

УДК 62-752.2
DOI: <https://doi.org/10.26518/2071-7296-2022-19-4-474-483>
EDN: GYYWCD
Научная статья



СТЕЛЛАЖНЫЙ КРАН-ШТАБЕЛЕР С ПОВОРОТНОЙ СТРЕЛОЙ

М. С. Корытов*, А. Е. Безродина

Сибирский государственный автомобильно-дорожный университет (СибАДИ),
г. Омск, Россия

kms142@mail.ru, <http://orcid.org/0000-0002-5104-7568>

likasedova@list.ru, <http://orcid.org/0000-0001-6362-8557>

*ответственный автор

АННОТАЦИЯ

Введение. Стеллажные краны-штабелеры являются основной подъемно-транспортной машиной для обслуживания многоуровневых стеллажных складов. От их эффективности зависит продуктивность и экономичность работы склада. Традиционная конструкция крана-штабелера включает ходовую тележку, которая движется по рельсам на полу склада, установленную вертикально на тележке колонну, по которой поднимается каретка с грузозахватным устройством и грузом. Недостатками традиционной конструкции крана являются сравнительно большая масса тележки, необходимость ее перемещения вместе с колонной в горизонтальном направлении при перемещении по складу, сравнительно большой расход энергии, необходимость усиления пола склада. Крановые рельсовые пути на полу склада необходимо очищать от падающих сверху предметов, что сопряжено с остановкой работы крана и снижает производительность.

Материалы и методы. Конструкция крана-штабелера связана с формой его рабочего пространства. В целях совершенствования крана-штабелера была разработана его конструкция на основе поворотной стрелы с противовесом, при работе которой не требуются рельсовые крановые пути. Кран предложенной конструкции способен обслуживать склады в ангарах полукруглой формы. Для двух складов: традиционной прямоугольной и полукруглой форм был выполнен сравнительный анализ сумм геометрических расстояний при перемещении грузозахватного устройства из точки загрузки в выбранные случайным образом целевые ячейки. В качестве критерия сравнения использовалась сумма декартовых расстояний перемещений грузозахватного устройства между точкой загрузки склада и целевыми точками, выбираемыми случайным образом по закону равномерного распределения. Исследовались три вида циклов работы кранов – простой одиночный, двойной и смешанный.

Результаты. Приведены сравнительные диаграммы значений критерия. Установлено, что при всех видах исследованных циклов, в наибольшей степени при работе по одиночному циклу, применение крана предложенной конструкции при одинаковой вместимости склада существенно уменьшает суммарное геометрическое расстояние, которое необходимо пройти грузозахватному приспособлению.

Обсуждение и заключение. Уменьшение суммы геометрических расстояний перемещения грузозахватного устройства нового крана позволяет сделать заключение, что затраты времени на перемещения, определяющие производительность выполняемых краном работ, а также сопряженные с ними затраты энергии, могут быть существенно снижены. Снижение энергетических затрат возможно за счет замены поступательного перемещения массивной ходовой тележки на вращательное движение уравновешенной стрелы сравнительно небольшой массы у крана предложенной конструкции. Не тратится время на регулярную очистку крановых путей, сопряженную с остановкой крана. Количество пар трения в предложенной конструкции крана уменьшено по сравнению с традиционной.

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА: кран-штабелер, стеллажный, стрела, противовес, полукруглый ангар.

БЛАГОДАРНОСТИ. Авторы статьи выражают благодарность за нелегкий труд и экспертное мнение рецензенту, работавшему с данной статьей.

Статья поступила в редакцию 28.02.2022; одобрена после рецензирования 18.03.2022; принята к публикации 27.07.2022.

Авторы прочитали и одобрили окончательный вариант рукописи.

Прозрачность финансовой деятельности: авторы не имеют финансовой заинтересованности в представленных материалах и методах. Конфликт интересов отсутствует.

Для цитирования: Корытов М. С., Безродина А. Е. Стеллажный кран-штабелер с поворотной стрелой // Вестник СибАДИ. 2022. Т.19, № 4 (86). С. 474-483. <https://doi.org/10.26518/2071-7296-2022-19-3-474-483>

© Корытов М. С., Безродина А. Е., 2022



Контент доступен под лицензией
Creative Commons Attribution 4.0 License.

Original article
DOI: <https://doi.org/10.26518/2071-7296-2022-19-4-474-483>
EDN: GYYWCD

SWING JIB RACK STACKER CRANE

Mikhail S. Korytov*, Angela E. Bezrodina

*Siberian State Automobile and Highway University (SibADI),
Omsk, Russia*

kms142@mail.ru, <http://orcid.org/0000-0002-5104-7568>

likasedova@list.ru, <http://orcid.org/0000-0001-6362-8557>

**corresponding author*

ABSTRACT

Introduction. Rack stacker cranes are the main hoisting and transport machine for maintenance of multi-level rack warehouses. The efficiency and profitability of the warehouse depends on their efficiency. The traditional design of a rack stacker crane includes a trolley that moves along the rails on the floor of a warehouse, a column mounted vertically on the trolley, along which a carriage with a load gripping device and a load rises. The disadvantages of the traditional crane design are the relatively large mass of the trolley, the need to move it along with the column in a horizontal direction when moving around the warehouse, the relatively high energy consumption and the need to strengthen the floor of the warehouse. The crane rail tracks on the floor of the warehouse must be cleared of objects falling from above, which is associated with stopping the operation of the crane and reducing productivity.

Materials and Methods. The design of a stacker crane is related to the shape of its working space. In order to improve the stacker crane, its design was developed on the basis of a jib with a counterweight, which does not require rail crane tracks. The crane of the proposed design is capable of storage in the hangars of a semicircular shape. For two warehouses: traditional rectangular and semicircular shapes, a comparative analysis of the sums of geometric distances was performed when the load gripping device moved from the loading point to randomly selected target cells. As a comparison criterion, the sum of the Cartesian distances of the load gripping device movements between the warehouse loading point and the target points, randomly selected according to the law of uniform distribution, was used. Three types of crane operation cycles were studied – simple single, double and mixed.

Results. Comparative diagrams of criterion values are given. It has been established that for all types of cycles studied, to the greatest extent when working on a single cycle, the use of a crane of the proposed design with the same storage capacity significantly reduces the total geometric distance that the load gripping device must pass.

Discussion and conclusions. Reducing the sum of the geometric distances of movement of the load handling device of the new crane allows to conclude that the time spent on the movements that determine the productivity of the work performed by the crane, as well as the energy costs associated with them, can be significantly reduced. Reducing energy costs is possible by replacing the translational movement of a massive undercarriage with the rotational movement of a balanced jib of a relatively small mass at the crane of the proposed design. Time is not wasted on regular cleaning of the crane tracks, associated with stopping the crane. The number of friction pairs in the proposed design of the crane is reduced compared with the traditional one.

KEYWORDS: stacker crane, rack, jib, counterweight, semicircular hangar.

ACKNOWLEDGMENTS: The authors of the article express their gratitude for the reviewer's hard work and expert opinion.

The article was submitted 28.02.2022; approved after reviewing 18.03.2022; accepted for publication 27.07. 2022.

The authors have read and approved the final manuscript.

Financial transparency: the authors have no financial interest in the presented materials or methods. There is no conflict of interest.

For citation: Korytov M.S., Bezrodina A.E. Swing jip rack stacker crane. The Russian Automobile and Highway Industry Journal. 2022; 19 (4): 474-483. <https://doi.org/10.26518/2071-7296-2022-19-4-474-483>

© Korytov M. S., Bezrodina A. E., 2022



Content is available under the license
Creative Commons Attribution 4.0 License.

ВВЕДЕНИЕ

Важной и неотъемлемой частью логистической системы поставок материалов и заготовок в машиностроительном производстве, товаров народного потребления и продуктов питания во всем мире являются стеллажные многоярусные склады [1]. В подобных многоярусных складах и логистических центрах используют стальные либо бетонные полы, армированные стальной сеткой [2], поскольку в дополнение к статическим нагрузкам полы таких складских помещений подвергаются значительным динамическим нагрузкам, возникающим от перемещения по ним кранов-штабелеров. Металлические плиты или железобетон, армированный стальной сеткой, применяемые для таких строительных проектов, имеют относительно высокую себестоимость изготовления [3].

Краны-штабелеры, используемые для обслуживания стеллажных многоярусных складах традиционной конструкции, представляют собой подъемно-транспортные машины,

основным ходовым элементом которых выступает тележка, перемещающаяся по напольному рельсовому крановому пути, расположенному между двумя вертикальными рядами стеллажей [4]. На тележке вертикально располагается колонна, по которой перемещается каретка грузоподъемного механизма, перемещающаяся по колонне в вертикальном направлении (рисунок 1). На каретке расположено грузозахватное устройство с перемещаемым грузом [5]. Грузозахватное приспособление может иметь различную конструкцию для захвата разных видов грузов.

Наличие на колонне верхней направляющей с роликами и, соответственно, верхнего рельса, не является обязательным во всех конструкциях кранов-штабелеров, однако их отсутствие при значительной высоте колонны может приводить к деформациям и вибрациям колонны и расположенных на ней других узлов крана-штабелера [6]. Вес колонны целесообразно минимизировать по экономическим соображениям для уменьшения затрат энергии при перемещении краном грузов [7].

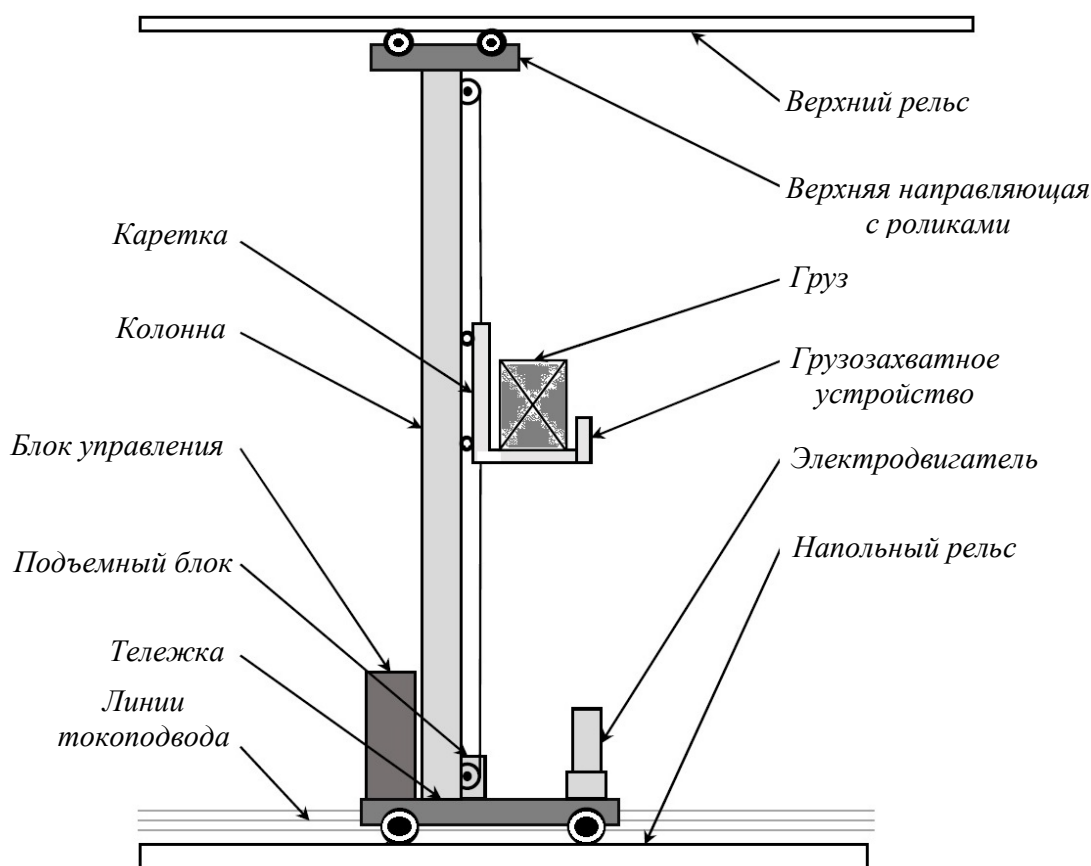


Рисунок 1 – Стеллажный кран-штабелер традиционной конструкции [9]

Figure 1 – Traditional design of a rack stacker crane [9]

Применение кранов-штабелеров предполагает полную или частичную автоматизацию работы склада [8]. Автоматизированный склад для хранения паллетированных грузов представляет собой стеллажи с ячейками хранения, расположенными в несколько ярусов или уровней (рисунок 2). Такие подъемно-транспортные средства, как стеллажные краны-штабелеры, наиболее широко используются в автоматизированных многоуровневых складских системах для погрузочно-разгрузочных работ: транспортировки в вертикальном и горизонтальном направлениях, закладки на хранение и извлечения грузов. Необходимо отметить, что современный стеллажный кран-штабелер обслуживает как минимум два стеллажа (см. рисунок 2), для чего грузозахватное устройство имеет возможность выдвижения в обе

стороны относительно плоскости движения тележки. Ширина ходовой тележки не превышает ширину прохода между стеллажами. Ходовая тележка имеет как минимум два колеса, которые катятся по рельсу, расположенному на полу склада (велосипедный кран).

Направлениями совершенствования кранов-штабелеров в настоящее время являются: повышение экономичности, неразрывно связанное с повышением производительности кранов, снижение энергоемкости перемещений грузов, а также повышение точности позиционирования грузов. С этой целью стеллажные краны-штабелеры обычно представляют собой легкие конструкции, включающие в себя гибкие колонны мачтового типа [9]. Имеется тенденция к постоянному увеличению высоты кранов-штабелеров [10].



Рисунок 2 – Рабочее пространство крана-штабелера традиционной конструкции, склад для хранения паллетированных грузов

Источник: Режим доступа: <https://www.mm-logistik.vogel.de/ssi-schaefer-fritz-schaefer-gmbh-c-163709/> (дата обращения: 20.02.2022)

Figure 2 – Working space of the traditional stacker crane, palletized cargo storage
Source: Available at: <https://www.mm-logistik.vogel.de/ssi-schaefer-fritz-schaefer-gmbh-c-163709/> (assessed: 20.02.2022)

Для снижения затрат энергии при работе стеллажных кранов-штабелеров, особенно работающих на многоярусных складах большой высоты, предлагаются различные подходы, в том числе предлагается энергосбережение за счет использования регенерации потенциальной энергии при опускании складываемых грузов [11]. Оценка производительности, надежности, точности, затрат времени и энергии автоматизированных систем погрузочно-разгрузочных работ, главным звеном которых выступают стеллажные краны-штабелеры, является актуальной темой при проведении сравнительных исследований различных систем и конструкций данных видов кранов¹ [12].

В англоязычных статьях применительно к стеллажным кранам-штабелерам была сформулирована научная проблема, которая получила название проблемы крана-штабелера (stacker crane problem). Она заключается в оптимальной маршрутизации работы крана-штабелера, т. е. построении маршрута, в том числе составного, с минимальными затратами времени и/или энергии [13]. Проблема маршрутизации усложняется, если рассматриваются сложные, составные циклы крана-штабелера, неполная загрузка склада, грузы различной массы и т. п. Частным случаем данной задачи выступает задача о кране-штабелере, работающем в складе, ячейки которого расположены на регулярной сетке и имеют одинаковое прямоугольное сечение.

Снижение энергопотребления работающего крана-штабелера зачастую имеет решающее значение для повышения как экономической, так и экологической устойчивости автоматизированных многоуровневых складских систем [14].

В работах [15, 16] предлагаются модели на основе генетического алгоритма для совместного планирования и оптимизации работы как отдельных кранов-штабелеров, так и прочих автоматически управляемых транспортных средств и рабочих станций комплектования в гибридном производственном цехе, который включает в себя автоматизированный стеллажный склад.

Часть работ по стеллажным кранам-штабелерам посвящена оптимизации управления их приводами в плане повышения устойчивости и точности позиционирования с учетом колебаний и вибраций колонны вследствие уменьшения ее массы и жесткости [9, 17].

Некоторые работы посвящены оптимизации конструкции колонны крана-штабелера, чтобы при минимальной массе обеспечить достаточную жесткость конструкции и снизить таким образом амплитуду неуправляемых колебаний и вибраций колонны [5, 18].

Для автоматизированных складов, которые обслуживают одновременно два или более стеллажных крана-штабелера, имеющих совместную рабочую область, актуальной является проблема предотвращения столкновений [19].

В работе [20] предложено оптимизировать рабочее пространство хранения товаров, т. е. форму склада. Результаты данного исследования показали, что оптимизация рабочего пространства и оптимизация маршрута работы крана-штабелера могут повысить общую эффективность работы. Эти результаты подтверждают гипотезу о том, что повысить эффективность работы стеллажного крана-штабелера можно, используя комплексный подход, который заключается в изменении и совершенствовании как конструкции самого крана-штабелера, так и формы рабочего пространства, которое данный кран обслуживает.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

Поскольку форма рабочего пространства, которое обслуживает стеллажный кран-штабелер, неразрывно связана с его конструкцией, для повышения эффективности работы кранов-штабелеров на складах средней и малой вместимости в СибАДИ была предложена и разработана новая конструкция стеллажного крана-штабелера с поворотной стрелой и противовесом (рисунок 3)².

¹ Безродина А.Е. Краны-штабелеры: классификация, назначение, тенденции развития / А.Е. Безродина, М.С. Корытов // Образование. Транспорт. Инновации. Строительство: сборник материалов IV Национальной научно-практической конференции. Омск: СибАДИ, 2021. С. 78–82. URL: https://elibrary.ru/download/elibrary_46355521_89395120.pdf (дата обращения: 20.02.2022).

² Пат. 209045 Российская Федерация, МПК B66C 23/00, B65G 1/04. Стреловой стеллажный кран-штабелер / Корытов М. С., Безродина А. Е.; заявитель и патентообладатель Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Сибирский государственный автомобильно-дорожный университет (СибАДИ)» (RU); № 2021110085; заявл. 13.04.21; опубл. 31.01.22. Бюл. № 4. 8 с.

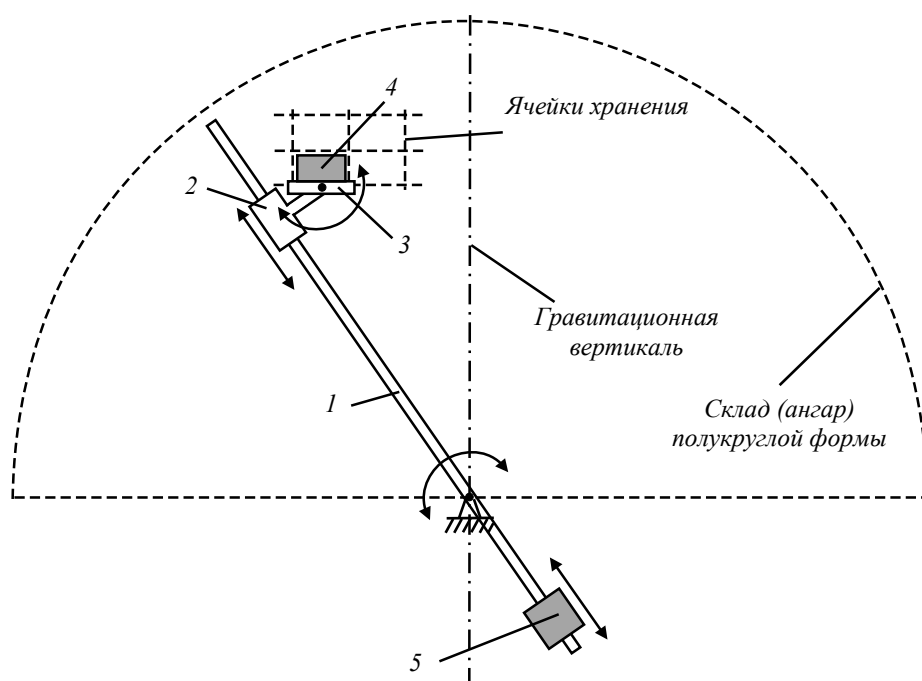


Рисунок 3 – Предложенная конструкция крана-штабелера с поворотной стрелой и противовесом
Источник: составлено авторами.

Figure 3 – Proposed swing jib stacker crane design and counterweight
Source: compiled by the authors.

Традиционная конструкция стеллажного крана-штабелера имеет целый ряд недостатков, среди которых невозможность применения внутри складских сооружений, имеющих полукруглую форму свода, арочные ангары, в которых стеллажи расположены под сводом. Неповоротная колонна крана-штабелера традиционной конструкции имеет постоянную высоту и всегда ориентирована вертикально. Энергозатраты крана-штабелера традиционной конструкции повышены, поскольку для горизонтального перемещения вдоль стеллажей ему необходимо каждый раз перемещать ходовую тележку, обладающую сравнительно большой массой.

Кран-штабелер с поворотной стрелой (см. рисунок 3) в отличие от традиционной конструкции, не содержит ходовой тележки. Он включает в себя стрелу 1, совершающую повороты вокруг горизонтальной оси, которая находится в центре окружности свода полукруглого ангара. Стрела 1 является в данной конструкции аналогом колонны в традиционной конструкции. По направляющим стрелы 1 перемещается в радиальном направлении подвижная грузовая каретка 2. На грузовой каретке 2 закреплено грузозахватное приспособление 3,

на котором размещается транспортируемый груз 4 (в случае перемещения с грузом). По направляющим стрелы 1, с противоположной от оси вращения стороны, также в радиальном направлении перемещается противовес 5.

Вертикальная плоскость возможных положений стрелы расположена между вертикальными плоскостями торцов двух стеллажей, обслуживаемых краном. Точка загрузки склада (точка ввода-вывода грузов) для предложенной конструкции крана должна располагаться максимально близко к оси вращения стрелы. Отметим, что в стеллажном складе для крана-штабелера традиционной конструкции, имеющем прямоугольную форму, точка загрузки обычно располагается в первом вертикальном ряду стеллажей, также на самом нижнем уровне (рисунок 4).

Для двух складов традиционной прямоугольной и полукруглой форм был выполнен сравнительный анализ сумм геометрических расстояний при перемещениях грузозахватного устройства из точки загрузки в выбранные случайным образом целевые ячейки складов. Приведенные в качестве примеров на рисунке 4 два склада имели размеры ячеек: ширина 1 м, высота 1,02 м (без учета уменьшения

свободного пространства в ячейках за счет толщины перекрытий и боковых стенок). Количество ячеек при данных размерах было одинаковым: 324.

При указанном одинаковом количестве ячеек радиус полукруглого склада для крана предлагаемой конструкции составил 15 м. Склад прямоугольной формы имел размеры: в единицах 18×18 ячеек, или $18 \times 18,36$ м (ширина $\times$ высота).

РЕЗУЛЬТАТЫ

Сравнение результатов работы двух конструкций кранов проводилось по критерию суммы декартовых расстояний S для циклов из 10^7 случайных перемещений грузозахватного устройства. Номер целевой ячейки (двух целевых ячеек в двойном цикле) выбирался из общего количества ячеек склада как случайное целое число от 1 до 324 с равномерным законом распределения.

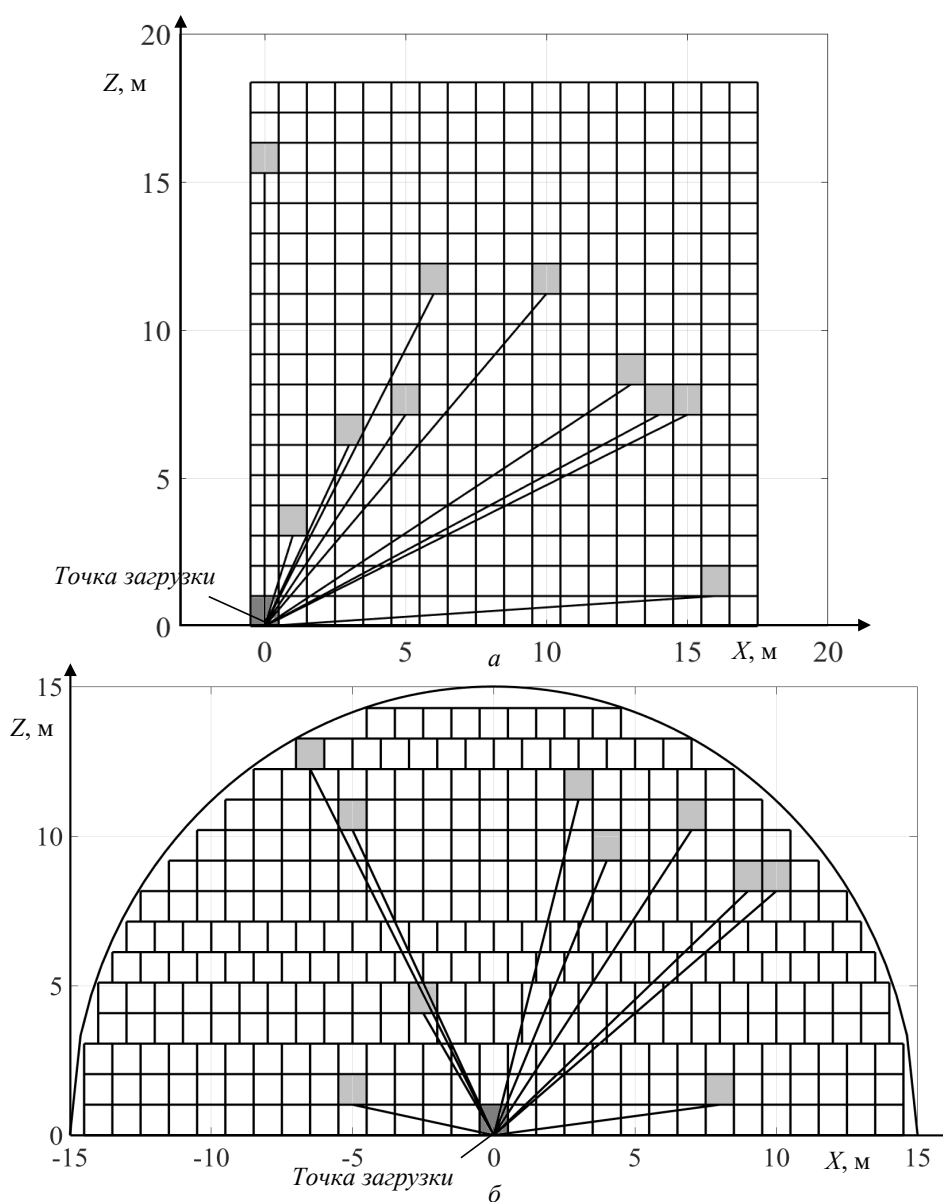


Рисунок 4 – Примеры складов различной формы и одинаковой вместимости для кранов-штабелеров: а – традиционной конструкции; б – предложенной конструкции
Источник: составлено авторами.

Figure 4 – Examples of warehouses of different shapes and the same capacity for stacker cranes of traditional (a) and proposed (b) structures
Source: compiled by the authors.

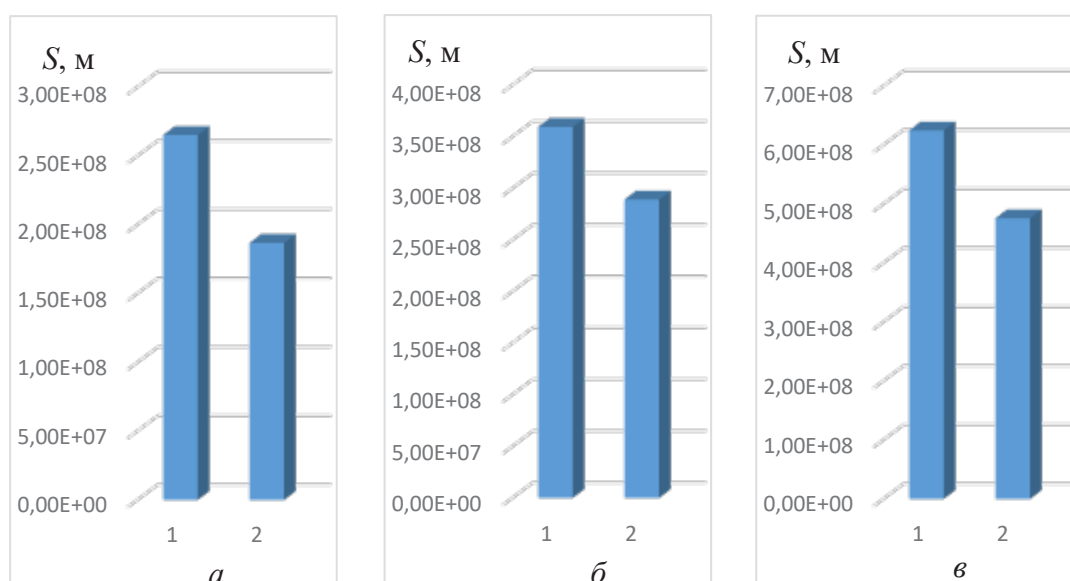


Рисунок 5 – Суммы декартовых расстояний S для 10^7 случайных циклов перемещений крана-штабелера традиционной (1) и предложенной (2) конструкций: а – простой одиночный цикл; б – двойной цикл; в – смешанный цикл
Источник: составлено авторами.

Figure 5 – S Cartesian distances sums for 10^7 random cycles of stacker crane movements of traditional (1) and proposed (2) structures: simple single cycle; b) double cycle; c) mixed cycle
Source: compiled by the authors.

Рассматривались три варианта циклов: 1) простой одиночный цикл (точка загрузки – целевая ячейка – точка загрузки); 2) двойной цикл (точка загрузки – целевая ячейка № 1 – целевая ячейка № 2 – точка загрузки); 3) смешанный цикл (чередуются простой одиночный и двойной циклы).

На рисунке 4 показаны в качестве примера 10 первых случайных траекторий перемещения грузозахватного устройства в простом одиночном цикле для кранов-штабелеров двух конструкций. На рисунке 5 приведены результаты в виде сумм декартовых расстояний перемещений грузозахватного устройства для трех указанных видов циклов работы кранов-штабелеров.

ОБСУЖДЕНИЕ И ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Анализ диаграмм, приведенных на рисунке 5, показывает, что для всех трех видов циклов перемещения имеет место снижение суммы декартовых расстояний S для крана-штабелера предложенной конструкции относительно крана-штабелера традиционной конструкции. При одиночном цикле значение критерия S для предложенной конструкции составляет 70,4% от значения критерия для традиционной конструкции. Для двойного и смешанного циклов значения S для предложенной кон-

струкции составляют 80,38 и 76,15% от значения критерия для традиционной конструкции соответственно.

Уменьшение суммы геометрических расстояний перемещения грузозахватного устройства крана-штабелера предложенной конструкции с поворотной стрелой при одинаковой вместимости склада и количестве циклов позволяет предполагать, что затраты времени на данные перемещения, определяющие производительность выполняемых краном работ, а также затраты энергии, могут быть существенно снижены. Поскольку затраты времени и энергии на перемещение безусловно коррелируют с геометрическим расстоянием перемещения.

Использование стеллажного крана-штабелера новой конструкции обеспечивает возможность его применения внутри складского помещения, имеющего форму в виде полукруглого арочного ангара, когда стеллажи, каждый из которых имеет переменную высоту и форму, близкую к полукруглой, располагаются вдоль арки ангара.

Снижение энергетических затрат при периодических подъемах стрелы и грузов происходит за счет замены поступательного перемещения массивной ходовой тележки с колонной у крана традиционной конструкции на вращательное движение уравновешенной стрелы сравнительно небольшой массы у крана предложен-

ной конструкции. Для уравнивания стрелы относительно оси ее вращения используется противовес, он снижает либо полностью устраняет затраты энергии на подъем общего центра масс всех подвижных звеньев крана с грузом. Также снижение затрат энергии происходит за счет уменьшения количества подвижных соединений звеньев крана с неподвижными опорами. Минимум четыре высокоскоростных вращательных соединения (двух колес ходовой тележки с рельсовыми опорами и двух роликов сверху на колонне с направляющими) прототипа заменяются на два шарнирных низкоскоростных вращательных соединения устройства с противовесом (соединение стрелы с неподвижной стойкой и соединение грузозахватного приспособления с грузовой кареткой), что снижает общие потери энергии на трение.

Отсутствие необходимости в прокладке подкрановых и потолочных рельсовых путей значительно снижает требования к качеству пола складского помещения, что уменьшает общие капитальные затраты на строительство склада. Повышение производительности крана предложенной конструкции происходит и за счет уменьшения частоты периодического осмотра и очистки поверхности рельсов и пола склада от предметов, падающих сверху вследствие нарушения упаковки грузов, что сопряжено с остановкой работы крана традиционной конструкции.

При проведении дальнейших исследований предполагается разработка математических моделей и уточнение затрат энергии при перемещениях крана-штабелера предложенной конструкции сравнительно с традиционной конструкцией.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ / REFERENCES

1. Hruševská D., Adla R., Krayem S., Pivnička M. Event-B model for increasing the efficiency of warehouse management. *Polish journal of management studies*. 2018. Vol. 17. No. 2 :63-74. DOI: 10.17512/pjms.2018.17.2.06
2. Schulz M., Oettel V. Use of steel fibre reinforced concrete in floor slab for automated high-bay warehouses. *Beton- und Stahlbetonbau*. 2021. Vol. 116. pp. 70-76. DOI: 10.1002/best.202100008
3. Geyer E., Arndt T., Mehling U. Construction of a new logistics center in Fliesen. *Beton- und Stahlbetonbau*. 2021. Vol. 116. pp. 88-90. DOI: 10.1002/best.202100003
4. Ecker L., Malzer T., Wahrburg A., Schoberl M. Observer design for a single mast stacker crane. *AT – Automatisierungstechnik*. 2021. Vol. 69. No. 9. pp. 806-816. DOI: 10.1515/auto-2021-0018
5. Baryshnikova O. Creating an efficient stacker crane design. *2020 IEEE 7th International Conference on Industrial Engineering and Applications (ICIEA)*. 2020. pp. 25-28. DOI: 10.1109/ICIEA49774.2020.9101916
6. Galkina A., Schlacher K. Flatness-based model predictive control with linear programming for a single mast stacker crane. *IFAC-PapersOnLine*. 2018. Vol. 51. pp. 31-36. DOI: 10.1016/j.ifacol.2018.03.006
7. Rucker A., Rief J., Fottner J. An investigation of mean energy demand, performance and reference cycles for stacker cranes. *FME Transactions*. 2020. Vol. 48. No. 2. pp. 307-312. DOI: 10.5937/fme2002307R
8. Huang Q., Ye Y., Zhu Z., Lu T. Route-optimization based storage allocation algorithm in intelligent high-bay warehouses. *2021 4th International conference on intelligent autonomous systems (ICOIAS 2021)*. 2021. pp. 240-245. DOI: 10.1109/ICOIAS53694.2021.00050
9. Rucker A., Rief J., Fottner J. Development of a method for the energy efficiency determination of stacker cranes in automated high-bay warehouses. *FME Transactions*. 2020. Vol. 48. No. 4. pp. 753-760. DOI: 10.5937/fme2004753R
10. Zaerpour N., Gharehgozli A., De Koster R. Vertical expansion: a solution for future container terminals. *Transportation Science*. 2019. Vol. 53. No. 5. pp. 1235-1251. DOI: 10.1287/trsc.2018.0884
11. Jerman B., Zrnica N., Jenko M., Lerher T. Energy regeneration in automated high bay warehouse with stacker cranes. *Tehniski vjesnik-technical gazette*. 2017. Vol. 24. No. 5. pp. 1411-1416. DOI: 10.17559/TV-20161219112306
12. Boysen N., Stephan K. A survey on single crane scheduling in automated storage/retrieval systems // *European journal of operational research*. 2016. Vol. 254. DOI: 10.1016/j.ejor.2016.04.008
13. Graf B. Preemptive stacker crane problem: Extending tree-based properties and construction heuristics. *European journal of operational research*. 2021. Vol. 292. No. 2, pp. 532-547. DOI: 10.1016/j.ejor.2020.10.051
14. Fang Z., Mao J. Energy-efficient elevating transfer vehicle routing for automated multi-level material handling systems. *IEEE transactions on automation science and engineering*. 2020. Vol. 17. No. 3. pp. 1107-1123. DOI: 10.1109/TASE.2019.2921631
15. Sun B., Zhang X., Qiao H., Li G., Chen Y. Multi-type resources collaborative scheduling in automated warehouse with fuzzy processing time. *Journal of intelligent & fuzzy systems*. 2020. Vol. 39. No. 1. pp. 899-910. DOI: 10.3233/JIFS-191827
16. Wang Y., Man R., Zhao X., Liu H. Modeling of parallel movement for deep-lane unit load autonomous shuttle and stacker crane warehousing systems. *Processes*. 2020. Vol. 8. No. 1. pp. 80. DOI: 10.3390/pr8010080
17. Ismail J., Liu S. Nonlinear model predictive control of a distributed parameter system with time-varying soft constraints. *18th European Control Conference (ECC)*. 2019. pp. 2783-2788. DOI: 10.23919/ECC.2019.8795610
18. Jiao H., Li F., Jiang Z., Li Y. Periodic Topology Optimization of a Stacker Crane. *IEEE Access*, 2019, Vol. 7, pp.186553-186562. DOI: 10.1109/ACCESS.2019.2960327
19. Ma C., Zhou B. Dual-rail-guided vehicle scheduling in an automated storage and retrieval system with loading and collision-avoidance constraints. *Engineering computations*. 2021. Vol. 38. No. 8. pp. 3290-3324. DOI: 10.1108/EC-11-2019-0517

20. Dong Y., Yaohua W., Wenkai M. Optimization of storage location assignment in automated warehouse. *Microprocessors and Microsystems*, 2021, Vol. 80, pp. 103356. DOI: 10.1016/j.micpro.2020.103356

ВКЛАД СОАВТОРОВ

Корытов М. С. Общая идея работы и новой конструкции крана-штабелера, разработка программного кода для проверки гипотезы, написание заключения.

Безродина А. Е. Исследование состояния воя, написание введения, разработка новой конструкции крана-штабелера, разработка программного кода для проверки гипотезы.

COAUTHORS' CONTRIBUTION

Mikhail S. Korytov. The general idea of the work and a new design of a stacker crane, the development of a program code for testing a hypothesis, writing a conclusion.

Angela E. Bezrodina. Researching the issue, writing an introduction, developing a new stacker crane design, developing a software product to test the hypothesis.

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

Корытов Михаил Сергеевич – д-р техн. наук, доц.

Безродина Ангела Евгеньевна – аспирант каф. АиЭУ.

INFORMATION ABOUT AUTHORS

Mikhail S. Korytov – Dr. of Sci., Associate Professor, Automobiles and Energy Systems Department.

Angela E. Bezrodina – post-graduate student, Automobiles and Energy Systems Department.