

DOI: 10.21821/2309-5180-2020-12-3-467-480

MATHEMATICAL MODEL FOR SOLVING THE PROBLEM OF CONTAINER SHIP STOWAGE PLANNING FOR ENSURING THE SAFETY OF TRANSPORTATION

R. S. Tsarik, D. A. Akmaykin

Maritime State University named after admiral G. A. Nevelskoy,
Vladivostok, Russian Federation

The safety of ship operation is a priority for container shipping. Its provision is inseparably linked with proper container ship stowage planning. At the beginning of maritime container shipping evolution, container ship stowage planning was a fairly simple task, which could be solved without using complex computers and specialized software, in a relatively short time. With increasing ships container capacity, this task has become more complex and time-consuming. The complexity of container ship stowage planning is due to the fact that it is necessary to simultaneously take into account many factors that can have the opposite effect on the planning result. At the same time, normalization of one factor can lead to the fact that another factor will take an unacceptable value. The container capacity of the largest vessels today is 24,000 units in twenty-foot equivalent. Stowage planning of even an average feeder container ship with a capacity of 2000-3000 units in twenty-foot equivalent, in the modern conditions of container lines operation, requires the use of automated planning tools. Automation of this task solution has been attracting the researchers' attention for nearly forty years. However, there were no outstanding successes. At the same time, the existing technical and software tools for container ship stowage planning, although allow you to solve this problem, but not to a sufficient level. It is important that the solution of the problem aims to achieve the greatest economic effect from stowage planning. It is noted that despite the fact that transportation safety is taken into account in the proposed models, these solutions are not enough. A mathematical model for solving the container ship stowage planning, based on setting the objective function and corresponding restrictions is offered in the paper. The maximum priority in the model is given to the safety of transportation. The importance of the economic effect from the stowage planning is recognized, but is not considered in this paper.

Keywords: container ship, container, stowage planning, ship cargo plan, automation, mathematical modeling, safety assurance.

For citation:

Tsarik, Ruslan Stanislavovich, and Denis A. Akmaykin. "Mathematical model for solving the problem of container ship stowage planning for ensuring the safety of transportation." *Vestnik Gosudarstvennogo universiteta morskogo i rechnogo flota imeni admirala S. O. Makarova* 12.3 (2020): 467–480. DOI: 10.21821/2309-5180-2020-12-3-467-480.

УДК 656.61.052

МАТЕМАТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ РЕШЕНИЯ ЗАДАЧИ ПЛАНИРОВАНИЯ ЗАГРУЗКИ КОНТЕЙНЕРОВОЗА С ЦЕЛЬЮ ОБЕСПЕЧЕНИЯ БЕЗОПАСНОСТИ ПЕРЕВОЗОК

Р. С. Царик, Д. А. Акмайкин

ФГБОУ ВО «МГУ им. адм. Г. И. Невельского», Владивосток,
Российская Федерация

Отмечается, что безопасность эксплуатации судна является приоритетной задачей морских контейнерных перевозок, обеспечение которой нераздельно связано с надлежащим планированием загрузки судов-контейнеровозов. В период становления морских контейнерных перевозок планирование загрузки контейнеровозов представляло собой достаточно простую задачу, решаемую без использования сложной электронно-вычислительной техники и специализированного программного обеспечения в течение относительно короткого периода времени. С ростом контейнеровместимости судов эта задача становилась

все более сложной и трудоемкой. Подчеркивается, что сложность планирования загрузки контейнеровозов обусловлена необходимостью одновременного учета множества факторов, которые могут оказывать противоположное влияние на результат планирования. При этом нормализация одного фактора может привести к тому, что другой фактор примет неприемлемое значение. Контейнеровместимость крупнейших судов на сегодняшний день составляет 24000 единиц в двадцатифутовом эквиваленте. Планирование загрузки даже среднего фидерного контейнеровоза вместимостью 2000–3000 единиц в современных условиях работы контейнерных линий требует применения автоматизированных средств планирования. Автоматизация решения данной задачи привлекает внимание исследователей в течение последних сорока лет. При этом существующие технические и программные средства планирования загрузки судов-контейнеровозов позволяют решать эту задачу, но не в достаточной степени. Важным является тот факт, что решение данной задачи сфокусировано на достижении наибольшего экономического эффекта от планирования загрузки. Отмечается, что несмотря на то, что безопасность перевозки учитывается в предлагаемых моделях, этих решений недостаточно. В статье предложена математическая модель решения задачи планирования загрузки судов-контейнеровозов, основанная на задании целевой функции и соответствующих ограничений. Данная модель учитывает вопросы, возникающие в процессе реальной эксплуатации контейнеровозов. Максимальный приоритет в модели отдается безопасной эксплуатации. Важность экономической составляющей планирования загрузки признается, но в данной работе не рассматривается.

Ключевые слова: судно-контейнеровоз, контейнер, планирование загрузки, грузовой план судна, автоматизация, математическое моделирование, обеспечение безопасности.

Для цитирования:

Царик Р. С. Математическая модель решения задачи планирования загрузки контейнеровоза с целью обеспечения безопасности перевозок / Р. С. Царик, Д. А. Акмайкин // Вестник Государственного университета морского и речного флота имени адмирала С. О. Макарова. — 2020. — Т. 12. — № 3. — С. 467–480. DOI: 10.21821/2309-5180-2020-12-3-467-480.

Введение (Introduction)

Задача планирования размещения контейнеров (Container Stowage Problem (CSP)) является NP-полной задачей. Это свойство задачи, в частности, доказано в работе [1]. Выполненное доказательство заключалось в том, что была рассмотрена и доказана сводимость задачи CSP применительно к задаче раскраски графов, которая, в свою очередь, признана NP-полной задачей. Таким образом, было выполнено требование в части отнесения таких задач к классу NP-полных, при условии их сведения к одной из известных NP-полных задач.

Анализ наиболее характерных математических моделей и использованных математических методов для решения данной задачи показал следующее. В работе [2] авторы, используя методы линейного программирования и эвристические методы, предложили модель решения задачи общего планирования по бэям (Master Bay Planning Problem (MBPP)), целью которой является минимизация времени стоянки судна в порту. Вопросы безопасности рассматриваются косвенно. В работе [3] авторы также используют методы линейного программирования и эвристики, предлагая двухэтапную модель планирования загрузки контейнеровоза. На первом этапе решается задача MBPP, на втором — более точная задача частного планирования по штабелям или ячейкам (Slot Planning Problem (SPP)). Среди вопросов обеспечения безопасности рассматривается только остойчивость судна. В работе [4] авторы, используя методы генетических алгоритмов, предлагают модель, комбинирующую решение вопросов размещения контейнеров и оптимизации технологических операций на терминале. В работе [5] авторы используют эвристический алгоритм с локальным поиском. С помощью использования предложенной модели осуществляется планирование загрузки в два этапа: первый (общий) и второй (уточненный). Вопросы безопасности перевозки при этом не рассматриваются. В работе [6] авторы, используя программирование с ограничениями и эвристические методы, предлагают модель автоматизированной системы планирования загрузки контейнеровоза, состоящую из трех модулей: генератора грузового плана, модуля остойчивости, модуля оптимизации. В работах [7], [8] авторы используют методы целочисленного программирования, локальный поиск с ограничениями

и эвристические методы. Предложена двухэтапная модель, где на первом этапе контейнеры распределяются по секциям, а на втором — оптимизируется их размещения внутри секций. Учитываются вопросы остойчивости и прочности. В работе [9] авторы, используя эвристические методы и приемы решения задачи упаковки в контейнеры, предлагают модель размещения контейнеров на судне, поделенном на секции. В работе [10] авторы используют компьютерное программирование и методы генетических алгоритмов. Предложенная ими модель включает два этапа. На первом этапе методом ветвей и границ формируется контейнерный штабель, а на втором — методом поисков и запретов контейнеры распределяются по ячейкам. В работе [11] авторы используют эвристические методы для решения задачи МВРР путем введения допуска на количество перемещений кранов по причалу с точки зрения их эффективного использования. Вопросы безопасности, за исключением остойчивости, не учитываются.

На основе выполненного анализа можно сделать следующие выводы:

- наиболее востребованным из применимых математических методов является целочисленное программирование;
- предпочтение отдается комбинированным методам решения задачи. (В этом случае используются различные подходы, наиболее часто это математическое программирование и эвристические методы);
- остойчивость и другие факторы безопасности если и учитываются, то косвенно. (Предложенные модели не дают четкого понимания того, какое влияние оказывает конкретный контейнер на остойчивость и другие факторы безопасности судна).

Важнейшим аспектом функционирования отрасли морского судоходства является обеспечение безопасности мореплавания для судов любых типов. Соответствующие требования указаны в международных конвенциях, кодексах и резолюциях ИМО. Приоритет безопасности перевозок над коммерческой выгодой является очевидным. Таким образом, при разработке моделей решения задачи CSP, необходимо прежде всего уделять внимание факторам безопасности, в том числе описанным в работе [12], а именно: остойчивости, местной и общей продольной прочности, а также видимости с ходового мостика и размещению контейнеров с опасными грузами.

Поскольку задача CSP является NP-полной, ее решение с помощью эффективных алгоритмов невозможно. Поэтому для решения такого рода задач прибегают, в частности, к методу декомпозиции, при котором задача разделяется на несколько простых подзадач. Задачу CSP можно разделить на два основных этапа: общее планирование по бэям (МВРР) и частное планирование по штабелям или ячейкам (SPP). Это сложная комбинаторная задача, обусловленная множеством ограничений, связанных с характеристиками контейнеров и судна, которые должны быть учтены одновременно.

С учетом приоритета безопасности предлагаемый подход в решении задачи CSP заключается в следующем:

1. Размещение контейнеров прежде всего планируется с учетом ограничений, основанных на факторах безопасности.
2. Если для конкретного контейнера определяется несколько доступных вариантов размещения (несколько разрешенных ячеек), то из них выбирается ячейка, которая будет оптимальной с точки зрения экономического эффекта (минимизация движений крана, соблюдение очередности выгрузки и др.).

Методы и материалы (Methods and Materials)

В качестве основных угроз безопасности в работе рассмотрены следующие факторы:

- конфликты с опасными грузами, которые могут привести к пожарам, взрывам, негативно-му химическому воздействию и загрязнению окружающей среды;
- нарушение норм весовых нагрузок на корпус судна и его конструкции;
- нарушение требований к остойчивости;
- нарушение требований к посадке судна;
- нарушение требований к видимости с навигационного мостика.

Целевая функция. Целевую функцию в предлагаемой математической модели можно записать в следующем виде:

$$\sigma^S \sum_{i=1}^I \sum_{j=1}^J \sum_{k=1}^K (P_{ijk}^{DG} + P_{ijk}^{WT} + P_{ijk}^{ST} + P_{ijk}^{HD} + P_{ijk}^{NV} + P_{ijk}^{20/40}) \rightarrow \min.$$

Принятые в работе обозначения приведены в следующей таблице.

Принятые обозначения

Обозначение	Значение
<i>Основные переменные</i>	
$P_{ijk} / P_{ijk}^{DG,WT,ST,HD,NV,20/40}$	Запрещенная ячейка / количество всех запрещенных ячеек из-за конфликта: DG — с опасными грузами; WT — по нормированию весовой нагрузки (включая LS — местную прочность, BM — изгибающий момент, SF — перерезывающие силы, TM — скручивающий момент); ST — по нормированию остойчивости; HD — по нормированию посадки, включая DR — осадку, HL — крен, TR — дифферент; NV — по нормированию видимости с ходового мостика; 20/40 — по типоразмеру (20 или 40 футов).
<i>Вспомогательные переменные</i>	
BF_b^{b+1}	Плавучесть секции корпуса судна, расположенной между станциями Бонжана b и $b+1$.
$M_{VCG_i}^C$	Вертикальный метацентр штабеля контейнеров в бэе i .
$F_{ijk}, O_{ijk}, A_{ijk}$	Контейнерная ячейка: свободная (F), занятая (O), разрешенная (A).
ijk_c^{DG}	Контейнерная ячейка ijk с контейнером с опасными грузами.
IJK_c^{DG}	Количество всех контейнерных ячеек с опасными грузами.
c_{ijk}^{DG}	Контейнер с опасным грузом в ячейке ijk .
$c_i^{20/40}, C^{20/40}$	20- / 40-футовые контейнеры в бэе i ; все 20- / 40-футовые контейнеры на судне.
KM	Метацентрический радиус.
$ijk_{w_{max}}^{LS,BM,SF,TM}; ijk_w^{ST}$	Весовой лимит контейнерной ячейки ijk по LS — местной прочности, BM — изгибающему моменту, SF — перерезывающим силам, TM — скручивающему моменту и метацентрической высоте соответственно.
d_f, d_a, d_m	Осадка носом, кормой, на миделе (средняя).
$\Delta d_{af}, \Delta d_{af \min}, \Delta d_{af \max}$	Дифферент, минимальный / максимальный допустимый дифферент.
Δd_m	Изменение осадки на миделе (средней).
$w_{ijk}^c, w_i^c, w_{ij}^c$	Вес контейнера в ячейке ijk , вес контейнерного штабеля в бэе i , вес контейнерного штабеля в бэе i и ряде j .
$BM_f, SF_f, TM_f, BM_{f-1}^{f+1}, SF_{f-1}^{f+1}, TM_{f-1}^{f+1}$	Изгибающий момент, перерезывающие силы, скручивающий момент, действующие на расчетном шпангоуте f , в нос от него $f+1$, в корму от него $f-1$.
$x_{ijk}, y_{ijk}, z_{ijk}$	Отстояние ячейки ijk от контрольной ячейки: продольное, поперечное, вертикальное соответственно. Знаки: «-» — на левый борт; «+» — на правый борт.

Продолжение табл.

y_i^c	Поперечное расстояние (плечо момента) от контейнера / контейнерного штабеля в ряду j до ДП судна. Знаки «-» — на левый борт, «+» — на правый борт.
x_i^c	Продольное расстояние (плечо момента) от контейнера / контейнерного штабеля в бэе i до центра плавучести судна. Знаки «-» — в корму, «+» — в нос.
G_0M	Метацентрическая высота исправленная.
C_{TG}	Ордината поперечного центра тяжести — от диаметральной плоскости до центра штабеля контейнеров или балластного танка.
MD_{cm}	Момент дифференцирующий на 1 см.
w_{cm}	Количество тонн, изменяющих осадку на 1 см.
h°	Крен в градусах.
h_1°	Момент, кренящий судно на 1 град., $h_1^\circ = W \cdot G_0M \cdot \tan 1^\circ$.
<i>Константы</i>	
σ^S	Штрафная санкция за нарушение в размещении контейнеров с точки зрения требований безопасности.
$BM_{\max}, SF_{\max}, TM_{\max}$	Максимально допустимые значения изгибающего момента, перерезывающих сил, скручивающего момента.
w_i^t, w_j^t	Вес жидких запасов в танке(ах) t , расположенных в бэе i ; расположенных в проекции ряда j .
$\text{Max}W_{ij}$	Максимальный (допустимый) вес контейнерного штабеля в бэе i и ряде j .
G_0M^R	Метацентрическая высота требуемая.
$\sum k_p$	Суммарная поправка за свободную поверхность всех жидких запасов судна.
$k_{w_i}^T$	Компонент суммарного вертикального момента центра тяжести, включающий момент судна порожнем и момент от жидких запасов.
$h_{\max}^\circ$	Крен максимально допустимый в градусах.
$\sum M^H$	Итоговый кренящий момент, отсчитываемый от кормы судна.
$h_{ijk}^c; h_{ijk}^{c'}$	Высота контейнера: стандартный контейнеры; контейнер повышенной вместимости ($h^{c'}$ = хайкьюб).
MH_{ic}	Максимально допустимая высота штабеля контейнеров в бэе i .
f_f	Передняя часть расчетного шпангоута f . $f_f = 1$, когда f — первый шпангоут с носа, $f_f = 0$, когда f — первый шпангоут с кормы.
k_{wf-1}^{f+1}	Весовая константа судна в нос или в корму от шпангоута f : $f+1$ — в нос, $f-1$ — в корму.
k_{Bf-1}^{f+1}	Весовая константа изгибающего момента в нос или в корму от шпангоута f : $f+1$ — в нос, $f-1$ — в корму.
d_f^F	Расстояние от носовой оконечности судна до расчетного шпангоута f .
d_{ijf-1}^{f+1}	Дистанция в нос или в корму от шпангоута f до продольного центра тяжести штабеля ij : $f+1$ — в нос, $f-1$ — в корму.

Окончание табл.

d_{if-1}^{f+1}	Дистанция в нос или в корму от шпангоута f до продольного центра тяжести балластного танка t : $f+1$ — в нос, $f-1$ — в корму.
d_{bf-1}^{f+1}	Дистанция в нос или в корму от шпангоута f до продольного центра тяжести секции плавучести между контрольными точками b и $b+1$: $f+1$ — в нос, $f-1$ — в корму.
c_{ijf-1}^{f+1}	Часть штабеля контейнеров, которая расположена в нос или в корму от шпангоута f : $f+1$ — в нос, $f-1$ — в корму.
t_{f-1}^{f+1}	Часть балластного танка t , которая расположена в нос или в корму от шпангоута f : $f+1$ — в нос, $f-1$ — в корму.
S_{ff-1}^{f+1}	Часть секции корпуса между контрольными секциями плавучести b и $b+1$, которая расположена в нос или в корму от шпангоута f : $f+1$ — в нос, $f-1$ — в корму.
<i>Наборы данных</i>	
f, b, t	Расчетный шпангоут судна $f \in F$; секция плавучести корпуса судна, заключенная между двумя контрольными шпангоутами, $b \in B$; балластный танк судна, $t \in T$.
$ijk; IJK$	Контейнерная ячейка ijk : бэй i , ряд j , ярус k ; все контейнерные ячейки.
$A_{ijk}; C$	Контейнер в ячейке ijk ; все контейнеры.

Взвешенная (штрафная) сумма от количества запрещенных ячеек, в которые не могут быть погружены контейнеры, ввиду возникновения конфликтов с требованиями безопасности, должна быть минимальной. Эффективное планирование загрузки предполагает, что количество таких ячеек будет минимальным. По смыслу данной целевой функции количество ячеек соответствует количеству контейнеров, которые могут быть погружены в эти ячейки: $\{|C_{ijk}|\} \Leftrightarrow \{|IJK_C|\}$, в том числе количество запрещенных к погрузке ячеек эквивалентно количеству не погруженных на судно контейнеров.

Ограничения. Существенным фактором является то, что ограничения должны быть сформулированы таким образом, чтобы была показана зависимость каждого из факторов безопасности от планируемого к погрузке контейнера и / или ячейки, в которую его планируют погрузить. Например, должна быть показана зависимость метацентрической высоты от погрузки данного контейнера в данную ячейку. Судовой балласт и топливо или не рассматриваются, или в случае целесообразности рассматриваются в общем виде, поскольку предполагается, что операции с ними выполняются экипажем в соответствии с установленными процедурами, а для конкретной ситуации жидкие запасы являются константой.

Важным обстоятельством также является то, что сформулированные ограничения содержат компоненты, непосредственно зависящие от характеристик контейнера: веса, размера, типа и др. и ячейки: координат, размера. Это позволяет контролировать изменения параметров загрузки судна-контейнеровоза в зависимости от характеристик каждого контейнера и ячейки, в которую он грузится. Для определения совокупности контейнеров или ячеек используется понятие *множества*. Для определения количества контейнеров или ячеек используется понятие *мощности множества*, отражающего количество элементов, входящих в это множество.

Ячейка, запрещенная к погрузке по одному из факторов безопасности, не учитывается повторно, если она также является запрещенной и по другим факторам безопасности в данных условиях. Например, ячейки, запрещенные к погрузке контейнеров с опасными грузами, не входят в число ячеек, запрещенных к погрузке контейнеров, нарушающих требование к весовой нагрузке:

$$\{P_{ijk}^{DG}\} \setminus \{P_{ijk}^{WT}\}; \quad \forall i \in I, j \in J, k \in K.$$

Сформулируем следующие виды ограничений для целевой функции:

1. *Ограничения по размещению контейнеров с опасными грузами*

Количество ячеек, запрещенных к погрузке контейнеров с ОГ:

$$P_{LJK}^{DG} \in \{0, \dots, F_{ijk}\}; \quad (1)$$

$$P_{LJK}^{DG} = |\{P_i^{DG}\}| \cdot |\{P_j^{DG}\}| \cdot |\{P_k^{DG}\}| - |\{O_{ijk}^{DG}\}|; \quad \forall i \in I, j \in J, k \in K. \quad (2)$$

С учетом предложенного в работе [13] метода размещения контейнеров с опасными грузами через формирование буферных зон, ограничение (2) можно записать через отстояния (x_{ijk} , y_{ijk} , z_{ijk}) по каждой из трех координат (бэй, ряд, ярус):

$$|\{P_i^{DG}\}| = |\{O_i^{DG} \in I \mid O_i^{DG} - y_{ijk} \leq O_i^{DG} \leq O_i^{DG} + y_{ijk}\}| \quad \forall i \in I; \quad (3)$$

$$|\{P_j^{DG}\}| = |\{O_j^{DG} \in J \mid O_j^{DG} - x_{ijk} \leq O_j^{DG} \leq O_j^{DG} + x_{ijk}\}| \quad \forall j \in J; \quad (4)$$

$$|\{P_k^{DG}\}| = |\{O_k^{DG} \in K \mid O_k^{DG} - z_{ijk} \leq O_k^{DG} \leq O_k^{DG} + z_{ijk}\}| \quad \forall k \in K; \quad (5)$$

$$|\{O_{ijk}^{DG}\}| = |\{ijk_c^{DG} \in LJK_c^{DG} \mid |ijk_c^{DG}| \geq 1\}| \quad \forall i \in I, j \in J, k \in K. \quad (6)$$

2. *Ограничения по весу*

Ограничения по весу подразумевают ограничения по весовой нагрузке на конструкции судна и контейнеры в штабеле, расположенные в нижних ярусах. При этом максимальный вес самого контейнера считается соответствующим норме, поскольку он контролируется на этапе упаковки груза в контейнер.

Весовая нагрузка контейнеров обуславливает местную и общую продольную прочность и деформацию корпуса судна.

Количество ячеек, запрещенных к погрузке контейнеров по их весовым характеристикам:

$$P_{LJK}^{WT} = |\{P_{ijk}^{LS}\}| + |\{P_{ijk}^{BM}\}| + |\{P_{ijk}^{SF}\}| + |\{P_{ijk}^{TM}\}|; \quad \forall i \in I, j \in J, k \in K. \quad (7)$$

Для удовлетворения требований к местной прочности вес контейнерного штабеля не должен превышать допустимых значений:

$$\sum_{k=1}^K w_{ijk}^c \leq \max W_{ij}; \quad \forall i \in I, j \in J. \quad (8)$$

Вес контейнера не должен превышать весового лимита ячейки $ijk_{w_{\max}}^{LS}$, в которую он планируется к погрузке:

$$w_{ijk}^c \leq \max W_{ij} - \sum_{k=1}^K w_{ijk}^c; \quad \forall i \in I, j \in J, k \in K \in J. \quad (9)$$

Количество ячеек, запрещенных к погрузке контейнера из-за превышения весового лимита по местной прочности:

$$|\{P_{ijk}^{LS}\}| = |\{w_{ijk}^c \in W_{ij} \mid w_{ijk}^c > ijk_{w_{\max}}^{LS}\}|; \quad \forall i \in I, j \in J, k \in K. \quad (10)$$

Для удовлетворения требований по общей продольной прочности и ограничению деформаций корпуса судна вес контейнерного штабеля не должен превышать допустимых значений. При проектировании судна определяются расчетные шпангоуты, относительно которых нормируется допустимая весовая нагрузка на корпус.

Изгиб корпуса судна обусловлен неравномерным распределением груза в его оконечностях и на миделе. Если осадки на оконечностях больше осадки на миделе, то это перегиб, если осадка на миделе больше осадок на оконечностях, то это прогиб. На практике в подавляющем большинстве случаев встречается перегиб судна.

Изгибающий момент на расчетном шпангоуте f не должен превышать допустимых значений:

$$BM_f \leq \max BM_f; \quad \forall f \in F. \quad (11)$$

Изгибающий момент в нос и в корму от расчетного шпангоута f рассчитывается следующим образом:

$$BM_{f-1}^{f+1} = k_{Bf-1}^{f+1} + \sum_{i \in I, j \in J} d_{ijf-1}^{f+1} c_{ijf-1}^{f+1} w_{ij}^c + \sum_{t \in T} d_{tf-1}^{f+1} t_{f-1}^{f+1} w_t - \sum_{b \in B} d_{bf-1}^{f+1} S_{ff-1}^{f+1} BF_b^{b+1}; \quad \forall f \in F, \quad (12)$$

где $\sum_{i \in I, j \in J} d_{ijf-1}^{f+1} c_{ijf-1}^{f+1} w_{ij}^c$ — слагаемое, включающее весовую нагрузку от контейнеров.

Итоговый изгибающий момент на расчетном шпангоуте f рассчитывается следующим образом:

$$BM_f = f_f BM^{f+1} + (1 - f_f) BM^{f-1}. \quad (13)$$

Вес контейнера не должен превышать весового лимита ячейки $ijk_{w_{\max}}^{BM}$, в которую он планируется к погрузке:

$$w_{ijk}^c \leq \max W_{ij} - \sum_{k=1}^K w_{ijk}^c; \quad \forall i \in I, j \in J, k \in K. \quad (14)$$

Количество ячеек, запрещенных к погрузке контейнера из-за превышения весового лимита по изгибающему моменту:

$$|\{P_{ijk}^{BM}\}| = |\{w_{ijk}^c \in W_{ij} | w_{ijk}^c > ijk_{w_{\max}}^{BM}\}|; \quad \forall i \in I, j \in J, k \in K. \quad (15)$$

Перерезывающие силы обусловлены неравномерным распределением веса груза между двумя смежными секциями судна (грузовыми трюмами, контрольными шпангоутами, бэями и т. п.).

Перерезывающие силы на расчетном шпангоуте f не должны превышать допустимых значений:

$$SF_f \leq \max SF_f; \quad \forall f \in F. \quad (16)$$

Перерезывающие силы на расчетном шпангоуте f рассчитываются следующим образом:

$$SF_f = k_{wf-1}^{f+1} + \sum_{i \in I, j \in J} c_{ijf-1}^{f+1} w_{ij}^c + \sum_{t \in T} t_{f-1}^{f+1} w_t - \sum_{b \in B} S_{ff-1}^{f+1} BF_b^{b+1}; \quad \forall f \in F, \quad (17)$$

где $\sum_{i \in I, j \in J} c_{ijf-1}^{f+1} w_{ij}^c$ — слагаемое, включающее весовую нагрузку от контейнеров.

Итоговая перерезывающая сила на расчетном шпангоуте f рассчитывается следующим образом:

$$SF_f = f_f SF^{f+1} + (1 - f_f) SF^{f-1}. \quad (18)$$

Вес контейнера не должен превышать весового лимита ячейки $ijk_{w_{\max}}^{SF}$, в которую он планируется к погрузке:

$$w_{ijk}^c \leq \max W_{ij} - \sum_{k=1}^K w_{ijk}^c; \quad \forall i \in I, j \in J, k \in K. \quad (19)$$

Количество ячеек, запрещенных к погрузке контейнера из-за превышения весового лимита по перерезывающим силам:

$$|\{P_{ijk}^{SF}\}| = |\{w_{ijk}^c \in W_{ij} | w_{ijk}^c > ijk_{w_{\max}}^{SF}\}|; \quad \forall i \in I, j \in J, k \in K. \quad (20)$$

Скручивающий момент обусловлен неравномерным распределением кренящих моментов, вдоль корпуса судна и на расчетном шпангоуте f не должен превышать допустимых значений:

$$TM_f \leq \max TM_f. \quad (21)$$

Скручивающий момент на расчетном шпангоуте f рассчитывается следующим образом:

$$TM_f = 9,81 \left(\sum_{i \in I, j \in J} C_{TGC_{ij}} w_{ij}^c + \sum_{t \in T, i \in I} C_{TGi} w_i^t \right) - \sum M^H \frac{d_f^F}{L_{oa}}; \quad \forall f \in F, \quad (22)$$

где $\sum_{i \in I, j \in J} C_{TGC_{ij}} w_{ij}^c$ — слагаемое, включающее весовую нагрузку от контейнеров.

Вес контейнера не должен превышать весового лимита ячейки $ijk_{w_{\max}^{TM}}$, в которую он планируется к погрузке:

$$w_{ijk}^c \leq \max W_{ij} - \sum_{k=1}^K w_{ijk}^c; \quad \forall i \in I, j \in J, k \in K. \quad (23)$$

Количество ячеек, запрещенных к погрузке контейнера из-за превышения весового лимита по скручивающему моменту:

$$\left| \{P_{ijk}^{TM}\} \right| = \left| \{w_{ijk}^c \in W_{ij} \mid w_{ijk}^c > ijk_{w_{\max}^{TM}}\} \right|; \quad \forall i \in I, j \in J, k \in K. \quad (24)$$

3. Ограничения по остойчивости

В качестве основного критерия остойчивости рассмотрена исправленная на свободную поверхность метацентрическая высота (G_0M).

Исправленная метацентрическая высота должна быть не менее требуемой:

$$G_0M \geq G_0M^R. \quad (25)$$

Исправленная метацентрическая высота рассчитывается следующим образом:

$$G_0M = KM - \left(\frac{\sum_{ijk} w_{ijk}^c M_{VCG_i}^C}{W} + k_{w_i}^T \right) - \sum k_p, \quad (26)$$

где $\sum_{ijk} w_{ijk}^c M_{VCG_i}^C$ — слагаемое, включающее весовую нагрузку от контейнеров.

Вес контейнера не должен превышать весового лимита ячейки $ijk_{w_{\max}^{ST}}$, в которую он планируется к погрузке:

$$w_{ijk}^c \leq \frac{\sum_{ij} w_{ijk}^c M_{VCG_i}^C - \sum_{ijk} w_{ijk}^c M_{VCG_i}^C}{M_{VCG_i}^C}; \quad \forall i \in I, j \in J, k \in K. \quad (27)$$

Количество ячеек, запрещенных к погрузке контейнера из-за превышения весового лимита по метацентрической высоте:

$$\left| \{P_{ijk}^{ST}\} \right| = \left| \{w_{ijk}^c \in W_{ij} \mid w_{ijk}^c > ijk_{w_{\max}^{ST}}\} \right|; \quad \forall i \in I, j \in J, k \in K. \quad (28)$$

4. Ограничения по посадке

Ограничения по посадке включают ограничения по осадке, крену и дифференту и могут быть обусловлены как физическими характеристиками акватории, так и особенностями эффективной эксплуатации судна. Рассматривается средняя осадка или осадка на миделе, равная среднему от осадок носом и кормой. Переход от одной осадки к другой осуществляется через дифферент.

Количество ячеек, запрещенных к погрузке контейнеров из-за нарушения требований к посадке судна:

$$P_{LJK}^{TD} = \left| \{P_{ijk}^{DR}\} \right| + \left| \{P_{ijk}^{HL}\} \right| + \left| \{P_{ijk}^{TR}\} \right|; \quad \forall i \in I, j \in J, k \in K. \quad (29)$$

Осадка судна должна оставаться в допустимых пределах:

$$d_{m \min} \leq d_m \leq d_{m \max}. \quad (30)$$

В контексте рассматриваемого вопроса достаточно контролировать изменение осадки от увеличения водоизмещения за счет погруженных контейнеров:

$$\Delta d_m = \frac{\sum w_{ijk}^c}{w_{cm}}, \quad (31)$$

где $\sum w_{ijk}^c$ — компонент, включающий весовую нагрузку от контейнеров.

Вес контейнера не должен превышать весового лимита ячейки ijk_w^{DR} , в которую он планируется к погрузке:

$$w_{ijk}^c \leq \Delta d_m^R w_{cm}; \quad \forall i \in I, j \in J, k \in K. \quad (32)$$

Количество ячеек, запрещенных к погрузке контейнера из-за превышения весового лимита по осадке:

$$|\{P_{ijk}^{DR}\}| = |\{w_{ijk}^c \in W_{ij} | w_{ijk}^c > ijk_{w_{\max}}^{DR}\}|; \quad \forall i \in I, j \in J, k \in K. \quad (33)$$

Рассматривается крен судна от перемещения груза, а крен от перемещения жидких запасов не рассматривается.

Крен судна должен быть не более допустимого значения:

$$h^\circ \leq h_{\max}^\circ; \quad (34)$$

$$h^\circ = \frac{\sum w_j^c y_j^c}{0,017455 W G_0 M}, \quad (35)$$

где $\sum w_j^c y_j^c$ — компонент, включающий весовую нагрузку от контейнеров и учитывающий их размещение.

Вес контейнера не должен превышать весового лимита ячейки $ijk_{w_{\max}}^{HL}$, в которую он планируется к погрузке:

$$w_{ijk}^c \leq \frac{h_{\max}^\circ h_1^\circ}{y_j^c}; \quad \forall i \in I, j \in J, k \in K. \quad (36)$$

Количество ячеек, запрещенных к погрузке контейнера из-за превышения весового лимита по осадке:

$$|\{P_{ijk}^{HL}\}| = |\{w_{ijk}^c \in W_{ij} | w_{ijk}^c > ijk_{w_{\max}}^{HL}\}|; \quad \forall i \in I, j \in J, k \in K. \quad (37)$$

Рассматривается дифферент судна от перемещения груза, а дифферент от перемещения жидких запасов не рассматривается.

Дифферент судна должен оставаться в допустимых пределах:

$$\Delta d_{af \min} \leq \Delta d_{af} \leq \Delta d_{af \max}; \quad (38)$$

$$\Delta d_{af} = \frac{\sum w_i^c x_i^c}{MD_{cm}}, \quad (39)$$

где $\sum w_i^c$ — компонент, включающий весовую нагрузку от контейнеров.

Вес контейнера не должен превышать весового лимита ячейки $ijk_{w_{\max}}^{TM}$, в которую он планируется к погрузке:

$$w_{ijk}^c \leq \frac{\Delta d_{af}^R MD_{cm}}{x_i^c}; \quad \forall i \in I, j \in J, k \in K \in J. \quad (40)$$

Количество ячеек, запрещенных к погрузке контейнера из-за превышения весового лимита по осадке:

$$|\{P_{ijk}^{TM}\}| = |\{w_{ijk}^c \in W_{ij} | w_{ijk}^c > ijk_{w_{\max}}^{TM}\}|; \quad \forall i \in I, j \in J, k \in K. \quad (41)$$

5. Ограничения по видимости с ходового мостика

Ограничения видимости с ходового мостика обусловлены высотой палубных контейнерных штабелей и посадкой судна, как это описано в работе [14]. Для удовлетворения требований к види-

мости с ходового мостика, высота контейнерного штабеля в данном бэе и ряде не должна превышать максимально допустимую высоту штабеля для данного бэа и ряда в данных условиях:

$$\sum_{ijk}^{LJK} h_{ijk}^c + \sum_{ijk}^{LJK} h_{ijk}^{c'} \leq MH_{ic}, \quad (42)$$

где $\sum_{ijk}^{LJK} h_{ijk}^c + \sum_{ijk}^{LJK} h_{ijk}^{c'}$ — слагаемые, включающие высоту контейнеров.

Высота контейнера не должна превышать лимита по высоте $ijk_{h_{Max}}^{NV}$ ячейки, в которую он планируется к погрузке:

$$h_{ijk}^c \leq MH_{ic} - \left(\sum_{ijk,k=1}^{LJK} h_{ijk}^c + \sum_{ijk,k=1}^{LJK} h_{ijk}^{c'} \right); \quad \forall i \in I, j \in J, k \in K. \quad (43)$$

Количество ячеек, запрещенных к погрузке контейнера из-за превышения весового лимита по осадке:

$$\left| \{P_{ijk}^{NV}\} \right| = \left| \{h_{ijk}^c \in MH_{ic} \mid w_{ijk}^c > ijk_{h_{Max}}^{NV}\} \right|; \quad \forall i \in I, j \in J, k \in K. \quad (44)$$

6. Ограничения по типоразмерам контейнеров

Рассматриваются два основных стандартных размера контейнеров: 20 и 40 футов. Некоторые контейнерные ячейки могут быть предназначены только для контейнеров одного размера, соответственно в них нельзя погрузить контейнер другого размера. Так, 20-футовый контейнер рассматривается как половина (0,5) 40-футового контейнера.

20-футовый контейнер может быть погружен в данную ячейку только при условии, что ячейка ярусом ниже загружена 20-футовым контейнером:

$$\sum_{c_i}^{C^{20}} c_{ijk}^{20} - \sum_{c_i}^{C^{20}} c_{ij(k-1)}^{20} \leq 0; \quad \forall i \in I, j \in J, k \in K. \quad (45)$$

40-футовый контейнер может быть погружен в данную ячейку только при условии, что ячейка ярусом ниже не пустая (в нее загружен один 40-футовый контейнер, или два 20-футовых контейнера):

$$0,5 \sum_{c_i}^{C^{20}} c_{ij(k+1)}^{20} + \sum_{c_i}^{C^{40}} c_{ij(k-1)}^{40} - \sum_{c_i}^{C^{40}} c_{ijk}^{40} \geq 0; \quad \forall i \in I, j \in J, k \in K. \quad (46)$$

В одну ячейку может быть погружены максимум два 20-футовых или один 40-футовый контейнер:

$$0,5 \sum_{c_i}^{C^{20}} c_{ijk}^{20} + \sum_{c_i}^{C^{40}} c_{ijk}^{40} \leq 1; \quad \forall i \in I, j \in J, k \in K. \quad (47)$$

Обсуждение (Discussion)

В отличие от математических моделей, разработанных другими авторами, в предложенной в настоящем исследовании математической модели внимание акцентировано именно на вопросах безопасности с учетом основных факторов безопасности, относящихся к планированию загрузки судна-контейнеровоза и его последующей эксплуатации, зависящей от качества этой загрузки. При этом модель позволяет включать в нее дополнительные факторы и учитывать их аналогично учтенным ранее факторам.

Применение этой модели позволит осуществлять планирование загрузки судов-контейнеровозов по принципу «разрешено-запрещено» на основе ограничений ячеек (лимитов) по весу и размерам контейнеров, запланированных к погрузке. Данный принцип подразумевает определение разрешенных и запрещенных ячеек к погрузке каждого конкретного контейнера. Таким образом, будут определяться и предлагаться к размещению контейнера только те ячейки, которые во всех отношениях соответствуют требованиям безопасности. Если таких ячеек не будет обнаружено,

то придется или отказаться от погрузки данного контейнера, или внести допустимые изменения в план загрузки.

Предложенная модель позволяет минимизировать или полностью избежать ситуаций в случае, когда возникает необходимость изменения размещения некоторых контейнеров, не соответствующих требованиям безопасности, уже после составления грузового плана и даже после погрузки на судно.

Выводы (Summary)

На основе выполненных в работе исследований можно сделать следующие выводы:

1. Несмотря на определенные положительные результаты в решении данного вопроса, аварии с судами-контейнеровозами, вызванные нарушением технологии перевозок, происходят. Некоторые из наиболее характерных аварий описаны в работе [15].
2. Вопросы экономической эффективности при планировании загрузки судов-контейнеровозов, в частности снижения расхода топлива, согласно данным, приведенным в работе [16], и логистическая оптимизация, безусловно, необходимо учитывать, но приоритет при этом должен отдаваться вопросам обеспечения безопасности.
3. Обеспечение безопасности морских контейнерных перевозок невозможно без надлежащего планирования загрузки судов-контейнеровозов, которое учитывает все основные факторы безопасности.
4. Планирование загрузки должно учитывать характеристики каждого конкретного контейнера и особенности судна-контейнеровоза. Размещение контейнеров должно планироваться так, чтобы избежать нарушения требований безопасности.
5. Дальнейшие исследования планируется направить на улучшение предложенной математической модели, включая формулирование целевой функции и ограничений. Планируется составить алгоритм, на основе которого можно разработать специальное программное обеспечение, способное с высокой степенью автоматизации составлять грузовые планы для судов-контейнеровозов с учетом требований безопасности.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Avriel M. Container ship stowage problem: complexity and connection to the coloring of circle graphs / M. Avriel, M. Penn, N. Shpirer // *Discrete Applied Mathematics*. — 2000. — Т. 103. — №. 1-3. — С. 271-279. DOI: 10.1016/S0166-218X(99)00245-0.
2. Ambrosino D. Stowing a containership: the master bay plan problem / D. Ambrosino, A. Sciomachen, E. Tanfani // *Transportation Research Part A: Policy and Practice*. — 2004. — Vol. 38. — Is. 2. — Pp. 81–99. DOI: 10.1016/j.tra.2003.09.002.
3. Delgado A. A constraint programming model for fast optimal stowage of container vessel bays / A. Delgado, R. M. Jensen, K. Janstrup, T. H. Rose, K. H. Andersen // *European Journal of Operational Research*. — 2012. — Vol. 220. — Is. 1. — Pp. 251–261. DOI: 10.1016/j.ejor.2012.01.028.
4. Imai A. Multi-objective simultaneous stowage and load planning for a container ship with container rehandle in yard stacks / A. Imai, K. Sasaki, E. Nishimura, S. Papadimitriou // *European Journal of Operational Research*. — 2006. — Vol. 171. — Is. 2. — Pp. 373–389. DOI: 10.1016/j.ejor.2004.07.066.
5. Liu F. Randomized algorithm with tabu search for multi-objective optimization of large containership stowage plans / F. Liu, M. Y. H. Low, W. J. Hsu, S. Y. Huang, M. Zeng, C. A. Win // *International Conference on Computational Logistics*. — Springer, Berlin, Heidelberg, 2011. — С. 256–272. DOI: 10.1007/978-3-642-24264-9_20.
6. Low M. Y. H. Improving safety and stability of large containerships in automated stowage planning / M. Y. H. Low, M. Zeng, W. J. Hsu, S. Y. Huang, F. Liu, C. A. Win // *IEEE Systems Journal*. — 2011. — Vol. 5. — Is. 1. — Pp. 50–60. DOI: 10.1109/JSYST.2010.2100198.
7. Pacino D. Fast generation of container vessel stowage plans: PhD Thesis / D. Pacino; IT University of Copenhagen. — Denmark, 2012. — 109 p.

8. Pacino D. An accurate model for seaworthy container vessel stowage planning with ballast tanks / D. Pacino, A. Delgado, R. M. Jensen, T. Bebbington // *International Conference on Computational Logistics*. — Springer, Berlin, Heidelberg, 2012. — Pp. 17–32. DOI: 10.1007/978-3-642-33587-7_2.

9. Sciomachen A. The master bay plan problem: a solution method based on its connection to the three-dimensional bin packing problem / A. Sciomachen, E. Tanfani // *IMA Journal of Management Mathematics*. — 2003. — Vol. 14. — Is. 3. — Pp. 251–269. DOI: 10.1093/imaman/14.3.251.

10. Wilson I. D. Container stowage pre-planning: using search to generate solutions, a case study / I. D. Wilson, P. A. Roach, J. A. Ware // *Research and Development in Intelligent Systems XVII*. — Springer, London, 2001. — C. 349–362. DOI: 10.1007/978-1-4471-0269-4_25.

11. Min Z. Improving ship stability in automated stowage planning for large containerships / Z. Min, M. Y. H. Low, H. W. Jing, H. S. Ying, L. Fan, W. C. Aye // *Proceedings of the International MultiConference of Engineers and Computer Scientists – IMECS 2010*. — 2010. — Vol. III.

12. Акмайкин Д. А. Анализ факторов, влияющих на безопасность морских контейнерных перевозок / Д. А. Акмайкин [и др.] // *Транспортное дело России*. — 2015. — № 6. — С. 207–211.

13. Царик Р. С. Оптимизация размещения контейнеров с опасными грузами на борту контейнеровоза / Р. С. Царик // *Современные тенденции и перспективы развития водного транспорта России*. 17 мая 2017 года. Материалы VIII межвузовской научно-практической конференции аспирантов, студентов и курсантов. — СПб.: Изд-во ГУМРФ им. адм. С. О. Макарова, 2017. — С. 31–38.

14. Царик Р. С. Разработка алгоритма формирования контейнерного штабеля для обеспечения требуемой видимости с ходового мостика контейнеровоза / Р. С. Царик, Д. А. Акмайкин // *Вестник Государственного университета морского и речного флота имени адмирала С. О. Макарова*. — 2016. — № 4 (38). — С. 29–43. DOI: 10.21821/2309-5180-2016-8-4-29-43.

15. Царик Р. С. Управление рисками и снижение аварийности в морских контейнерных перевозках / Р. С. Царик [и др.] // *Транспорт: наука, техника, управление. : науч. информ. сб.* — 2015. — № 2. — С. 37–42.

16. Царик Р. С. Оценка влияния дифферента контейнеровоза на расход топлива / Р. С. Царик, Д. А. Акмайкин // *Проблемы транспорта Дальнего Востока: сб. науч. тр.* — Владивосток: ДВО Российской академии транспорта, 2017. — С. 69–73.

REFERENCES

1. Avriel, Mordecai, Michal Penn, and Naomi Shpirer. “Container ship stowage problem: complexity and connection to the coloring of circle graphs.” *Discrete Applied Mathematics* 103.1-3 (2000): 271–279. DOI: 10.1016/S0166-218X(99)00245-0.

2. Ambrosino, Daniela, Anna Sciomachen, and Elena Tanfani. “Stowing a containership: the master bay plan problem.” *Transportation Research Part A: Policy and Practice* 38.2 (2004): 81–99. DOI: 10.1016/j.tra.2003.09.002.

3. Delgado, Alberto, Rune Møller Jensen, Kira Janstrup, Trine Høyer Rose, and Kent Høj Andersen. “A constraint programming model for fast optimal stowage of container vessel bays.” *European Journal of Operational Research* 220.1 (2012): 251–261. DOI: 10.1016/j.ejor.2012.01.028.

4. Imai, Akio, Kazuya Sasaki, Etsuko Nishimura, and Stratos Papadimitriou. “Multi-objective simultaneous stowage and load planning for a container ship with container rehandle in yard stacks.” *European Journal of Operational Research* 171.2 (2006): 373–389. DOI: 10.1016/j.ejor.2004.07.066.

5. Liu, Fan, Malcolm Yoke Hean Low, Wen Jing Hsu, Shell Ying Huang, Min Zeng, and Cho Aye Win. “Randomized algorithm with tabu search for multi-objective optimization of large containership stowage plans.” *International Conference on Computational Logistics*. Springer, Berlin, Heidelberg, 2011. 256–272. DOI: 10.1007/978-3-642-24264-9_20.

6. Low, Malcolm Yoke Hean, Min Zeng, Wen Jing Hsu, Shell Ying Huang, Fan Liu, and Cho Aye Win. “Improving safety and stability of large containerships in automated stowage planning.” *IEEE Systems Journal* 5.1 (2011): 50–60. DOI: 10.1109/JSYST.2010.2100198.

7. Pacino, Dario. Fast Generation of Container Vessel Stowage Plans. PhD Thesis. IT University of Copenhagen. Denmark, 2012.

8. Pacino, Dario, Alberto Delgado, Rune Møller Jensen, and Tom Bebbington. “An accurate model for seaworthy container vessel stowage planning with ballast tanks.” *International Conference on Computational Logistics*. Springer, Berlin, Heidelberg, 2012. 17–32. DOI: 10.1007/978-3-642-33587-7_2.

9. Sciomachen, Anna, and Elena Tanfani. "The master bay plan problem: a solution method based on its connection to the three-dimensional bin packing problem." *IMA Journal of Management Mathematics* 14.3 (2003): 251–269.
10. Wilson, Ian D., Paul A. Roach, and J. Andrew Ware. "Container stowage pre-planning: using search to generate solutions, a case study." *Research and Development in Intelligent Systems XVII*. Springer, London, 2001. 349–362. DOI: 10.1007/978-1-4471-0269-4_25.
11. Min, Zeng, Malcolm Yoke Hean Low, Hsu Wen Jing, Huang Shell Ying, Liu Fan, and Win Cho Aye. "Improving ship stability in automated stowage planning for large containerships." *Proceedings of the International MultiConference of Engineers and Computer Scientists – IMECS 2010*. Vol. III. 2010.
12. Akmaykin, D., R.Tsarik, A. Moskalenko, M. Moskalenko, and S. Klyueva. "Analysis of factors affecting the safety of container shipping." *Transport business of Russia* 6 (2015): 207–210.
13. Tsarik, R.S. "Optimizatsiya razmeshcheniya konteinerov s opasnymi gruzami na bortu kontei-nero-voza." *Sovremennye tendentsii i perspektivy razvitiya vodnogo transporta Rossii. 17 maya 2017 goda. Materialy VIII mezhvuzovskoi nauchno-prakticheskoi konferentsii aspirantov, studentov i kursantov*. SPb.: Izd-vo GUMRF im. adm. S. O. Makarova, 2017. 31–38.
14. Tsarik, Ruslan Stanislavovich, and Denis Aleksandrovich Akmaykin. "Development of container stack forming algorithm for ensuring of required visibility from navigation bridge of container ship." *Vestnik gosudarstvennogo universiteta morskogo i rechnogo flota imeni admiral S. O. Makarova* 4(38) (2016): 29–43. DOI: 10.21821/2309-5180-2016-8-4-29-43.
15. Tsarik, R.S., D.A. Akmaykin, M.A. Moskalenko, and S.V. Losev. "Risk management and reduction of accident rate in container shipping." *Transport: science, equipment, management (Scientific Information Collection)* 2 (2015): 37–42.
16. Tsarik, R.S., and D.A. Akmaikin. "Otsenka vliyaniya differenta konteinerovoza na raskhod topliva." *Problemy transporta Dal'nego Vostoka. Sbornik nauchnykh trudov*. Vladivostok: DVO Rossiiskoi Akademii transporta, 2017. 69–73.

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

Царик Руслан Станиславович — капитан, аспирант
Научный руководитель:
 Акмайкин Денис Александрович
 ФГБОУ ВО «МГУ им. адм. Г. И. Невельского»
 690003, Российская Федерация,
 Владивосток,
 ул. Верхнепортовая, 50а
 e-mail: rex-infinity@yandex.ru
Акмайкин Денис Александрович — кандидат физико-математических наук, доцент
 ФГБОУ ВО «МГУ им. адм. Г. И. Невельского»
 690003, Российская Федерация,
 Владивосток,
 ул. Верхнепортовая, 50а
 e-mail: akmaykin@gmail.com

INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Tsarik, Ruslan Stanislavovich — Master mariner, postgraduate
Supervisor:
 Akmaykin, Denis A.
 Maritime State University named after admiral G.I. Nevelskoi
 50a Verkhneportovaya Str.,
 Vladivostok, 690003, Russian Federation
 e-mail: rex-infinity@yandex.ru
Akmaykin, Denis A. — PhD, associate professor
 Maritime State University named after admiral G.I. Nevelskoi
 50a Verkhneportovaya Str.,
 Vladivostok, 690003, Russian Federation
 e-mail: akmaykin@gmail.com

Статья поступила в редакцию 23 апреля 2020 г.
 Received: April 23, 2020.