персонала из-за отсутствия систем безопасности. Их использование требует дорогостоящих защитных ограждений и специальных зон, что увеличивает затраты и усложняет интеграцию в существующие рабочие процессы.

Цель. Оценить эффективность коллаборативных роботов (коботов) как безопасной альтернативы промышленным роботам в складской логистике, сравнить их производительность с ручным трудом и проанализировать эргономические аспекты их использования.

Результаты. Проведен сравнительный анализ времени выполнения операций укладки и депаллетизации для человека и кобота. Установлено, что автоматизация сокращает временные затраты на 70 %, повышая точность и эффективность процессов. Рассмотрены три типа укладки (линейная, матричная, пользовательская) и их влияние на производительность.

Практическая значимость. Применение коботов на складе повышает производительность, улучшает эргономику рабочих мест, снижает вероятность ошибок, связанных с человеческим фактором, и позволяет гибко адаптировать складские процессы к изменяющимся условиям. Полученные результаты могут быть использованы для обоснования выбора технологий автоматизации при модернизации логистических систем.

Ключевые слова: складские операции, коллаборативные роботы, укладка коробов, паллетизация, депаллетизация, автоматизация, логистика, производительность.

Введение

Автоматизация складских процессов на данный момент является ключевым направлением развития логистики. Коллаборативные роботы представляют собой одно из перспективных решений автоматизации складских процессов, обеспечивающее эффективное использование ресурсов, оптимизацию транспортировки и способность работать в одной среде с человеком. Коллаборативные роботы (коботы) — это

роботы, предназначенные для совместной работы с человеком. На складах коботы используются для выполнения задач паллетизации (укладка грузов на паллет для хранения и транспортировки) и депаллетизации (снятие грузов с паллеты и их распределение) [2].

Коллаборативные роботы отличаются от традиционных промышленных роботов наличием встроенных систем безопасности, таких как датчики силы, ограничители скорости и зоны безопасности. Это позволяет уста-

навливать коботов непосредственно рядом с рабочими местами людей без риска травм, что делает их идеальными для складов, где часто требуется взаимодействие человека и машины. Это особенно важно в условиях ограниченного пространства, где установка традиционных роботов с ограждениями была бы затруднена [9].

Коботы легко интегрируются в существующие процессы благодаря своей компактности и простоте настройки. Они не требуют значительных изменений инфраструктуры и могут быть быстро установлены на любом участке склада. Это значительно снижает затраты на внедрение и позволяет начать использование роботов в кратчайшие сроки.

Промышленные роботы требуют соблюдения строгих норм безопасности, включая установку защитных ограждений, систем аварийной остановки и регулярных проверок [3, 4]. Эти требования значительно усложняют интеграцию традиционных роботов на складах. Коботы, напротив, соответствуют менее строгим нормам благодаря своим встроенным системам безопасности, что упрощает их внедрение и снижает затраты на соблюдение нормативных требований [1, 5]. Это делает их более привлекательными для использования в условиях, где соблюдение стандартов безопасности является критически важным.

Одним из ключевых преимуществ коботов является их гибкость в настройке. Добавление нового «рецепта» для выполнения задачи, такой как укладка или депаллетизация, занимает минимум времени. Коботы позволяют быстро адаптироваться к новым условиям, что повышает их эффективность в динамичной среде.

Для оценки производительности рассматриваются несколько типов укладки:

1. Линейная укладка, при которой груз укладывается вдоль одной оси поддона;
2. Матричная укладка, включающая укладку товаров по заранее заданной сетке или шаблону;
3. Пользовательская укладка, разрабатываемая индивидуально для каждого конкретного случая с учётом особенностей груза.

Оценка эффективности работы человека и коллаборативного робота

Для объективной оценки производительности оператора была организована серия экспериментов, в ходе которых фиксировалось время, необходимое для укладки одного короба на паллет. Исследование проводилось в стандартизированных условиях с регистрацией длительности каждого производственного цикла.

Для обеспечения высокой точности эксперимента и получения статистически достоверных результатов была выполнена серия из 1000 измерений. Такой объем данных позволил снизить влияние случайных факторов, включая утомление оператора, вариабельность рабочего темпа и воздействие внешних условий. На основе данных измерений был построен график эффективности человека, представленный на рисунке 1.

Среднее время укладки рассчитывалось по формуле:

$$\overline{t_{cp}} = \frac{\sum_{i=1}^n t_i}{n},$$

где: $\overline{t_{cp}}$ — среднее время укладки одного короба,

t_i — время выполнения i -й операции,

n — общее количество измерений.



Рис. 1. График эффективности человека



Рис. 2. График эффективности коллаборативного робота

На основании проведённого анализа экспериментальных данных среднее время укладки одного короба составляет:

$$\overline{t_{\text{человек}}} = 20,07 \text{ с.}$$

Согласно технической спецификации используемого коллаборативного робота, заявленное время цикла укладки составляет 6 секунд. Для верификации этого показателя был проведён эксперимент: разработана стандартизированная программа укладки с интегрированным высокоточным таймером (точность $\pm 0,01$ с), зафиксировавшим длительность каждого из 1000 рабочих циклов при контролируемых внешних условиях. График, представленный на рисунке 2, демонстрирует эффективность коллаборативного робота.

Результаты эксперимента показали, что среднее время выполнения операции составило:

$$\overline{t_{\text{робот}}} = 6,03 \text{ с,}$$

что подтверждает заявленные характеристики робота.

Сравнительный анализ работы человека и коллаборативного робота на складе

Для оценки эффективности работы коллаборативного робота и человека в задачах укладки коробов был проведён сравнительный анализ времени выполнения операций для трёх типов укладки: линейной, матричной и пользовательской. В основе расчётов лежат практические данные, полученные в ходе эксперимента.

Среднее время укладки одного короба человеком:

$$\overline{t_{\text{человек}}} = 20,07 \text{ с.}$$

Среднее время укладки одного короба коллаборативным роботом:

$$\overline{t_{\text{робот}}} = 6,03 \text{ с,}$$

Для расчёта времени укладки паллеты была использована следующая формула:

$$T = n \times \bar{t},$$

где: T — общее время укладки паллеты,

n — количество коробов на паллете,

$\bar{t}$ — среднее время укладки одного короба.

Рассчитанные значения времени укладки представлены в виде графиков, демонстрирующих зависимость времени от типа укладки и количества коробов на паллете. Полученные результаты позволяют наглядно сравнить производительность человека и робота, а также оценить потенциальные преимущества автоматизации данного процесса.

Линейная укладка

Линейная укладка предполагает размещение коробов в один ряд вдоль оси поддона. На графике видно, что коллаборативный робот значительно превосходит человека по скорости выполнения задачи укладки коробов при линейной укладке. Время, затрачиваемое коллаборативным роботом на укладку одного поддона, составляет лишь небольшую долю от времени, которое требуется человеку. Кроме того, график демонстрирует,

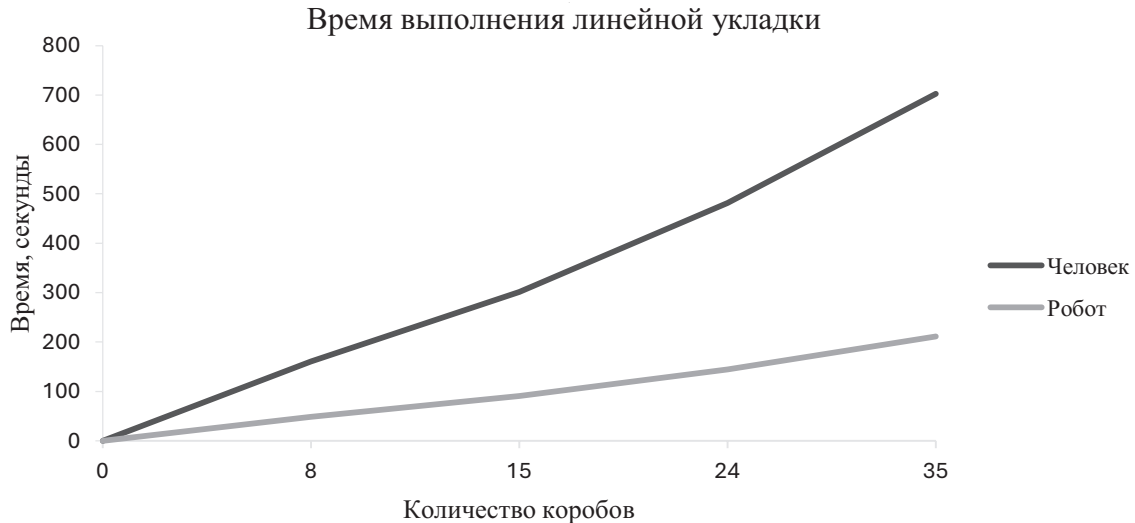


Рис. 3. График времени выполнения линейной укладки

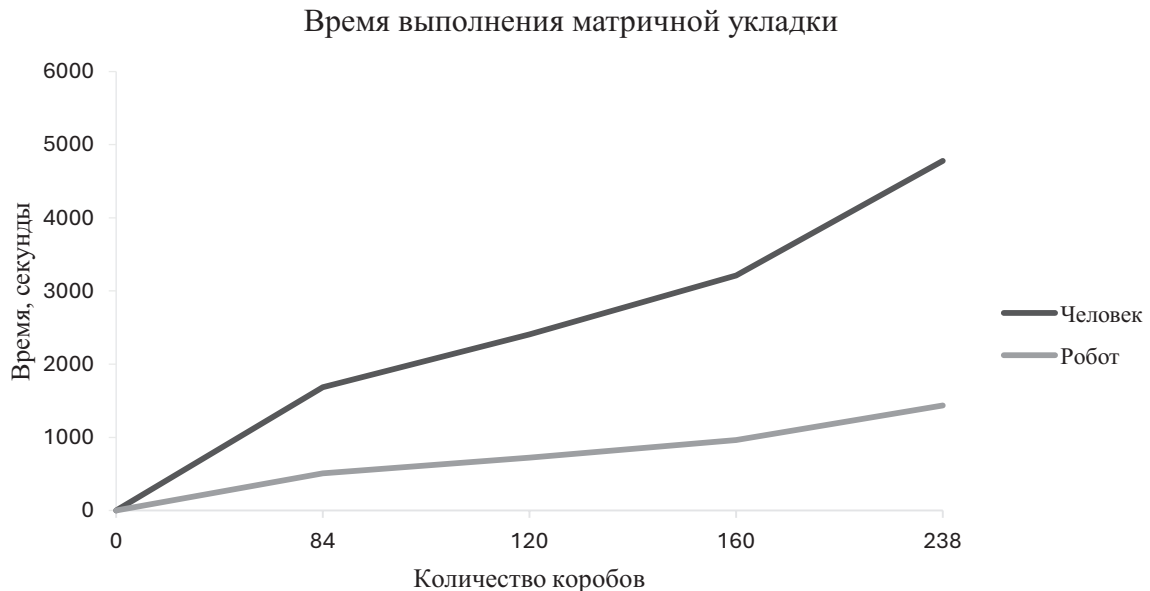


Рис. 4. График времени выполнения матричной укладки

что использование кобота позволяет существенно сократить общее время выполнения операций.

Матричная укладка

Матричная укладка предполагает размещение коробов по заранее заданной сетке, что позволяет более эффективно использовать пространство поддона. Время, затрачиваемое коботом на укладку одного поддона, существенно меньше, чем у человека, что подтверждает высокую эффективность автоматизации в условиях более сложных и плотных схем размещения груза. Это особенно важно для матричной укладки, где требуется точность и аккуратность в размещении коробов для обеспечения устойчивости паллеты. Использование коллаборативного робота при матричной укладке не только ускоряет процесс, но и снижает вероятность ошибок, связанных с человеческим фактором.

Пользовательская укладка

Пользовательская укладка адаптируется под нестандартные или сложные товары, что требует индивидуального подхода к размещению каждого короба.

График демонстрирует, что кобот существенно превосходит человека по скорости выполнения задач укладки коробов даже в условиях пользовательской укладки, которая требует индивидуального подхода к размещению каждого груза.

В Таблице 1 представлено сравнение временных затрат на разные укладки для коллаборативного робота и человека.

Использование коллаборативного робота (кобота) для укладки коробов значительно повышает произ-

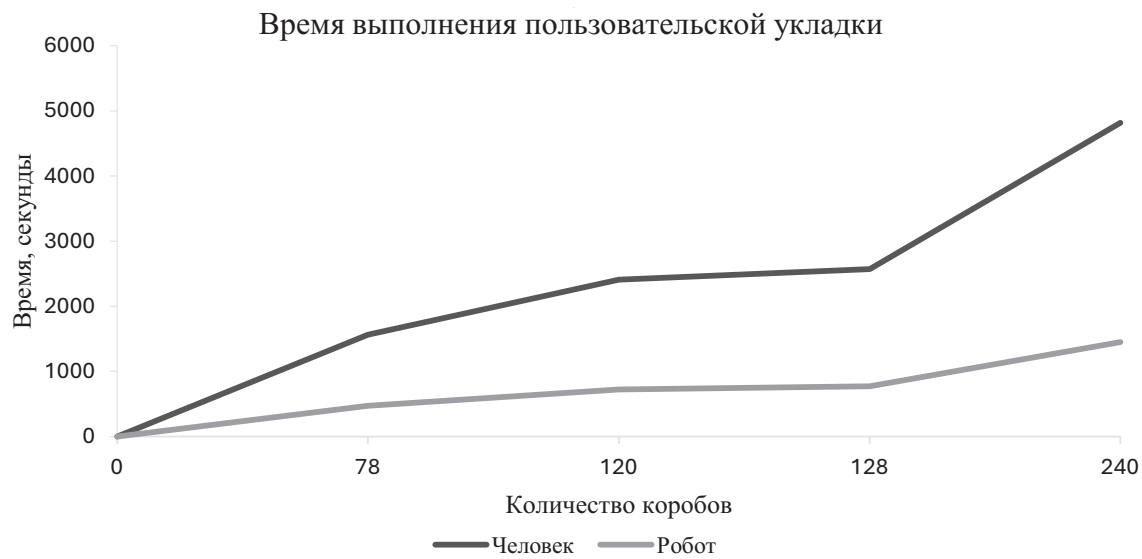


Рис. 5. График времени выполнения пользовательской укладки

Таблица 1.

Сравнение временных затрат на укладку для робота и человека

Тип укладки	Кол-во коробов	Время укладки человеком (с)	Время укладки роботом (с)	Экономия времени (%)
Линейная	8	160,56	48,24	70 %
	15	301,05	90,45	
	24	481,68	144,72	
	35	702,45	211,05	
Матричная	84	1685,88	506,52	
	120	2408,4	723,6	
	160	3211,2	964,8	
	238	4776,66	1435,14	
Пользовательская	78	1565,46	470,34	
	120	2408,4	723,6	
	128	2568,96	771,84	
	240	4816,8	1447,2	

водительность, позволяя снизить временные затраты на укладку на 70 % по сравнению с ручной укладкой, что подтверждается результатами. Это также демонстрирует эффективность внедрения автоматизации в складские процессы: снижение времени цикла операций, улучшение точности укладки и уменьшение издержек на выполнение задач. Коботы, работая рядом с людьми, обеспечивают гибкость процессов и могут быстро адаптироваться к изменениям, что способствует оптимизации использования складских ресурсов и повышению общей эффективности работы склада.

Заключение

Проведённый анализ показал, что внедрение коллаборативных роботов позволяет сократить время выполнения операций укладки и депаллетизации на 70 %, повысить точность укладки и снизить влияние человеческого фактора. Среднее время обработки одного короба оператором составило 20,07 с, тогда как робот выполнял аналогичную задачу за 6,03 с, что подтверждает высокую эффективность автоматизации даже при работе с различными схемами укладки (линейной, матричной и пользовательской укладки).

Тем не менее, полный отказ от человеческого труда в ближайшей перспективе маловероятен. Современные коботы, несмотря на преимущества в скорости и точности, требуют адаптации существующих рабочих процессов, обучения персонала и решения задач гибкой интеграции в сложившиеся логистические системы. Текущие ограничения связаны не столько с технологическими возможностями коботов, сколько с необходимостью сохранения баланса между автоматизацией и эргономикой рабочих мест.

В долгосрочной перспективе автоматизация складских процессов неизбежно усилится, но её темпы будут зависеть от решения ключевых проблем: стоимости внедрения, масштабируемости решений для малых складов и социальной адаптации персонала. При этом даже частичное внедрение коботов уже сейчас даёт значимый экономический эффект, сокращая издержки и повышая точность операций.

Таким образом, коллаборативные роботы не заменят полностью человеческий труд, но трансформируют его, создавая новую парадигму взаимодействия человека и машины в логистике. Этот процесс будет постепенным,



Рис. 6. Общий график всех типов укладок

сопровождаться технологическими усовершенствованиями и пересмотром организационных моделей работы складов будущего.

ЛИТЕРАТУРА

- ГОСТ Р 12.2.072–98 «Система стандартов безопасности труда. Роботы промышленные. Роботизированные технологические комплексы. Требования безопасности» — URL: <https://docs.cntd.ru/document/1200017988> (Дата обращения: 19.03.2025)
- ГОСТ Р 60.1.2.3-2021 «Требования безопасности для роботов, работающих совместно с человеком» — URL: <https://meganorm.ru/Data/757/75748.pdf> (Дата обращения: 19.03.2025)
- ГОСТ Р 60.1.2.1-2016 / ИСО 10218–1:2011 «Роботы и робототехнические устройства. Требования по безопасности для промышленных роботов. Часть 1.» — URL: <https://docs.cntd.ru/document/1200141084/titles/8QA0M3> (Дата обращения: 19.03.2025)
- ГОСТ Р 60.1.2.2-2016 / ИСО 10218–2:2011 «Роботы и робототехнические устройства. Требования по безопасности для промышленных роботов. Часть 2.» — URL: <https://docs.cntd.ru/document/1200141449> (Дата обращения: 19.03.2025)
- ГОСТ Р 12.3.047–2021 «Пожарная безопасность на складах» — URL: <https://docs.cntd.ru/document/1200103505> (Дата обращения: 19.03.2025)
- СанПиН 2.2.4.548–96 «Гигиенические требования к микроклимату производственных помещений» — URL: <https://docs.cntd.ru/document/901704046> (Дата обращения: 19.03.2025)
- ГОСТ Р 55525-2013 «Требования к укладке грузов на поддоны» — URL: <https://www.flamax.ru/upload/%D0%93%D0%9E%D0%A1%D0%A2%20%D0%A0%2055525-2013.pdf> (Дата обращения: 19.03.2025)
- Документация к роботам EliteRobots — URL: <https://ru.eliterobots.com/> (Дата обращения: 19.03.2025)
- Почанин Ю. «Робототехника в промышленности» — URL: https://www.google.ru/books/edition/%D0%A0%D0%BE%D0%B1%D0%BE%D1%82%D0%BE%D1%82%D0%B5%D1%85%D0%BD%D0%B8%D0%BA%D0%B0_%D0%B2_%D0%BF%D1%80%D0%BE%D0%BC%D1%8B/7m5uEAAQBAJ?hl=ru&gbpv=0 (Дата обращения: 19.03.2025)
- Прилипка В. «Цифровая революция. Путь к автоматизации и росту бизнеса» — URL: https://www.google.ru/books/edition/%D0%A6%D0%B8%D1%84%D1%80%D0%BE%D0%B2%D0%B0%D1%8F_%D1%80%D0%B5%D0%B2%D0%BE%D0%BB%D1%8E%D1%86%D0%B8%D1%8F_%D0%9F%D1%83/SQKkEQAAQBAJ?hl=ru&gbpv=0 (Дата обращения: 19.03.2025)

© Горячкин Борис Сергеевич (bsgor@mail.ru); Калюта Никита Игоревич (nekitce@mail.ru)
Журнал «Современная наука: актуальные проблемы теории и практики»