

DERIVATION OF THE ANALYTICAL EXPRESSION FOR THE COMPLEXITY OF CONTAINER RETRIEVAL FROM A STACK

A. L. Kuznetsov¹, A. I. Karol², A. A. Radchenko¹

¹ Admiral Makarov State University of Maritime and Inland Shipping,
St. Petersburg, Russian Federation

² FSEI HE «Saint Petersburg State University», St. Petersburg, Russian Federation

A container terminal warehouse complex is a sophisticated system that performs the functions of servicing container flows passing through it. At large terminals, tens or even hundreds of thousands of containers are stored at any given time in multi-tiered stacks to minimize the extremely limited area of the port territory. This necessary storage approach increases the labour intensity of container retrieval operations for loading onto ships or adjacent transport vehicles. Increasing stack height complicates the procedure by blocking target containers with other containers, requiring these to be moved to gain access. This leads to an increase in the number of additional movements per commercial (i. e., customer-paid) movement to retrieve the target container. Consequently, productivity decreases and operational costs increase. In particular, an increase in auxiliary movements reduces container selectivity — defined as the ratio of commercial movements to the total number of movements — and increases labour intensity, defined as its inverse. The values of selectivity and labour intensity largely depend on the type of technological equipment used and storage organisation schemes. To assess the operational characteristics of designed port warehouse complexes and determine the necessary fleet size of technological equipment, it is necessary to develop quantitative metrics that allow estimation of the labour intensity of warehousing operations under different transport and technological schemes. Within this study, the authors have derived analytical expressions for all classes of warehousing equipment in the form of combinatorial formulas, which can serve as objective and easily computable metrics. The use of these metrics enables more accurate calculations at the technological design, planning, and management stages of container terminals. Thus, more accurate forecasting of operational indicators is thereby achieved, taking into account the specifics of the technologies and organisational solutions used.

Keywords: container terminal, warehouse, labour intensity of operations, transport-technological scheme, assessment of selectivity.

For citation:

Kuznetsov, Alexander L., A. I. Karol and A. A. Radchenko “Derivation of the analytical expression for the complexity of container retrieval from a stack.” *Vestnik Gosudarstvennogo universiteta morskogo i rechnogo flota imeni admirala S. O. Makarova* 17.3 (2025):425–434. DOI: 10.21821/2309-5180-2025-17-3-425-434.

УДК 656.615

ВЫВОД АНАЛИТИЧЕСКОЙ ЗАВИСИМОСТИ ТРУДОЕМКОСТИ ОПЕРАЦИЙ ПО ВЫБОРКЕ КОНТЕЙНЕРОВ ИЗ ШТАБЕЛЯ

А. Л. Кузнецов¹, А. И. Кароль², А. А. Радченко¹

¹ ФГБОУ ВО «ГУМРФ имени адмирала С. О. Макарова»,
Санкт-Петербург, Российская Федерация

² ФГБОУ ВО «Санкт-Петербургский государственный университет»
Санкт-Петербург, Российская Федерация

В работе выполнено исследование складского комплекса контейнерного терминала, представляющего собой сложную систему, выполняющую функции обслуживания проходящих через него потоков. Отмечается, что хранение на крупных терминалах, где постоянно находятся десятки и даже порой сотни тысяч контейнеров, осуществляется в многоярусных штабелях для минимизации крайне дефицитной площади портовой территории. Такой вынужденный подход к складированию ведет к увеличению трудоемкости операций по выборке контейнеров из штабелей для погрузки на судно или на подвижной состав смежного транспорта. Подчеркивается, что рост высоты штабеля усложняет соответствующую процедуру вследствие блокировки целевых контейнеров другими контейнерами, что вынуждает перемещать последние

для освобождения к ним доступа. Это приводит к увеличению количества дополнительных перемещений при выполнении одного коммерческого (оплачиваемого клиентом) движения по выборке целевого контейнера и соответственно к снижению производительности и росту себестоимости операций. В частности, отмечается, что увеличение числа вспомогательных перемещений снижает селективность контейнеров, определяемую отношением числа «коммерческих» перемещений к общему их числу и повышает трудоемкость, определяемую обратной к ней величиной. Получены аналитические выражения для всех классов складского оборудования в виде комбинаторных зависимостей, которые могут служить требуемыми объективными и просто вычисляемыми метриками. Использование этих метрик обеспечивает возможность выполнения более точных расчетов на стадии технологического проектирования, планирования и управления контейнерами терминалами. Тем самым достигается возможность более точного прогнозирования эксплуатационных показателей, учитывающих специфику используемых технологий и организационных решений.

Ключевые слова: контейнерный терминал, склад, трудоемкость операций, транспортно-технологическая схема, оценка селективности.

Для цитирования:

Кузнецов А. Л. Вывод аналитической зависимости трудоемкости операций по выборке контейнеров из штабеля / А. Л. Кузнецов, А. И. Кароль, А. А. Радченко // Вестник Государственного университета морского и речного флота имени адмирала С. О. Макарова. — 2025. — Т. 17. — № 3. — С. 425–434. DOI: 10.21821/2309-5180-2025-17-3-425-434. — EDN SIJDWX.

Введение (Introduction)

Технологическое оборудование, работающее на складе контейнерного терминала, разделяется на два крупных класса: машины с верхним доступом, к которому относятся складские перегружатели на рельсовом ходу (rail mounted gantry (RMG)), на пневмоходу (rubber tyred gantry (RTG)), автоконтейнеровозы (straddle carrier (SC)), и машины с боковым доступом, к которым относятся фронтальные погрузчики (front loaders, front loader truck (FLT)), штабелеры порожних контейнеров (empty container handlers ((ECH) и ричстакеры (reachstacker (RS)) [1], [2]. Машины первой группы являются наиболее производительными и эффективными, а потому используются на наиболее крупных современных терминалах [3]–[5]. Фронтальные погрузчики практически исчезают из практики работы, штабелеры используются исключительно для работы с порожними контейнерами [6]–[8]. Единственным значимым конкурентом из группы с боковым доступом остается ричстакер, обеспечивающий высокую операционную гибкость и универсальность [5]–[11].

Основным эксплуатационным различием между ричстакером и машинами с верхним доступом является трудоемкость операций по формированию и разборке штабеля контейнеров. Все они работают со штабелем в форме параллелепипеда, укладывая контейнеры в ряды, ярусы и секции. Все перегружатели имеют доступ к каждому столбцу над наземными ячейками (слотами) штабеля. Как следствие, они могут выбрать любой контейнер, находящийся в верхнем ярусе, за одно движение. Контейнер, находящийся во втором сверху ярусе, требует двух движений: перемещения блокирующего и выборки целевого. Самый нижний контейнер в столбце потребует h движений, где h есть высота штабеля.

Таким образом, общее число движений при работе над вертикальным столбцом высотой h составит $N = 1 + 2 + \dots + h = \frac{(h+1)}{2}h$ движений, а среднее число движений на один контейнер — $n = \frac{N}{h} = \frac{(h+1)}{2}$. Это простое выражение, которое является справедливым для всех машин с верхним доступом, часто используется в теоретических и практических расчетах, связанных с технологически проектированием терминалов [6]–[9].

Ричстакер, доступ к которому к целевому контейнеру могут блокировать находящиеся в ближних рядах другие контейнеры, должен выполнять значительно большую работу по их перемещению. Это представляется достаточно очевидным и интуитивно объяснимым, однако количественная оценка этого эффекта в литературе отсутствует [2]–[9]. В данном исследовании предлагается аналитический вывод формулы, позволяющей выполнять объективную оценку этого важнейшего параметра.

Методы и материалы (Methods and Materials)

Допустим, существует штабель шириной w рядов и высотой h ярусов, предназначенный для работы ричстакера. Рассмотрим отдельную секцию этого штабеля. Для определенности предположим, что доступ к ней осуществляется с одной стороны, например, слева. (Противоположная зеркально симметричная часть будет иметь доступ справа, и ее обслуживание будет подчиняться тем же законам). Очевидно, что верхний контейнер крайнего левого столбца будет выбран за одно движение, второй — за два и т. д. Таким образом, обработка крайнего столбца не отличается по трудоемкости от выборки машинами с верхним доступом.

Нахождение целевого контейнера во втором столбце вызывает необходимость удаления блокирующих доступ к нему контейнеров, число которых зависит от «глубины залегания» целевого контейнера (рис. 1). На этом рисунке красным цветом выделен целевой контейнер, желтым — перемещаемые контейнеры, белым — не подвергающиеся перемещению контейнеры, синим цветом отмечены целиком удаляемые столбцы, блокирующие доступ к рабочим зонам.



Рис. 1. Трудоемкость выборки контейнера из секции штабеля

Обозначив через $N_k, 1 \leq k \leq w$ количество движений, необходимых для выборки всех элементов столбца с номером k , через $N(h, w)$ — общее количество движений для обработки элементов w столбцов, запишем:

$$N(h, w) = N_1 + N_2 + \dots + N_w. \quad (1)$$

Среднее количество движений, необходимых для выборки произвольного контейнера, обозначим через $n(h, w)$:

$$n(h, w) = \frac{N(h, w)}{hw}. \quad (2)$$

Как видно из рис. 3, количество движений, необходимых для выборки всех элементов первого столбца, составит

$$N_1 = 1 + 2 + \dots + h = \sum_{k=1}^h k = 1 \frac{h+1}{2} h. \quad (3)$$

При этом $n(h, 1) = \frac{h+1}{2}$.

Количество движений, необходимых для выборки элементов второго столбца, вдвое больше. Таким образом,

$$\begin{aligned} N_2 &= 2 \frac{h+1}{2} h; \\ N(h, 2) &= 3 \frac{h+1}{2} h; \\ n(h, 2) &= \frac{3(h+1)}{4}. \end{aligned} \quad (4)$$

Для выборки k элемента третьего столбца необходимо (при $k < h$) дополнительно снимать $k + 1$ элемент первого столбца. Тогда можно записать:

$$\begin{aligned} N_3 &= 3(1 + 2 + \dots + h) + h - 1 = 3 \frac{(h+1)}{2} h + h - 1; \\ N(h, 3) &= 3h(h+1) + h - 1; \\ n(h, 3) &= h + \frac{4}{3} - \frac{1}{3h}. \end{aligned}$$

Для $w \leq 3$ зависимость $n(w)$ можно записать в виде следующей формулы:

$$n(h, w) = \frac{N(h, w)}{hw} = \frac{(h+1)(w+1)}{4} + \frac{1}{2} \frac{(w-1)(w-2)(h-1)}{hw}. \quad (5)$$

Для строки m ($m < h$) столбца k ($k > 3$) необходимо предварительно разобрать $(k-3)$ столбца, что потребует $(k-3)h$ движений. При этом такое же количество движений необходимо для каждого элемента столбца, и, таким образом,

$$N_k = N_3 + (k-3)h^2.$$

Теперь

$$N(h, w) = (N_1 + N_2 + N_3) + (N_4 + \dots + N_w). \quad (6)$$

Ранее полученная сумма в первых скобках составила $N(h, 3) = 3h(h+1) + h - 1$.

Вычислим сумму во вторых скобках формулы (6):

$$\begin{aligned} (N_4 + \dots + N_w) &= N_3(w-3) + \sum_{k=4}^w (k-3)h^2 = \\ &= N_3(w-3) + \frac{1}{2}(w-3)(w-2)h^2, \end{aligned} \quad (7)$$

откуда окончательно получим

$$\begin{aligned} N(h, w) &= (N_1 + N_2 + N_3) + (N_4 + \dots + N_w) = N(h, 3) + N_3(w-3) + \frac{1}{2}(w-3)(w-2)h^2 = \\ &= 3h(h+1) + h - 1 + \left(3 \frac{(h+1)}{2} h + h - 1 \right) (w-3) + \frac{1}{2}(w-3)(w-2)h^2. \end{aligned} \quad (8)$$

Соответственно среднее количество движений для $w > 3$ составит

$$\begin{aligned} n(h, w) &= \frac{N(h, w)}{hw} = \\ &= \frac{1}{2} h(w-3) \left(1 - \frac{2}{w} \right) + \frac{3}{2} (h+1) \left(1 - \frac{1}{w} \right) + \left(1 - \frac{1}{h} \right) \left(1 - \frac{2}{w} \right). \end{aligned} \quad (9)$$

В качестве побочного результата следует отметить, что если для выборки контейнеров используется фронтальный погрузчик, к которому относится штабелер, то первый ряд контейнеров выбирается за те же $N_1 = \frac{(h+1)h}{2}$. Для второго и всех последующих рядов необходимо полностью убрать блокирующие $(w-1)$ рядов, в которых находится $(w-1)h$ контейнеров, после чего выполнить те же N_1 операций. Таким образом, для этого подтипа машин с боковым доступом общее количество движений для разбора ряда w составит

$$N(h, w) = \sum_{k=1}^w [(k-1)h^2 + N_1] = \frac{(h+1)hw}{2} + \frac{(w-1)wh^2}{2} = \frac{h^2w + hw + h^2w^2 - h^2w}{2} = \frac{hw + h^2w^2}{2} = \frac{hw(hw+1)}{2} \quad (10)$$

и, соответственно, среднее количество движений

$$n(h, w) = \frac{N(h, w)}{hw} = \frac{(hw+1)}{2}. \quad (11)$$

На рис. 2, а приведено семейство кривых $n(w) = F(w, *)$, где в качестве параметра фигурирует высота штабеля.

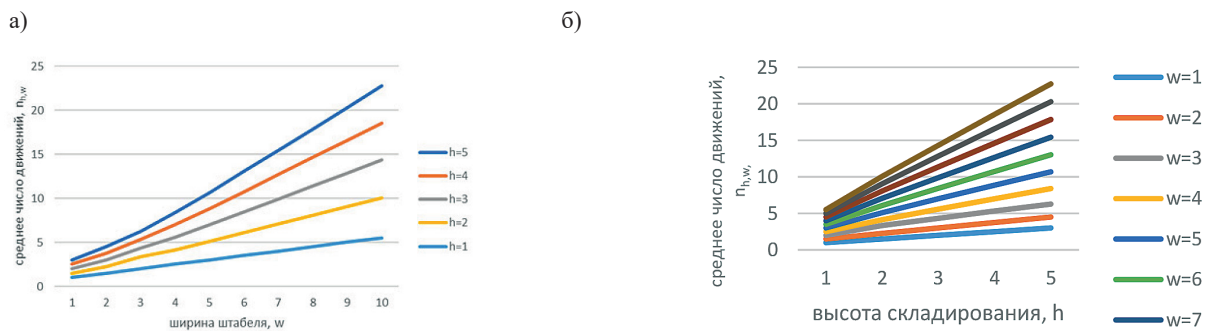


Рис. 2. Трудоемкость выборки как функция:
а — ширины и высоты штабеля под RS; б — высоты и ширины штабеля под RS

На рис. 2, б то же семейство кривых изображено как функция от высоты складирования: $n(h) = F(*, h)$ с шириной штабеля в качестве параметра.

Поскольку для значения $w=1$ график совпадает с оценкой для машин с верхним доступом, это значение можно использовать в качестве базового для сравнения. На рис. 3 полученная функция $n(h, w) = F(w, h)$ представлена в виде поверхности.

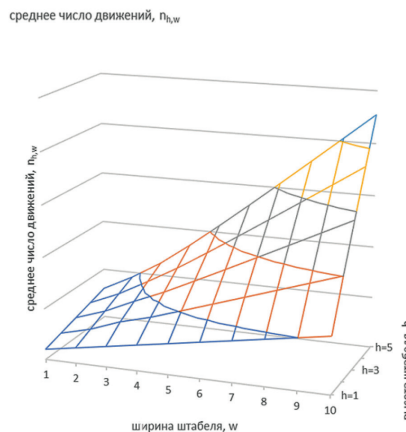


Рис. 3. Трудоемкость выборки
 $n(h, w) = F(w, h)$

Результатом проведенного исследования являются формулы для оценки трудоемкости операций при всех существующих схемах складирования контейнеров.

Результаты и обсуждение (Results and discussion)

Как видно из рис. 4, при типичной высоте штабеля в 5–6 ярусов, средняя трудоемкость выборки машинами с верхним доступом составляет чуть более трех движений. При той же высоте складирования и типичной ширине штабеля трудоемкость операции выборки для ричстакера составляет уже 16–17 движений. При этом необходимо отметить, что машины с верхним доступом обычно выполняют перемещение блокирующих контейнеров в пределах одной и той же секции, в то время как ричстакер вынужден выполнять сложные маневры, перемещая контейнеры в соседние секции, что увеличивает не только количество движений, но и их длительность.

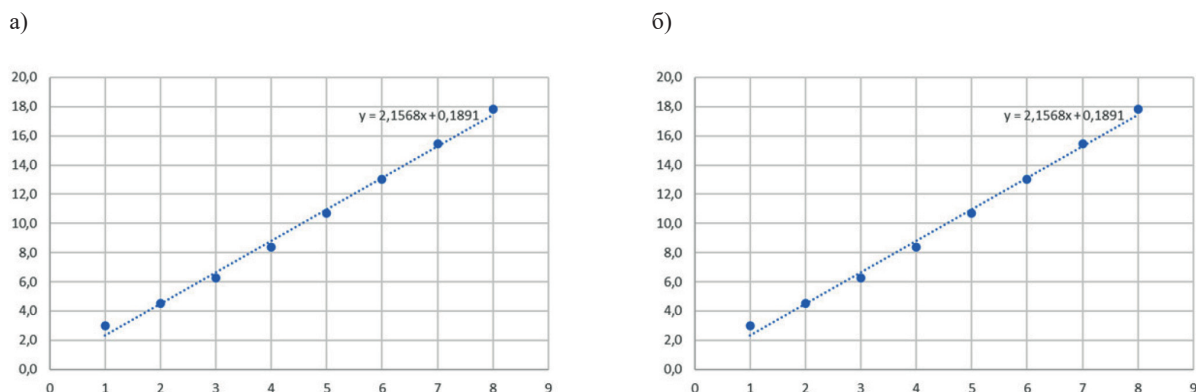


Рис. 4. Пример аппроксимации полученных зависимостей:
а — линейная; б — квадратичная

Полученные формулы (10), (11) являются точными аналитическими зависимостями, однако их использование на практике может оказаться неудобным вследствие громоздкости. С приемлемой для практики точности можно выполнить аппроксимацию полученных зависимостей, линейную или полиномиальную. При этом можно выполнить подобные действия или подобное как для двух отдельных участков, так и для всей кривой. На рис. 4 приведены соответствующие результаты для штабеля высотой $h = 5$.

Если принять приближенную формулу для первых трех элементов в виде $n(h, w) \approx \frac{(w+1)(h+1)}{4}$, то для этого случая $n(h, w) = \frac{(w+1)(h+1)}{4} = \frac{(w+1)(5+1)}{4} = 1,5w + 1,5$, что близко к аппроксимированному значению $n(h, w) = 1,6w + 1,3$ (рис. 4, а). Из рис. 4 видно, что для данной высоты складирования в качестве простейшего приближения всей кривой может быть использована формула $n(h, w) = 2,16w + 0,19$. Наконец, можно построить аппроксимирующую плоскость для полученной зависимости $n(h, w) = F(w, h)$. В такой постановке необходимо определить коэффициенты A, B, C линейной аппроксимирующей функции для множества значений n_i :

$$U(h, w) = Ah + Bw + C, \quad (12)$$

минимизирующие невязку на множестве значений n_i :

$$\sigma(A, B, C) = \sum_i (Ah_i + Bw_i + C - n_i)^2. \quad (13)$$

Функция невязки зависит от трех переменных A, B, C . Необходимые условия минимума этой функции определяются равенством нулю частных производных по каждой из этих переменных:

$$\frac{d}{dA} \sigma(A, B, C) = 0;$$

$$\begin{aligned}\frac{d}{dB}\sigma(A, B, C) &= 0; \\ \frac{d}{dC}\sigma(A, B, C) &= 0.\end{aligned}\quad (14)$$

Это приводит к системе уравнений:

$$\begin{aligned}\sum_i (Ah_i + Bw_i + C - n_i)h_i &= 0; \\ \sum_i (Ah_i + Bw_i + C - n_i)w_i &= 0; \\ \sum_i (Ah_i + Bw_i + C - n_i) &= 0\end{aligned}$$

или

$$\begin{aligned}\sum_i (Ah_i^2 + Bw_ih_i + Ch_i) &= \sum_i n_ih_i; \\ \sum_i (Ah_iw_i + Aw_i^2 + Cw_i) &= \sum_i n_iw_i; \\ \sum_i (Ah_i + Bw_i + C) &= \sum_i n_i\end{aligned}$$

или

$$\begin{aligned}A\sum_i h_i^2 + B\sum_i w_ih_i + C\sum_i h_i &= \sum_i n_ih_i; \\ A\sum_i w_ih_i + B\sum_i w_i^2 + C\sum_i w_i &= \sum_i n_iw_i; \\ A\sum_i h_i + B\sum_i w_i + C\sum_i 1 &= \sum_i n_i.\end{aligned}\quad (15)$$

Решение полученной системы уравнений дает значения коэффициентов для искомой аппроксимирующей плоскости:

$$U(h, w) = 2,2h + 1,4w - 6,5.$$

Соответствующая поверхность представлена на рис. 5.

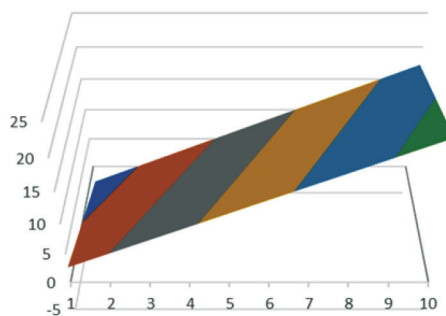


Рис. 5. Линейная аппроксимация полученных результатов

В то же время аппроксимация с помощью эмпирической зависимости:

$$n(w, h) = \frac{(w+1)(h+1)}{4}, \quad (16)$$

на всем пространстве задания переменных оказывается существенно более точной (рис. 6).

а)

б)

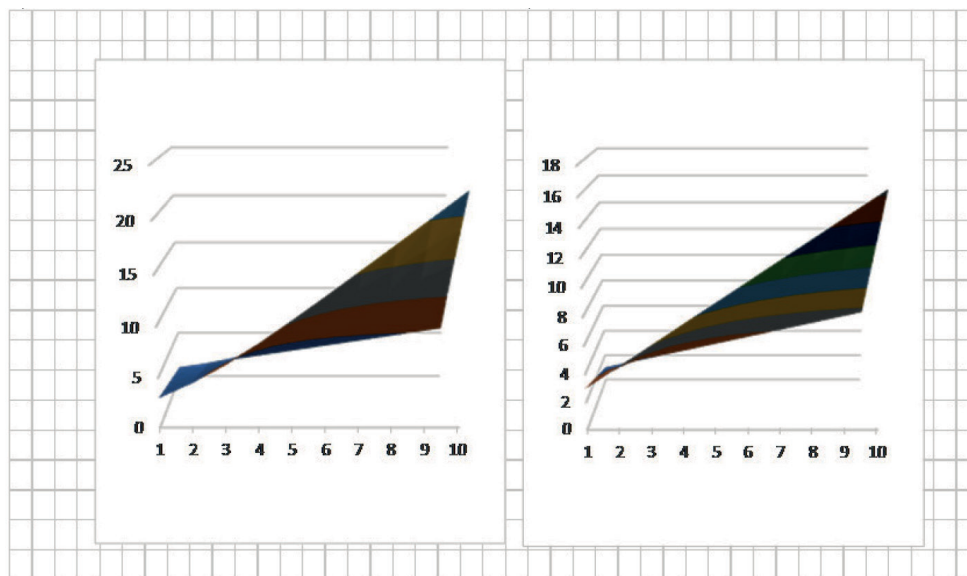


Рис. 6. Полученные результаты:
а — аналитическая зависимость; б — эмпирическая аппроксимация

Это, скорее всего, объясняется тем, что математическая природа комбинаторных зависимостей, проявляющаяся в виде появления полиномиальных членов, делает линейную аппроксимацию принципиально неточной.

Выводы (Summary)

На основе проведенного исследования можно сделать следующие выводы:

1. Выведена точная аналитическая зависимость трудоемкости выборки контейнеров из штабеля машинами с различным доступом к штабелю, которая сводится к комбинаторной схеме выборки с возвращением:

– для машин с верхним это $n(w, h) = \frac{(h+1)}{2}$;

– для фронтального погрузчика это $n(w, h) = \frac{(hw+1)}{2}$;

– для ричтстакера выведенная точная зависимость $n(h, w)$ описывается сложным аналитическим выражением, неудобным для практики.

2. Поскольку комбинаторная схема, использованная для теоретического вывода, является абстракцией, в исследовании была определена задача нахождения «инженерного» приближения полученной зависимости.

3. Показано, что решением является эмпирическая оценка среднего числа движений $n(w, h) \approx \frac{(h+1)(w+1)}{4}$.

4. Использование полученных оценок позволяет объективно сравнивать эксплуатационные характеристики операций по выборке контейнеров из штабеля машинами с верхним и боковым доступом, что было бы невозможно без полученных результатов.

5. Полученные эмпирические зависимости могут использоваться в технологическом проектировании контейнерных терминалов различного назначения с целью оценки численности парка складировующего оборудования и при проведении сравнительных экономических расчетов.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Кузнецов А. Л. Морские контейнерные перевозки: монография / А. Л. Кузнецов, А. В. Кириченко, О. В. Соляков, А. Д. Семенов. — М.: ООО «МОРКНИГА», 2019. — 413 с. — EDN FPZHLX.
2. Шаржуков И. О. Устойчивое развитие складской логистики с применением аналитики и моделирования для оптимизации процессов хранения / И. О. Шаржуков, Г. А. Некоз, Д. А. Сафаров, А. Н. Норкина // Финансовая безопасность — новые горизонты: Материалы X Международной научно-практической конференции Международного сетевого института в сфере ПОД/ФТ, Москва, 19–20 ноября 2024 года. — М.: Национальный исследовательский ядерный университет МИФИ, 2024. — С. 1052–1061. — EDN LCDRCR.
3. Кузнецов А. Л. Дискретно-событийное моделирование грузовых фронтов контейнерного терминала / А. Л. Кузнецов, А. В. Галин, Г. Б. Попов // Вестник государственного университета морского и речного флота им. адмирала С. О. Макарова. — 2023. — Т. 15. — № 4. — С. 589–602. DOI: 10.21821/2309-5180-2023-15-4-589-602. — EDN TRJAZE.
4. Кузнецов А. Л. Математическое описание задачи анализа пропускной способности морских портов / А. Л. Кузнецов, А. В. Кириченко, Р. В. Кузнецов // Вестник государственного университета морского и речного флота им. адмирала С. О. Макарова. — 2022. — Т. 14. — № 3. — С. 327–335. DOI: 10.21821/2309-5180-2022-14-3-327-335. — EDN SBKQUN.
5. Кузнецов А. Л. Аналитическое уточнение метода статистических испытаний для исследования морских портов / А. Л. Кузнецов, А. В. Кириченко, А. Д. Семенов // Вестник государственного университета морского и речного флота имени адмирала С. О. Макарова. — 2022. — Т. 14. — № 6. — С. 905–914. DOI: 10.21821/2309-5180-2022-14-6-905-914. — EDN CSBMQL.
6. Güven, C. Modelling and optimisation of online container stacking with operational constraints / C. Güven, D. T. Eliyi // Maritime Policy & Management. — 2019. — Vol. 46. — Is. 2. — Pp. 201–216. DOI: 10.1080/03088839.2018.1450529.
7. Scholl J. On the quality of simple measures predicting block relocations in container yards / J. Scholl, D. Boywitz, N. B. and // International Journal of Production Research. — 2018. — Vol. 56. — Is. 1–2. — Pp. 60–71. DOI: 10.1080/00207543.2017.1394595.
8. Watanabe I. Container Terminal Planning: A Theoretical Approach / I. Watanabe. — World Cargo News, 2001. — 245 p.
9. Carten A. Tactical and strategic planning for a container terminal: Modelling issues within a discrete event simulation approach / A. Cartenì, S. Luca // Simulation Modelling Practice and Theory. — 2012. — Vol. 21. — Is. 1. — Pp. 123–145. DOI: 10.1016/j.simpat.2011.10.005.
10. Андреева Л. А. Задачи совершенствования методов технологического проектирования морских торговых портов в новых условиях / Л. А. Андреева, А. Л. Кузнецов, А. М. Сампиев, А. Д. Семенов // Транспортное дело России. — 2024. — № 1. — С. 164–166. — EDN CERHHD.
11. Tsao Y.-C. A multi-objective mixed robust possibilistic flexible programming approach for sustainable sea-port-dry port network design under an uncertain environment / Y.-C. Tsao, V.-V. Thanh // Transportation Research Part E: Logistics and Transportation Review. — 2019. — Vol. 124. — Pp. 13–39. DOI: 10.1016/j.tre.2019.02.006.

REFERENCES

1. Kuznetsov, A. L., A. V. Kirichenko, O. V. Solyakov and A. D. Semenov. *Morskie konteynerynye perevozki: Monografiya* Moskva: ООО «MORKNIGA», 2019: 413.
2. Sharzhukov, I. O., G. A. Nekoz, D. A. Safarov and A. N. Norkina. “Sustainable development of warehouse logistics using analytics and modeling to optimize storage processes.” *Finansovaya bezopasnost' — novye gorizonty: Materialy X Mezhdunarodnoy nauchno-prakticheskoy konferentsii Mezhdunarodnogo setevogo instituta v sfere POD/FT, Moskva, 19–20 noyabrya 2024 goda*. Moskva: Natsional'nyy issledovatel'skiy yadernyy universitet MIFI, 2024: 1052–1061.
3. Kuznetsov, A. L., A. V. Galin and G. B. Popov. “Discrete-event modelling of container terminal cargo fronts.” *Vestnik gosudarstvennogo universiteta morskogo i rechnogo flota im. admirala S. O. Makarova* 15.4 (2023): 589–602. DOI: 10.21821/2309-5180-2023-15-4-589-602.
4. Kuznetsov, A. L., A. V. Kirichenko and R. V. Kuznetsov. “Mathematical description of the sea ports throughput assessment.” *Vestnik gosudarstvennogo universiteta morskogo i rechnogo flota im. admirala S. O. Makarova* 14.3 (2022): 327–335. DOI: 10.21821/2309-5180-2022-14-3-327-335.

5. Kuznetsov, A. L., A. V. Kirichenko and A. D. Semenov. "Analytical improvement of the statistical experiments method for the purposes of ports design." *Vestnik gosudarstvennogo universiteta morskogo i rechnogo flota im. admirala S. O. Makarova* 14.6 (2022): 905–914. DOI: 10.21821/2309-5180-2022-14-6-905-914.
6. Güven, C. and D. T. Eliyi. "Modelling and optimisation of online container stacking with operational constraints." *Maritime Policy & Management* 46.2 (2019): 201–216. DOI: 10.1080/03088839.2018.1450529.
7. Scholl, J., D. Boywitz and N. B. and. "On the quality of simple measures predicting block relocations in container yards." *International Journal of Production Research* 56.1–2 (2018): 60–71. DOI: 10.1080/00207543.2017.1394595.
8. Watanabe, I. *Container Terminal Planning: A Theoretical Approach* World Cargo News, 2001.
9. Carten, A. and S. . Luca. "Tactical and strategic planning for a container terminal: Modelling issues within a discrete event simulation approach." *Simulation Modelling Practice and Theory* 21.1 (2012): 123–145. DOI: 10.1016/j.simpat.2011.10.005.
10. Andreeva, L. A., A. L. Kuznetsov, A. M. Sampiev and A. D. Semenov. "Tasks of improving methods of technological design of trade sea ports in new conditions." *Transport Business of Russia* 1 (2024): 164–166.
11. Tsao, Y.-C. and V.-V. Thanh. "A multi-objective mixed robust possibilistic flexible programming approach for sustainable seaport-dry port network design under an uncertain environment." *Transportation Research Part E: Logistics and Transportation Review* 124 (2019): 13–39. DOI: 10.1016/j.tre.2019.02.006.

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

Кузнецов Александр Львович —

д. т. н, профессор,
ФГБОУ ВО «ГУМРФ имени адмирала
С. О. Макарова»
198035, Российская Федерация, Санкт-Петербург,
ул. Двинская, 5/7
e-mail: thunder1950@yandex.ru

Кароль Андрей Игоревич —

к. ф.-м.н, доцент
ФГБОУ ВО «Санкт-Петербургский
государственный университет»,
199034, Российская Федерация, Санкт-Петербург,
Университетская наб., д. 7–9
e-mail: kaf_pgt@gumrf.ru

Радченко Анна Александровна —

старший преподаватель,
ФГБОУ ВО «ГУМРФ имени адмирала
С. О. Макарова»,
198035, Российская Федерация, Санкт-Петербург,
ул. Двинская, 5/7
e-mail: kaf_pgt@gumrf.ru

INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Kuznetsov Alexander L. —

Dr. of Technical Sciences, professor,
Admiral Makarov State University of Maritime
and Inland Shipping
5/7 Dvinskaya str, St. Petersburg, 198035,
Russian Federation
e-mail: thunder1950@yandex.ru

Karol Andrey I. —

PhD of Physical and Mathematical Sciences,
associate professor,
FSEI HE «Saint Petersburg State University»
7/9 Universitetskaya Emb., St Petersburg, 199034,
Russian Federation
e-mail: kaf_pgt@gumrf.ru

Radchenko Anna A. —

Senior lecturer,
Admiral Makarov State University of Maritime
and Inland Shipping
5/7 Dvinskaya str, St. Petersburg, 198035,
Russian Federation
e-mail: kaf_pgt@gumrf.ru

Статья поступила в редакцию 28 марта 2025 г.

Received: Mar. 28, 2025.