

DOI: 10.21821/2309-5180-2020-12-5-853-860

CONTAINER TERMINAL STACK MANAGEMENT STRATEGY

A. L. Kuznetsov¹, A. Z. Borevich², A. A. Radchenko¹

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

² — Peter the Great St. Petersburg Polytechnic University,
St. Petersburg, Russian Federation

The problem of managing the stack of a container terminal is the topic of many domestic and foreign studies. Despite this, the optimal solution in the form of a unified and justified operational strategy has not been found yet. In this paper, one of the particular issues is explored, namely the influence of allocation of the stack height over slots relative to the average value. The relevance of this issue is explained by the fact that the size of the warehouse of a container terminal is traditionally designed to store a certain maximum number of containers. The practice of modern container terminals shows that most of the time the actual storage volume in the warehouse is within 50–70 % of the maximum capacity of a one-time location of containers at the terminal, and approaching 80 % occupancy is considered an alarming operational situation. But in case of incomplete occupancy of the container site, the issue about the optimal strategy for forming the stacks, which minimizes the laboriousness of processing the cargo traffic passing through the warehouse, arises. The parameter characterizing the indicated laboriousness is the average number of movements required to retrieve a container from a stack. In the paper, a storage strategy, which ensures the minimum laboriousness of selecting containers for a given storage volume, is analytically substantiated, as a result, it becomes possible to give reasonable recommendations on the containers arrangement in a stack when the terminal is not fully loaded. An analytical solution to the problem, including quantities such as storage height, number of movements and the distribution of containers by slots, is firstly considered. Further, the use of the statistical modeling method, which makes it possible to take into account the features caused by the scatter of physical and technological parameters, is substantiated and described. A description of using the simulation modeling methods that confirm the practical significance and adequacy of the proposed approach is considered at the end.

Keywords: terminal, freight traffic, containers, warehousing, laboriousness, mathematical modeling, statistical modeling, slot, height of the stack.

For citation:

Kuznetsov, Aleksandr L., Albert Z. Borevich, and Anna A. Radchenko. “Container terminal stack management strategy.” *Vestnik Gosudarstvennogo universiteta morskogo i rechnogo flota imeni admirala S. O. Makarova* 12.5 (2020): 853–860. DOI: 10.21821/2309-5180-2020-12-5-853-860.

УДК 656.615

СТРАТЕГИЯ УПРАВЛЕНИЯ ШТАБЕЛЕМ КОНТЕЙНЕРНОГО ТЕРМИНАЛА

А. Л. Кузнецов¹, А. З. Боревич², А. А. Радченко¹

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

² — Санкт-Петербургский Политехнический Университет Петра Великого,
Санкт-Петербург, Российская Федерация

Отмечается, что проблема управления штабелем контейнерного терминала является темой многих отечественных и зарубежных исследований, но несмотря на это, оптимальное решение в виде унифицированной и обоснованной операционной стратегии до сих пор не найдено. В данной работе исследуется один из частных вопросов, а именно влияние неравномерности распределения высоты штабеля по слотам относительно среднего значения. Актуальность этого вопроса объясняется тем, что размер склада контейнерного терминала традиционно рассчитан для хранения некоторого максимального количества контейнеров. Практика работы современных контейнерных терминалов показывает, что большую часть

времени реальный объем хранения на складе составляет 50–70 % от предельной емкости единовременного нахождения контейнеров на терминале, а приближение занятости к 80 % считается тревожной операционной ситуацией. Таким образом, при неполной занятости контейнерной площадки возникает вопрос об оптимальной стратегии формирования штабелей, минимизирующей трудоемкость обработки проходящего через склад грузопотока. Рассмотрен один из основных параметров, характеризующих указанную трудоемкость — среднее количество движений, необходимых для выборки контейнера из штабеля. Аналитически обоснована стратегия хранения, обеспечивающая минимальную трудоемкость выборки контейнеров при заданном объеме хранения, в результате чего появляется возможность дать мотивированные рекомендации по расположению контейнеров в штабеле при неполной загрузке терминала. Исследование начинается с рассмотрения аналитического решения задачи, включающей такие величины, как высота складирования, число движений и характер распределения контейнеров по слотам. Обосновано и описано использование метода статистического моделирования, позволяющего учесть особенности, вызванные разбросом физических и технологических параметров. Приведено описание использования методов имитационного моделирования, подтверждающих практическую значимость и адекватность предлагаемого подхода.

Ключевые слова: контейнерный терминал, трудоемкость выборки, математическое моделирование, операционная высота складирования.

Для цитирования:

Кузнецов А. Л. Стратегия управления штабелем контейнерного терминала / А. Л. Кузнецов, А. З. Борович, А. А. Радченко // Вестник Государственного университета морского и речного флота имени адмирала С. О. Макарова. — 2020. — Т. 12. — № 5. — С. 853–860. DOI: 10.21821/2309-5180-2020-12-5-853-860.

Введение (Introduction)

Современный контейнерный терминал должен эффективно обеспечивать выполнение комплекса складских и транспортно-экспедиционных услуг. Его задача состоит в объединении транспортного процесса, грузопереработки и временного складирования грузов при передаче их с магистрального на автомобильный и другие виды транспорта. Кроме того, терминалы должны быть приспособлены для прогрессивных методов переработки и хранения грузов, иметь развитое, обеспеченное новейшими цифровыми технологиями складское хозяйство, что, в свою очередь, позволит гарантировать экономичность, сохранность и повысить качество обслуживания грузовладельцев [1]–[3].

Новым импульсом к изучению научно-технических проблем контейнерных терминалов послужило развитие информационных технологий, в частности методов имитационного моделирования. В научных публикациях имеется описание моделей реальных и абстрактных терминалов, в которые встроены новейшие сложные механизмы, отражающие специфические особенности модулируемого объекта и избранные операционные стратегии [4], [5]. В то же время практическая деятельность операторов и проектировщиков контейнерных терминалов требует выявления базовых математических зависимостей, которые могут быть использованы для проектирования морских и сухих портов, оценки эффективности работы терминала, планирования и анализа оперативной деятельности, а также разработки ключевых показателей эффективности.

В теории и практике контейнерных терминалов одним из ключевых показателей является *средняя операционная высота складирования*, которая определяет трудоемкость выборки контейнеров [6]. В работах [7]–[10] рассмотрены математические зависимости среднего количества движений, необходимых для выборки одного контейнера в зависимости от средней высоты складирования. В то же время особенности технологии выполнения перегрузочных операций с контейнерами обуславливают значительные разбросы высот складирования в отдельных секциях штабеля. В результате одна и та же средняя высота складирования может обеспечиваться за счет различных вариантов размещения контейнеров, характеризующихся различными значениями высоты наземных слотов штабеля (рис. 1).

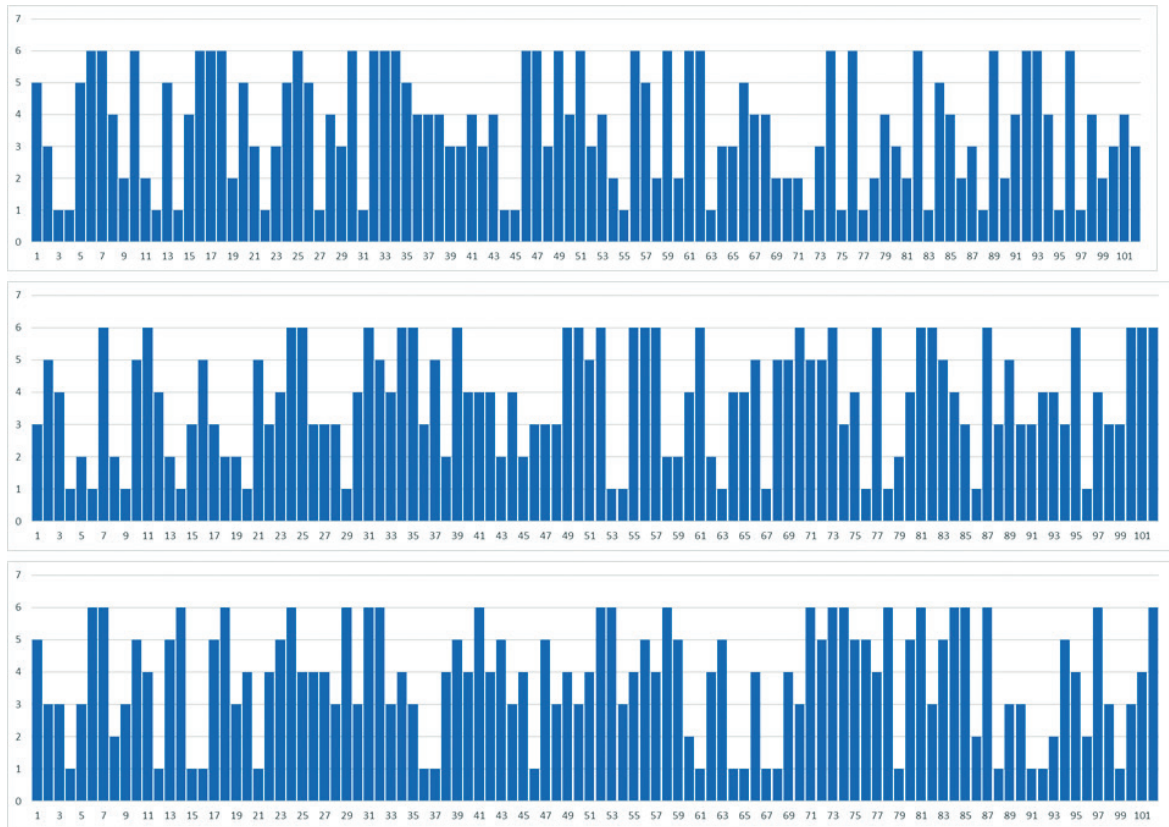


Рис. 1. Пример различных профилей штабеля с одинаковой средней высотой

Основными задачами данного исследования являются:

- математически доказать существенность влияния разбросов высоты складирования на трудоемкость выборки;
- определить зависимость среднего количества движений необходимых для выборки одного контейнера от вариации высот складирования контейнеров в отдельных секциях;
- оценить распределение среднего количества движений при различных формах контейнерного штабеля методами имитационного моделирования.

Методы и материалы (Methods and Materials)

1. *Аналитическое решение задачи.* При решении поставленных задач считается, что общее количество контейнеров на терминале, или операционный объем единовременного хранения, теми или иными методами определен. Пусть это заданное количество контейнеров N хранится над множеством наземных слотов общим числом S , тем самым формируя среднюю высоту складирования $h = \frac{N}{S}$. При этом над каждым отдельным слотом s складировается столбец с индивидуальным значением высоты h_s , так что $N = \sum_{s=1}^S h_s$. В каждом столбце s среднее число движений для выборки одного контейнера составляет величину $\frac{1+h_s}{2}$, а общее число движений для выборки всех контейнеров столбца — $n_s = h_s \frac{1+h_s}{2}$.

Общее количество движений, требуемых для выборки полного объема хранения контейнеров во всех столбцах, составляет, таким образом, величину $n = \sum_{s=1}^S h_s \frac{1+h_s}{2}$. Отсюда среднее число движений на контейнер определяется в виде

$$\begin{aligned}
 m_n &= \frac{n}{N} = \frac{\sum_{s=1}^S h_s \frac{1+h_s}{2}}{N} = \frac{1}{2} \frac{\sum_{s=1}^S (h_s(1+h_s))}{N} = \frac{1}{2} \frac{\sum_{s=1}^S (h_s + h_s^2)}{\sum_{s=1}^S h_s} = \\
 &= \frac{1}{2} \left(\frac{\sum_{s=1}^S h_s}{\sum_{s=1}^S h_s} + \frac{\sum_{s=1}^S (h_s^2)}{\sum_{s=1}^S h_s} \right) = \frac{1}{2} \left(1 + \frac{\sum_{s=1}^S (h_s^2)}{\sum_{s=1}^S h_s} \right) = \frac{1}{2} \left(1 + \frac{\sum_{s=1}^S (h_s^2)}{N} \right). \quad (1)
 \end{aligned}$$

Если контейнеры распределены по слотам равномерно, т. е. высота складирования одинакова над всеми слотами ($h_s = h$), то среднее число движений, необходимых для выборки контейнера из такого склада, составляет

$$m_0 = \frac{1}{2} \left(1 + \frac{\sum_{s=1}^S (h^2)}{\sum_{s=1}^S h} \right) = \frac{1+h}{2}. \quad (2)$$

Покажем, что равномерное заполнение штабеля $h_s = h$ обеспечивает искомое минимальное количество движений для выборки. Для этого рассмотрим разность $m_n - m_0$ и установим, что она всегда неотрицательна:

$$\begin{aligned}
 &\frac{1}{2} \left(1 + \frac{\sum_{s=1}^S (h_s^2)}{\sum_{s=1}^S h_s} \right) - \frac{1+h}{2}; \\
 &\frac{\sum_{s=1}^S (h_s^2)}{\sum_{s=1}^S h_s} - h; \\
 &\frac{\sum_{s=1}^S (h_s^2)}{\sum_{s=1}^S h_s} - \frac{H}{S}; \\
 &\frac{\sum_{s=1}^S (h_s^2)}{\sum_{s=1}^S h_s} - \frac{\sum_{s=1}^S h_s}{S}; \\
 &S \sum_{s=1}^S (h_s^2) - \left(\sum_{s=1}^S h_s \right)^2. \quad (3)
 \end{aligned}$$

Заметим, что

$$\left(\sum_{i=1}^n a_i \right)^2 = \sum_{i=1}^n a_i^2 + 2 \sum_{i=1}^n \sum_{j>i}^n a_i a_j. \quad (4)$$

Откуда получим:

$$S \sum_{s=1}^S (h_s^2) - \sum_{s=1}^S (h_s^2) - 2 \sum_{i=1}^S \sum_{j>i}^S h_i h_j;$$

$$(S-1) \sum_{s=1}^S (h_s^2) - 2 \sum_{i=1}^S \sum_{j>i}^S h_i h_j ;$$

$$\sum_{i=1}^S \sum_{j>i}^S (h_i - h_j)^2 \geq 0. \quad (5)$$

Из приведенного условия (5) следует, что $m_N = m_o + \frac{\sum_{i=1}^S \sum_{j>i}^S (h_i - h_j)^2}{2NS}$. Иными словами, это означает, что поправка, показывающая увеличение среднего числа движений по сравнению с равномерным распределением, зависит от «разброса» значений высот. Это увеличение обусловлено тем, что превышающие средние значения высоты дают бóльший вклад из-за квадратичной зависимости разностей, чем это компенсируют их отклонения в меньшую сторону.

Равномерное размещение контейнеров по слотам одно, а вариантов распределения N по S слотам очень много, а именно C_{N+s-1}^{s-1} . Получить для них аналитические зависимости становится невозможным, поэтому оценку трудоемкости выборки приходится производить *методами статистического моделирования*.

2. Статистическое моделирование. Суть метода статистических испытаний в данном случае состоит в генерации распределения заданного числа контейнеров N по доступным на складе S слотам. Генерация распределения выполняется по методу обратной функции с заданным значением математического ожидания $\mu = h = \frac{N}{S}$ и варьируемым значением дисперсии (или среднеквадратичного отклонения $\sigma = \sqrt{\delta}$). Оценка каждого сгенерированного варианта такого распределения может быть выполнена в отношении трудоемкости выборки контейнера с помощью получен-

ной аналитической зависимости $m_n = \frac{1}{2} \left(1 + \frac{\sum_{s=1}^S (h_s^2)}{N} \right)$.

В результате проведения статистически достоверного количества испытаний, для каждого варианта $\mu\sigma$ может быть построена гистограмма, характеризующая плотность распределения случайной величины — среднего числа движений на контейнер $n_{\mu\sigma}$. По данной гистограмме могут быть построены характеристические моменты распределения этой случайной величины, а именно ее среднее значение $M_{\mu\sigma}$ и дисперсия $\delta_{\mu\sigma}$. При одном и том же значении математического ожидания исходного распределения контейнеров по слотам μ обе эти величины будут зависеть от дисперсии δ . После проведения аналогичных серий статистических испытаний можно получить соответствующую зависимость в явном виде.

Результаты (Results)

На рис. 2 показаны результаты моделирования по методу статистических испытаний для математического ожидания (МО) с различной высотой складирования и характеристикой разброса, задаваемых средним квадратическим отклонением (СКО). Такие значения высот на практике не используются, и приведены здесь лишь для выявления действующих тенденций. На рис. 3 показаны результаты моделирования — гистограммы распределения среднего количества движений на контейнер (для распространенного варианта складирования со средней высотой яруса $h = 4$). Значения математического ожидания гистограмм, показанных на рис. 3 в виде функции от СКО исходного распределения высот, приведены на рис. 4.



Рис. 2. Зависимость среднего числа движений от разброса высоты складирования, $h = 10$

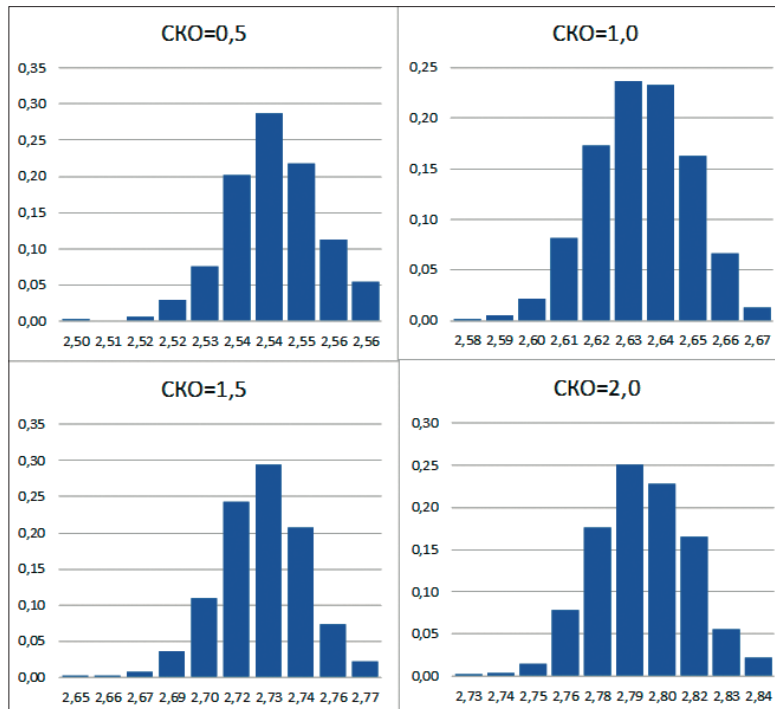


Рис. 3. Распределение количества движений в зависимости от разброса высоты складирования при средней высоте складирования, $h = 4$



Рис. 4. Значения математического ожидания гистограмм как функция от СКО исходного распределения высот

Из приведенных рис. 2–4 видно, что с ростом разброса высот складирования по слотам растет среднее количество движений, которое требуется для выборки из штабеля. Очевидно, что подобное имитационное моделирование можно выполнить для компонент, характеризующихся индивидуальными распределениями (МО и СКО).

Выводы (Conclusions)

На основании проведенного исследования можно сделать следующие выводы:

1. Аналитические расчеты и математическое моделирование являются дополняющими друг друга рабочими инструментами выявления важных закономерностей функционирования терминала.
2. Полученные с помощью этих инструментов оценки являются фундаментальными для построения операционных и финансовых показателей при проектировании и управлении контейнерными терминалами.
3. «Разброс» высоты складирования по слотам относительно среднего значения оказывает значительное влияние на трудоемкость технологических операций, повышая удельные затраты на перемещение контейнеров и увеличивая общие расходы терминала.
4. Имитационное моделирование необходимо внедрять в повседневную работу терминала, так как качество прогнозирования и оперативного планирования, необходимое для эффективного управления современным транспортным предприятием, не может быть получено иными способами.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Vis I. F. A. A comparative analysis of storage and retrieval equipment at a container terminal / I. F. A. Vis // International Journal of Production Economics. — 2006. — Vol. 103. — Is. 2. — Pp. 680–693. DOI: 10.1016/j.ijpe.2006.01.002.*
2. *Кириченко А. В. Морская контейнерная транспортно-технологическая система: монография / А. В. Кириченко [и др.]; под общ. ред. д-ра техн. наук, проф. А. В. Кириченко. — СПб.: Изд-во МАНЭБ, 2017. — 412 с.*
3. *Wiese J. A survey of container terminal characteristics and equipment types / J. Wiese, N. Klierer, L. Suhl // Paderborn: Decision Support & Operations Research Lab, Paderborn University. — 2009. — Working Paper 0901.*
4. *Sanen Y. A. Intelligent stacking as way out of congested yards? part 2 / Y. A. Sanen, R. Dekker // Port Technol Int 2007. — 2007. — Vol. 32. — Pp. 80–85.*
5. *Borgman B. Online rules for container stacking / B. Borgman, E. van Asperen, R. Dekker // OR spectrum. — 2010. — Vol. 32. — Is. 3. — Pp. 687–716. DOI: 10.1007/s00291-010-0205-4.*
6. *Zhen L. A review on yard management in container terminals / L. Zhen, X. Jiang, L.H. Lee, E. P. Chew // Industrial Engineering & Management Systems. — 2013. — Vol. 12. — No. 4. — Pp. 289–305. DOI: 10.7232/iems.2013.12.4.289.*
7. *Кузнецов А. Л. Анализ оптимизационных стратегий складирования контейнеров / А. Л. Кузнецов, А. Д. Семенов, А. З. Борович // Вестник Государственного университета морского и речного флота имени адмирала С. О. Макарова. — 2019. — Т. 11. — № 5. — С. 803–812. DOI: 10.21821/2309-5180-2019-11-5-803-812.*
8. *Кузнецов А. Л. Имитационное моделирование как инструмент расчета наземных контейнерных терминалов / А. Л. Кузнецов, А. В. Кириченко, А. С. Ткаченко, Г. Б. Попов // Вестник Астраханского государственного технического университета. Серия: Морская техника и технология. — 2018. — № 1. — С. 100–108. DOI: 10.24143/2073-1574-2018-1-100-108.*
9. *Кузнецов А. Л. Влияние технических ограничений перегрузочного оборудования на производительность операций / А. Л. Кузнецов, А. Д. Семенов, В. П. Левченко // Вестник Государственного университета морского и речного флота имени адмирала С. О. Макарова. — 2019. — Т. 11. — № 3. — С. 417–429. DOI: 10.21821/2309-5180-2019-11-3-417-429.*
10. *Gosasang V. Long-term container throughput forecast and equipment planning: the case of Bangkok Port / V. Gosasang, T. L. Yip, W. Chandraprakaikul // Maritime Business Review. — 2018. — Vol. 3. — No. 1. — Pp. 53–69. DOI: 10.1108/MABR-07-2017-0019.*

REFERENCES

1. Vis, Iris F. A. "A comparative analysis of storage and retrieval equipment at a container terminal." *International Journal of Production Economics* 103.2 (2006): 680–693. DOI: 10.1016/j.ijpe.2006.01.002
2. Kirichenko, A. V., et al. *Morskaya konteiner'naya transportno-tehnologicheskaya sistema: monografiya*. Edited by A. V. Kirichenko. SPb.: Izd-vo MANEB, 2017.
3. Wiese, Jörg, Natalia Kliewer, and Leena Suhl. "A survey of container terminal characteristics and equipment types." *Paderborn: Decision Support & Operations Research Lab, Paderborn University* (2009). Working Paper 0901.
4. Sanen, Y. A., and R. Dekker. "Intelligent stacking as way out of congested yards? Part 2." *Port Technology International* 32 (2007): 80–85.
5. Borgman, Bram, Eelco van Asperen, and Rommert Dekker. "Online rules for container stacking." *OR spectrum* 32.3 (2010): 687–716. DOI: 10.1007/s00291-010-0205-4.
6. Zhen, Lu, Xinjia Jiang, Loo Hay Lee, and Ek Peng Chew. "A review on yard management in container terminals." *Industrial Engineering & Management Systems* 12.4 (2013): 289–305. DOI: 10.7232/iems.2013.12.4.289.
7. Kuznetsov, Aleksandr L., Anton D. Semenov, and Albert Z. Borevich. "Analysis of optimization container stacking strategies." *Vestnik Gosudarstvennogo universiteta morskogo i rechnogo flota imeni admirala S. O. Makarova* 11.5 (2019): 803–812. DOI: 10.21821/2309-5180-2019-11-5-803-812.
8. Kuznetsov, Alexander L'vovich, Alexander Viktorovich Kirichenko, Andrei Stanislavovich Tkachenko, and German Borisovich Popov. "Simulation modelling as a dry cargo terminals' calculation tool." *Vestnik of Astrakhan State Technical University. Series: Marine Engineering and Technologies* 1 (2018): 100–108. DOI: 10.24143/2073-1574-2018-1-100-108.
9. Kuznetsov, Aleksandr L., Anton D. Semenov, and Veronika P. Levchenko. "The influence of container handling equipment technical limitations on the operations productivity." *Vestnik Gosudarstvennogo universiteta morskogo i rechnogo flota imeni admirala S. O. Makarova* 11.3 (2019): 417–429. DOI: 10.21821/2309-5180-2019-11-3-417-429.
10. Gosasang, Veerachai, Tsz Leung Yip, and Watcharavee Chandraprakaikul. "Long-term container throughput forecast and equipment planning: the case of Bangkok Port." *Maritime Business Review* 3.1 (2018): 53–69. DOI: 10.1108/MABR-07-2017-0019.

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

Кузнецов Александр Львович —
доктор технических наук, профессор,
ФГБОУ ВО «ГУМРФ имени
адмирала С. О. Макарова»
198035, Российская Федерация, Санкт-Петербург,
ул. Двинская, 5/7
e-mail: thunder1950@yandex.ru, kaf_pgt@gumrf.ru

Боревич Альберт Зенонович —
кандидат физико-математических наук, доцент
Санкт-Петербургский Политехнический
Университет Петра Великого
195251, Российская Федерация, Санкт-Петербург,
ул. Политехническая, 29
e-mail: alikhborevich@mail.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, Aleksandr 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, kaf_pgt@gumrf.ru

Borevich, Albert Z. —
PhD, associate professor
Peter the Great St. Petersburg
Polytechnic University
29 Politekhnicheskaya Str., St. Petersburg,
195251, Russian Federation
e-mail: alikhborevich@mail.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 9 октября 2020 г.

Received: October 9, 2020.