

ФЕДЕРАЛЬНОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ БЮДЖЕТНОЕ ОБРАЗОВАТЕЛЬНОЕ
УЧРЕЖДЕНИЕ ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ
«ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ МОРСКОГО И РЕЧНОГО ФЛОТА
ИМЕНИ АДМИРАЛА С. О. МАКАРОВА»

ВЕСТНИК

**ГОСУДАРСТВЕННОГО УНИВЕРСИТЕТА
МОРСКОГО И РЕЧНОГО ФЛОТА
ИМЕНИ АДМИРАЛА С. О. МАКАРОВА**

Том 13. № 3

**Vestnik Gosudarstvennogo universiteta
morskogo i rechnogo flota
imeni admirala S. O. Makarova**

**САНКТ-ПЕТЕРБУРГ
2021**

Вестник Государственного университета морского и речного флота имени адмирала С. О. Макарова. — СПб. : ГУМРФ имени адмирала С. О. Макарова, 2021. — Т. 13. — № 3. — 142 с.

ISSN (print) 2309-5180

ISSN (online) 2500-0551

«Вестник Государственного университета морского и речного флота имени адмирала С. О. Макарова» является научным периодическим изданием, зарегистрированным Федеральной службой по надзору в сфере связи, информационных технологий и массовых коммуникаций (Свидетельство о регистрации СМИ от 17 июля 2013 г. ПИ № ФС 77-54734).

В Вестнике публикуются материалы оригинальных научных исследований и основных результатов диссертаций на соискание ученой степени доктора и кандидата наук по основным группам специальностей в соответствии с Номенклатурой специальностей научных работников **05.22.00 «Транспорт»** в разделах: «Эксплуатация водного транспорта, судовождение», «Водные пути сообщения и гидрография»; **05.08.00 «Кораблестроение»** в разделах: «Судостроение и судоремонт», «Судовые энергетические установки, системы и устройства»; **05.09.00 «Электротехника»** в разделе «Электротехнические комплексы и системы».

Статьи тщательно отбираются по критериям новизны, актуальности, научно-практической значимости, возможности реального использования описанных в них новых технологий на водном транспорте, публикуются на русском и английском языках. Статьи рецензируются независимыми экспертами. Кроме того, в Вестнике публикуются обзорные материалы научных конференций, семинаров и совещаний, сообщения и статьи к юбилейным датам ведущих ученых и знаменательным событиям университета.

Вестник включен в Перечень ведущих рецензируемых журналов и изданий Высшей аттестационной комиссии Министерства образования и науки РФ.

Индекс для подписки в каталоге «Газеты. Журналы» агентства Роспечать: 37276.



ISSN 2309-5180



© Государственный университет морского и речного флота имени адмирала С. О. Макарова, 2021

Гл. редактор

С. О. Барышников

д.т.н., проф.

rector@gumrf.ru

Зам. гл. редактора

А. П. Нырк

д.т.н., проф.

NyrkowAP@gumrf.ru

С. Гуца

Морская академии (г. Щецин,
Польша), д.т.н., проф.

Г. В. Егоров

ген. директор ЗАО «Морское
инженерное бюро — СПб»,
д.т.н., проф.

Р. Качиньски

проректор по развитию
и сотрудничеству Технического
университета (г. Белосток,
Польша), д.т.н., проф.

А. И. Пошивай

заместитель руководителя
Федерального агентства
морского и речного транспорта

А. Е. Сазонов

д.т.н., проф.,
чл.-кор. РАН

Р. М. Юсупов

научный руководитель
Санкт-Петербургского
института информатики
и автоматизации РАН, д.т.н.,
проф., чл.-кор. РАН

РЕДАКЦИЯ:

E-mail: journal@gumrf.ru

http://journal.gumrf.ru

**ЭКСПЛУАТАЦИЯ ВОДНОГО ТРАНСПОРТА,
СУДОВОЖДЕНИЕ 307***Дыда А. А., Пушкарев И. И., Чумакова К. Н.* Алгоритм обхода
Эстатических препятствий для безэкипажного судна 307*Ершов А. А., Петухов П. И.* Оценка эффективности использования
перекачки балласта для предотвращения повреждения корпуса
судна в ледовых условиях 316*Изотов О. А., Бороздин Е. А.* Моделирование транспортно-техноло-
гической системы перевозки сборных грузов 325*Ковыркин С. Г., Моргунов К. П.* Предложения по методике расчета
утечек воды через ворота и затворы судоходных шлюзов 332*Ююкин И. В.* Синтез кубическими сплайнами искаженной изолинии
в аспекте использования дифференциального режима спутниковой
навигации 341*Царик Р. С.* Оценка влияния метацентрической высоты
контейнеровоза на формирование условий, способствующих
возникновению параметрической бортовой качки 359*Кузнецов А. Л., Кириченко А. В., Семенов А. Д.* Оценка времени
доставки в сложных цепях поставки с помощью моделирования 372**ВОДНЫЕ ПУТИ СООБЩЕНИЯ И ГИДРОГРАФИЯ 384***Холопцев А. В., Подпорин С. А.* Изменения сплоченности
ледяного покрова пролива Лонга в летне-осенние
месяцы 1993–2018 гг. 384*Андреева Е. В.* Многокритериальный подход в задаче выбора
оптимальных маршрутов в акватории Северного морского пути 399**СУДОВЫЕ ЭНЕРГЕТИЧЕСКИЕ УСТАНОВКИ, СИСТЕМЫ
И УСТРОЙСТВА 409***Белов Д. Е., Ивановская А. В.* Влияние физических показателей
топлива на износ плунжерных пар насосов высокого давления 409

**Члены
редколлегии:**

О. К. Безюков, д.т.н.
А. Т. Беккер, д.т.н.
Н. И. Ватин, д.т.н.
П. А. Гарибин, д.т.н.
Д. П. Голоскоков, д.т.н.
В. А. Жуков, д.т.н.
Ю. М. Искандеров, д.т.н.
О. Г. Каратаев, д.т.н.
В. В. Каретников, д.т.н.
А. В. Кириченко, д.т.н.
М. Н. Кирсанов, д.ф.-м.н.
М. А. Колосов, д.т.н.
Е. А. Королева, д.э.н.
И. И. Костылев, д.т.н.
А. Л. Кузнецов, д.т.н.
С. Е. Кузнецов, д.т.н.
Е. А. Лаврентьева, д.э.н.
В. А. Логиновский, д.т.н.
В. Е. Марлей, д.т.н.
А. М. Никитин, д.т.н.
Т. А. Пантина, д.э.н.
Л. И. Погодаев, д.т.н.
В. И. Решняк, д.т.н.
В. В. Романовский, д.т.н.
А. В. Саушев, д.т.н.
С. В. Смоленцев, д.т.н.
А. Л. Степанов, д.т.н.
М. В. Сухотерин, д.т.н.
Е. Г. Трунин, к.э.н.
А. Л. Тезиков, д.т.н.
В. Б. Чистов, д.т.н.

ЭЛЕКТРОТЕХНИЧЕСКИЕ КОМПЛЕКСЫ И СИСТЕМЫ..... 419

Самосейко В. Ф., Гуськов В. О. Алгоритм векторного управления асинхронным электроприводом с оценкой сопротивления ротора 419
Широков Н. В. Превентивная защита судовых электро- энергетических систем от перегрузки при ошибочных действиях экипажа 430

CONTENTS

OPERATION OF WATER TRANSPORT, NAVIGATION 307

Dyda A. A., Pushkarev I. I., Chumakova K. N. Static obstacles avoidance algorithm for unmanned ship 307

Ershov A. A., Petukhov P. I. Evaluation of the efficiency of using ballast pumping to prevent damage to the ship's hull in ice conditions..... 316

Izotov O. A., Borozdin Y. A. Simulation of combined cargoes transportation system 325

Kovyrshin S. G., Morgunov K. P. Proposals on the method for calculating water leakages through the sluice gates and valves 332

Yuyukin I. V. Cubic splines synthesis of a distorted isoline in the aspect of using differential mode of satellite navigation 341

Tsarik R. S. Evaluating the metacentric height of container ship influence on generation of conditions contributing to the occurrence of parametric rolling resonance 359

Kuznetsov A. L., Kirichenko A. V., Semenov A. D. Evaluating lead-time in complex supply chains by simulation technique 372

WATERWAYS AND HYDROGRAPHY 384

Kholoptsev A. V., Podporin S. A. Variations in sea-ice concentration of the Long strait during the summer-fall navigation seasons in 1993–2018 384

Andreeva E. V. Multi-criteria approach to the problem of choosing the optimal routes in the waters of the Northern Sea Route 399

SHIP POWER PLANTS, SYSTEMS AND DEVICES..... 409

Belov D. E., Ivanovskaya A. V. Fuel physical parameters influence on plunger pairs wear of high pressure fuel pumps 409

Volume 13. № 3

2021

EDITOR-IN-CHIEF

S. O. Baryshnikov
doctor of technical Sciences, Prof.
rector@gumrf.ru

Deputy Editor-in-Chief

A. P. Nyrkov
doctor of technical Sciences, Prof.
NyrkovAP@gumrf.ru

S. Gutsma

Maritime Academy (g.Schetsin, Poland), doctor of technical Sciences, Prof.

G. V. Yegorov

General Director of "Marine Engineering Bureau - St. Petersburg", doctor of technical Sciences, Prof.

R. Kachin'ski

Vice-Rector for Development and Cooperation of the Technical University (Bialystok, Poland), doctor of technical Sciences, Prof.

A. I. Poshivay

Deputy Head of the Federal Agency of Sea and River Transport

A. Ye. Sazonov

doctor of technical Sciences, Prof., corresponding member of the Russian Academy of Sciences

M. Yusupov

scientific leader of "St. Petersburg Institute for Informatics and Automation of RAS", doctor of technical Sciences, Prof., corresponding member of the Russian Academy of Sciences

EDITORIAL STAFF:

E-mail: journal@gumrf.ru
http://journal.gumrf.ru

**Editorial
Collegium:**

O. K. Bezyukov,
doctor of technical Sciences
A. T. Bekker,
doctor of technical Sciences
N. I. Vatin,
doctor of technical Sciences
P. A. Garibin,
doctor of technical Sciences
D. P. Goloskokov,
doctor of technical Sciences
V. A. Zhukov,
doctor of technical Sciences
Y. M. Iskanderov,
doctor of technical Sciences
O. G. Karatayev,
doctor of technical Sciences
V. V. Karetnikov,
doctor of technical Sciences
A. V. Kirichenko,
doctor of technical Sciences
M. N. Kirsanov,
doctor of phys.-math. Sciences
M. A. Kolosov,
doctor of technical Sciences
Ye. A. Koroleva,
doctor of economic Sciences
I. I. Kostylev,
doctor of technical Sciences
A. L. Kuznetsov,
doctor of technical Sciences
S. Ye. Kuznetsov,
doctor of technical Sciences
Ye. A. Lavrentyeva,
doctor of economic Sciences
V. A. Loginovskiy,
doctor of technical Sciences
V. Ye. Marley,
doctor of technical Sciences
A. M. Nikitin,
doctor of technical Sciences
T. A. Pantina,
doctor of economic Sciences
L. I. Pogodayev,
doctor of technical Sciences
V. I. Reshnyak,
doctor of technical Sciences
V. V. Romanovskiy,
doctor of technical Sciences
A. V. Saushev,
doctor of technical Sciences
S. V. Smolentsev,
doctor of technical Sciences
A. L. Stepanov,
doctor of technical Sciences
M. V. Sukhoterin,
doctor of technical Sciences
Ye. G. Trunin,
candidate of economic Sciences
A. L. Tezikov,
doctor of technical Sciences
V. B. Chistov,
doctor of technical Sciences

ELECTRICAL EQUIPMENT AND SYSTEMS..... 419

Samosejko V. F., Guskov V. O. Algorithm for asynchronous electric
drive vector control with rotor resistance estimation..... 419
Shirokov N. V. Preventive protection of ship's electric power systems
from overload in case of erroneous actions of the crew 430

ЭКСПЛУАТАЦИЯ ВОДНОГО ТРАНСПОРТА, СУДОВОЖДЕНИЕ

DOI: 10.21821/2309-5180-2021-13-3-307-315

STATIC OBSTACLES AVOIDANCE ALGORITHM FOR UNMANNED SHIP

A. A. Dyda, I. I. Pushkarev, K. N. Chumakova

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

An algorithm for the formation of a route for unmanned ship along a given trajectory and avoiding static obstacles is proposed in the paper. The algorithm is implemented by combining the trajectory motion function and the function that generates circulation around a given point (obstacle). The route of movement is defined by a set of waypoints with coordinates connected by straight line segments. The obstacle is specified in the form of the center coordinate and the radius of the obstacle. To move along the trajectory, an algorithm based on the use of the sum of the gradient vector of the auxiliary function and the vector that specifies the direction on a given route section is used. This allows the vessel to move along a given route. Circulations around the obstacle are formed on the basis of a special class of vector fields proposed in the works of D. Panagou, H. G. Tanner, K. J. Kyriakopoulos. By orienting the circulation in the direction of movement along the trajectory at the point of the obstacle and limiting it to a given maneuvering zone, a navigation vector field, which is a set of vectors showing the required direction of movement at a specific point, is formed. To reduce the probability of an unmanned ship piling up on an obstacle and to ensure safe maneuvering, an additional “repulsive” vector field, which forms a “forbidden” zone in the navigation vector field, is introduced. The algorithms under study are implemented in the Matlab / Simulink modeling environment. The results of numerical experiments are presented for various combinations of algorithm parameters. The results are presented graphically in the form of displaying navigation vector fields showing the movement direction of the unmanned ship, and displaying obstacles, prohibited zones and maneuvering zones. Further improvement of the algorithm for solving problems of avoiding dynamic and group obstacles is planned.

Keywords: unmanned ship, waypoint, algorithm, vector field, navigation vector field, circulation, trajectory, route, static obstacle, maneuvering zone.

For citation:

Dyda, Aleksandr A., Igor I. Pushkarev, and Ksenya N. Chumakova. “Static obstacles avoidance algorithm for unmanned ship.” *Vestnik Gosudarstvennogo universiteta morskogo i rechnogo flota imeni admirala S. O. Makarova* 13.3 (2021): 307–315. DOI: 10.21821/2309-5180-2021-13-3-307-315.

УДК 681.5

АЛГОРИТМ ОБХОДА СТАТИЧЕСКИХ ПРЕПЯТСТВИЙ ДЛЯ БЕЗЭКИПАЖНОГО СУДНА

А. А. Дыда, И. И. Пушкарев, К. Н. Чумакова

Морской Государственный университет имени адмирала Г. И. Невельского,
Владивосток, Российская Федерация

В работе предложен алгоритм формирования маршрута движения безэкипажного судна по заданной траектории и обходу статических препятствий. Алгоритм реализован путем комбинирования функции движения по траектории и функции, формирующей циркуляцию вокруг заданной точки (препятствия). Маршрут движения задается набором путевых точек с координатами соединенных отрезками прямых, препятствие — в виде координаты центра и радиуса препятствия. Для движения по траектории используется алгоритм, основанный на использовании суммы вектора градиента вспомогательной функции и вектора, задающего направление на заданном участке маршрута, что позволяет обеспечить движение судна вдоль заданного маршрута. Циркуляции вокруг препятствия формируются на основе специального класса

векторных полей, предложенных в работах D. Panagou, H. G. Tanner, K. J. Kyriakopoulos. При ориентировании циркуляции в направлении движения по траектории в точке препятствия и ограничении ее заданной зоной маневрирования формируется навигационное векторное поле — набор векторов, показывающих требуемое направление движения в конкретной точке. Для уменьшения вероятности навала безэкипажного судна на препятствие и обеспечения безопасного маневрирования введено дополнительное «отталкивающее» векторное поле, формирующее «запрещенную» зону в навигационном векторном поле. Исследуемые алгоритмы реализованы в среде моделирования Matlab/Simulink. Приведены результаты численных экспериментов для различных сочетаний параметров алгоритма. Результаты представлены графически в виде отображения навигационных векторных полей, показывающих направление движения безэкипажного судна и отображения препятствий, запрещенных зон и зон маневрирования. Планируется дальнейшее совершенствование алгоритма для решения задач обхода динамических и групповых препятствий.

Ключевые слова: безэкипажное судно, путевая точка, алгоритм, векторное поле, навигационное векторное поле, циркуляция, траектория, маршрут, статическое препятствие, зона маневрирования.

Для цитирования:

Дыда А. А. Алгоритм обхода статических препятствий для безэкипажного судна / А. А. Дыда, И. И. Пушкарев, К. Н. Чумакова // Вестник Государственного университета морского и речного флота имени адмирала С. О. Макарова. — 2021. — Т. 13. — № 3. — С. 307–315. DOI: 10.21821/2309-5180-2021-13-3-307-315.

Введение (Introduction)

В современном мире наблюдается повышенный интерес к новому виду морского транспорта — безэкипажным судам (БЭС) [1], [2] как обширной области, имеющей большой потенциал развития и разнообразные сферы применения — от дистанционно управляемых судов с берегового поста управления до полностью автоматических судов, работающих без вмешательства человека.

Безэкипажные суда имеют множество преимуществ по сравнению с традиционными, и в первую очередь их применение позволяет исключить пребывание людей в опасных морских условиях, а также снизить стоимость эксплуатации и повысить безопасность судоходства [3], [4]. Все это заставляет многие страны и компании проводить научные исследования и опытно-конструкторские работы, направленные на развитие технологий безэкипажного судовождения.

Следует отметить, что в настоящее время существует ряд серьезных проблем и ограничений в области безэкипажных судов — это и устаревшее морское законодательство, в котором не учтены современные достижения науки и техники в безэкипажных технологиях [5], и организационные трудности, связанные с использованием и эксплуатацией БЭС, и ряд серьезных технических проблем, требующих качественного решения. К последним относятся вопросы, связанные с разработкой системы управления движением БЭС, которым посвящено большое количество работ. В частности, в работе [6] решается задача синтеза траектории движения судна, принципы построения алгоритмов управления БЭС в акватории порта рассмотрены в статье [7], в работе [8] исследована гибридная система управления движением БЭС в заданную точку.

Целью настоящей работы является решение частной задачи по созданию алгоритма обхода статических препятствий, встречающихся при движении БЭС по заданной траектории.

Методы и материалы (Methods and Materials)

Для движения БЭС по заданной траектории, представленной набором путевых точек с координатами (x_i, y_i) , $i = 0, 1, \dots, n$, используем алгоритм [9] на основе градиента вспомогательной функции, обеспечивающий движение судна вдоль заданного маршрута, описанный далее.

Уравнение i -го фрагмента планируемой траектории движения, соединяющей путевые точки (x_i, y_i) с (x_{i+1}, y_{i+1}) имеет вид:

$$k_i = \frac{y_{i+1} - y_i}{x_{i+1} - x_i}; \quad b_i = y_i - k_i x_i; \quad (1)$$

$$y = k_i x + b_i, \quad (2)$$

где k_i, b_i — соответствующие константы, определяемые через координаты путевых точек.

Введем функцию двух переменных $F_i(x, y)$ так, чтобы она достигала экстремума (максимума) на i -м участке маршрута судна:

$$F_i(x, y) = -\frac{1}{2}(y - k_i x - b_i)^2. \quad (3)$$

Компоненты вектора-градиента функции $F_i(x, y)$ вычисляются по формуле

$$\text{grad} F_i = (k_i(y - k_i x - b_i), -y + k_i x + b_i). \quad (4)$$

Введем вспомогательный вектор $w_i = (w_{xi}, w_{yi})$ единичной длины, направленный вдоль i -го участка траектории движения судна. Его компоненты вычисляются через координаты путевых точек (x_i, y_i) и (x_{i+1}, y_{i+1}) , определяющих i -й участок запланированной траектории движения судна:

$$w_{xi} = \frac{x_{i+1} - x_i}{\sqrt{(x_{i+1} - x_i)^2 + (y_{i+1} - y_i)^2}}; \quad (5)$$

$$w_{yi} = \frac{y_{i+1} - y_i}{\sqrt{(x_{i+1} - x_i)^2 + (y_{i+1} - y_i)^2}}.$$

Определим вектор F_{w_i} :

$$F_{w_i} = \text{grad} F_i(x, y) + w_i = \left(\frac{dF_i}{dx_i} + a w_{xi}, \frac{dF_i}{dy_i} + a w_{yi} \right), \quad (6)$$

где a — весовой коэффициент, $a > 0$.

На рис. 1 показан пример поля векторов градиента для функции F_{w_i} , которое является навигационным векторным полем — набором векторов, показывающих требуемое направление движение БЭС в конкретной точке.

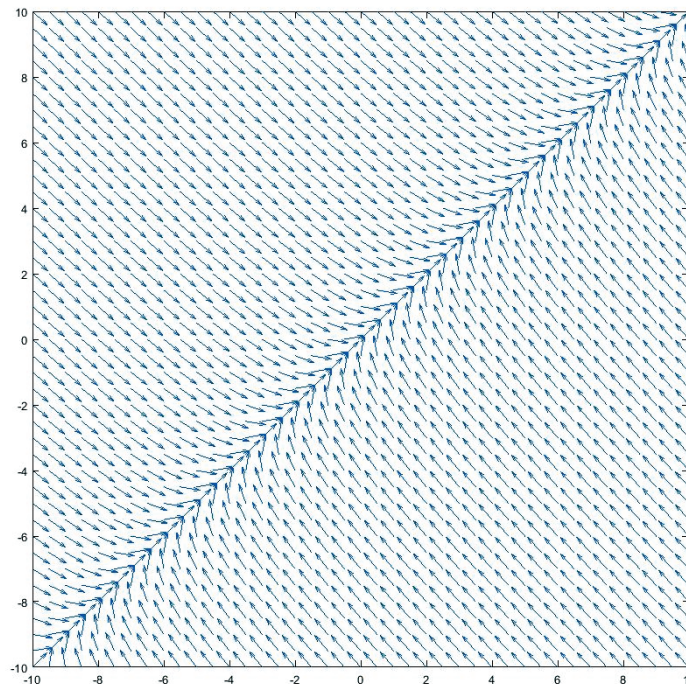


Рис. 1. Пример поля векторов F_{w_i} (вектора нормированы)

Существует ряд публикаций, в которых предлагаются различные подходы для построения алгоритма обхода статических препятствий. Для формирования траектории обхода препятствия

используем следующий класс векторных полей, предложенный в работах D. Panagou, H. G. Tanner, K. J. Kyriakopoulos [10], [11]:

$$F'(r) = \lambda(\rho^T r)r - \rho(r^T r), \quad (7)$$

где $r = \begin{bmatrix} x & y \end{bmatrix}^T$, $p = \begin{bmatrix} p_x & p_y \end{bmatrix}^T$ — параметры ориентации поля;

λ — специальный параметр.

При определенных значениях λ приведенная формула позволяет создавать векторные поля с различными свойствами, в том числе формирующие циркуляцию вокруг заданной точки. Для $\lambda = 1$ векторное поле имеет вид:

$$\begin{aligned} F'_x &= p_y xy - \rho_x y^2; \\ F'_y &= p_x xy - \rho_y x^2; \\ p_x &= \cos(\varphi); \\ p_y &= \sin(\varphi), \end{aligned} \quad (8)$$

где φ — угол ориентации векторного поля.

Визуальное представление [12] данного векторного поля приведено на рис. 2. Очевидно, что векторное поле (8), позволяющее обходить препятствие по окружности, требует модификации для продолжения движения по заданному маршруту без избыточного маневрирования.

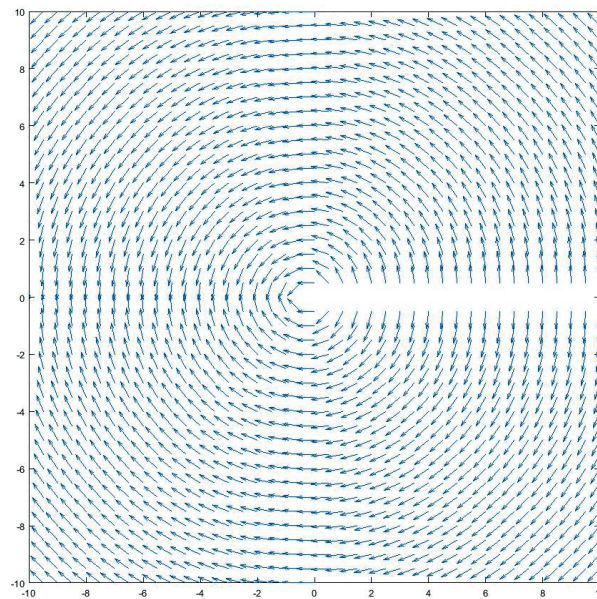


Рис. 2. Векторное поле
 $F'(\lambda = 1, p_x = 1, p_y = 0, \text{ вектора нормированы})$

Разделим векторное поле F' на две полуплоскости A^+ и A^- прямой, проходящей через центр препятствия и перпендикулярной вектору направления движения F_{w_i} в данной точке. Для положительной полуплоскости A^+ векторное поле F' формируется при $\lambda = 0$. Тогда итоговое векторное поле обхода препятствия F' имеет вид (рис. 3):

$$F' = \begin{cases} (p_y xy - \rho_x y^2, p_x xy - \rho_y x^2) & \text{— для точек } (x, y) \in A^-; \\ (-\rho_x x^2 - \rho_y y^2, -\rho_x y^2 - \rho_y x^2) & \text{— для точек } (x, y) \in A^+. \end{cases} \quad (9)$$

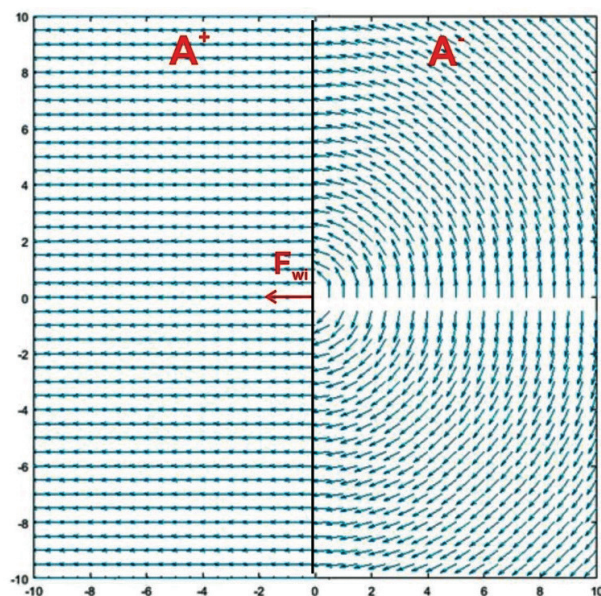


Рис. 3. Итоговое векторное поле F'
($p_x = 1, p_y = 0$, вектора нормированы)

Результаты (Results)

Построим навигационное векторное поле F (рис. 4) для движения БЭС с учетом векторного поля обхода статического препятствия F' и векторного поля заданной траектории движения F_{wi} :

$$F = \begin{cases} \delta_i F_{wi} + (1 - \delta_i) F' & \text{для } D_i \leq R_2; \\ F_{wi} & \text{для } D_i > R_2; \end{cases} \quad (10)$$

$$\delta_i = \frac{D_i - R_1}{R_2 - R_1},$$

где δ_i — коэффициент влияния; R_1 — радиус препятствия; R_2 — радиус зоны маневрирования; D_i — расстояние от центра препятствия до текущего положения безэкипажного судна.

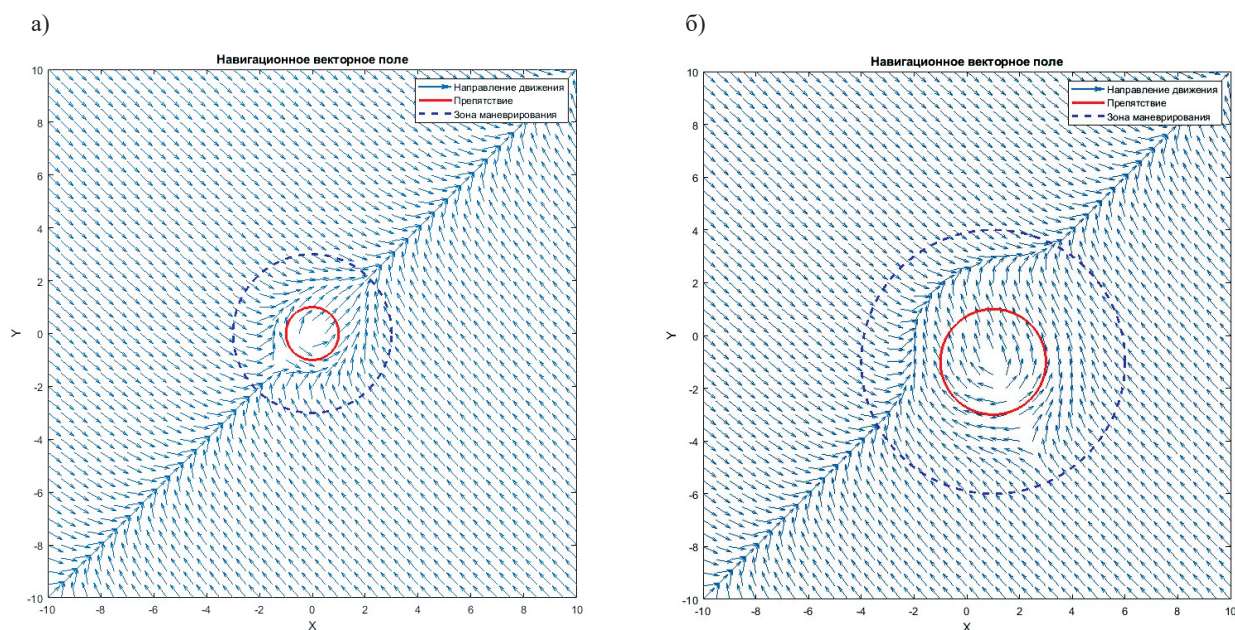


Рис. 4. Примеры навигационного векторного поля F : а — $R_1 = 1, R_2 = 3$, координаты препятствия (0,0); б — $R_1 = 2, R_2 = 5$, координаты препятствия (1, -1)

Навигационное векторное поле F позволяет двигаться по заданной траектории, обходя имеющиеся на пути статические препятствия, с учетом размера препятствия и заданной зоны маневрирования. Однако в связи с особенностями безэкипажного судна (Underactuated Vehicle) [13], на которое оказывает значительное воздействие внешняя среда (ветер, течения), возможен навал БЭС на препятствие. Для уменьшения вероятности подобного последствия навигационное векторное поле F может быть дополнено введением «отталкивающих» векторов в ближней области препятствия.

Выберем «отталкивающее» векторное поле F'' для препятствия с координатами $(x_{\text{obst}}, y_{\text{obst}})$ в виде:

$$\begin{aligned} F''_x &= 2(x - x_{\text{obst}}); \\ F''_y &= 2(y - y_{\text{obst}}). \end{aligned} \quad (11)$$

Введем параметр радиус запрещенной зоны R'_1 , которым будут ограничены влияние векторного поля F'' и коэффициент μ_i . Тогда навигационное векторное поле F примет вид:

$$F = \begin{cases} F'' & \text{для } D_i \leq R_1; \\ \mu_i F' + (1 - \mu_i) F'' & \text{для } R_1 > D_i \leq R'_1; \\ \delta_i F_{wi} + (1 - \delta_i) F'' & \text{для } R'_1 > D_i \leq R_2; \\ F_{wi} & \text{для } D_i > R_2 \end{cases}$$

$$\delta_i = \frac{D_i - R'_1}{R_2 - R'_1};$$

$$\mu_i = \frac{D_i - R_1}{R'_1 - R_1}.$$

$$(12)$$

Графическое представление примеров полученных навигационных полей при различных параметрах приведено на рис. 5.

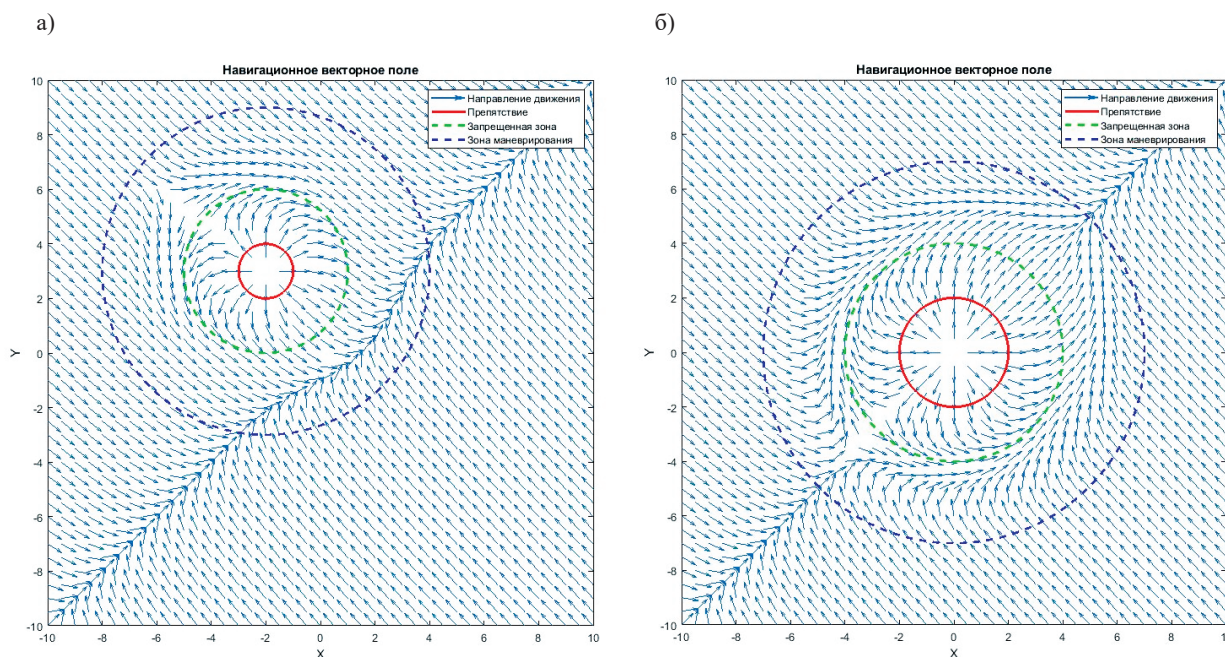


Рис. 5. Примеры навигационного векторного поля F :
а — $R_1 = 1, R'_1 = 3, R_2 = 6$, координаты препятствия $(-2, 3)$;
б — $R_1 = 2, R'_1 = 4, R_2 = 7$, координаты препятствия $(0, 0)$

Заключение (Conclusion)

Предложен алгоритм (12), использующий специальные функции для генерации навигационного векторного поля, которое формирует требуемое направление движения БЭС с учетом обхода статических препятствий. Алгоритм обеспечивает безопасный обход препятствий путем введения дополнительного «отталкивающего» векторного поля, принуждающее судно к маневрированию в разрешенной зоне. Приведенные результаты моделирования подтвердили работоспособность алгоритма при различных параметрах. Планируется его дальнейшее развитие для решения задач обхода динамических и групповых препятствий.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Koikas G.* New Technology trends in the design of Autonomous Ships / G. Koikas, M. Papoutsidakis, N. Nikitakos // International Journal of Computer Application. — 2019. — Vol. 178. — No. 25. — Pp. 4–7. DOI: 10.5120/ijca2019919043.
2. *Komianos A.* The autonomous shipping era. operational, regulatory, and quality challenges / A. Komianos // TransNav: International Journal on Marine Navigation and Safety of Sea Transportation. — 2018. — Vol. 12. — No. 2. — Pp. 335–348. DOI: 10.12716/1001.12.02.15.
3. *Kretschmann L.* Analyzing the economic benefit of unmanned autonomous ships: An exploratory cost-comparison between an autonomous and a conventional bulk carrier / L. Kretschmann, H. C. Burmeister, C. Jahn // Research in transportation business & management. — 2017. — Vol. 25. — Pp. 76–86. DOI: 10.1016/j.rtbm.2017.06.002.
4. *Wróbel K.* Towards the assessment of potential impact of unmanned vessels on maritime transportation safety / K. Wróbel, J. Montewka, P. Kujala // Reliability Engineering & System Safety. — 2017. — Vol. 165. — Pp. 155–169. DOI: 10.1016/j.ress.2017.03.029.
5. *Дмитриев В. И.* Методы обеспечения безопасности мореплавания при внедрении беспилотных технологий / В. И. Дмитриев, В. В. Каретников // Вестник Государственного университета морского и речного флота имени адмирала С. О. Макарова. — 2017. — Т. 9. — № 6. — С. 1149–1158. DOI: 10.21821/2309-5180-2017-9-6-1149-1158.
6. *Смоленцев С. В.* Простая аналитическая модель движения судна / С. В. Смоленцев, Д. В. Исаков // Вестник Государственного университета морского и речного флота имени адмирала С. О. Макарова. — 2019. — Т. 11. — № 1. — С. 7–21. DOI: 10.21821/2309-5180-2019-11-1-7-21.
7. *Каретников В. В.* Основные принципы построения алгоритмов управления беспилотным судном в акватории порта / В. В. Каретников, С. В. Рудых, А. А. Буцанец // Речной транспорт (XXI век). — 2019. — № 2 (90). — С. 55–57.
8. *Пшихопов В. Х.* Гибридная система управления движением безэкипажного судна в заданную точку / В. Х. Пшихопов, М. Ю. Медведев, В. В. Соловьев // Известия ЮФУ. Технические науки. — 2019. — № 1 (203). — С. 163–176. DOI: 10.23683/2311-3103-2019-1-163-176.
9. *Дыда А. А.* Подход к управлению судном по траектории на основе градиента вспомогательной функции / А. А. Дыда, К. Н. Чумакова, И. И. Пушкарев // Научные проблемы водного транспорта. — 2020. — № 65. — С. 27–36. DOI: 10.37890/jwt.vi65.125.
10. *Panagou D.* Control of nonholonomic systems using reference vector fields / D. Panagou, H. G. Tanner, K. J. Kyriakopoulos // 2011 50th IEEE Conference on Decision and Control and European Control Conference. — IEEE, 2011. — Pp. 2831–2836. DOI: 10.1109/CDC.2011.6160922.
11. *Panagou D.* Motion planning and collision avoidance using navigation vector fields / D. Panagou // 2014 IEEE International Conference on Robotics and Automation (ICRA). — IEEE, 2014. — Pp. 2513–2518. DOI: 10.1109/ICRA.2014.6907210.
12. *Сирота А. А.* Методы и алгоритмы анализа данных и их моделирование в Matlab: учеб. пособие / А. А. Сирота. — СПб.: БХВ — Петербург, 2016. — 384 с.
13. *Yi G.* Research on Underactuated USV Path Following Algorithm / G. Yi, Z. Liu, J. Q. Zhang, J. Dong // 2020 IEEE 4th Information Technology, Networking, Electronic and Automation Control Conference (ITNEC). — IEEE, 2020. — Vol. 1. — Pp. 2141–2145. DOI: 10.1109/ITNEC48623.2020.9085222.

REFERENCES

1. Koikas, G., M. Papoutsidakis, and N. Nikitakos. "New Technology trends in the design of Autonomous Ships." *International Journal of Computer Application* 178.25 (2019): 4–7. DOI: 10.5120/ijca2019919043.
2. Komianos, Aristotelis. "The autonomous shipping era. Operational, regulatory, and quality challenges." *TransNav: International Journal on Marine Navigation and Safety of Sea Transportation* 12.2 (2018): 335–348. DOI: 10.12716/1001.12.02.15.
3. Kretschmann, Lutz, Hans-Christoph Burmeister, and Carlos Jahn. "Analyzing the economic benefit of unmanned autonomous ships: An exploratory cost-comparison between an autonomous and a conventional bulk carrier." *Research in transportation business & management* 25 (2017): 76–86. DOI: 10.1016/j.rtbm.2017.06.002.
4. Wróbel, Krzysztof, Jakub Montewka, and Pentti Kujala. "Towards the assessment of potential impact of unmanned vessels on maritime transportation safety." *Reliability Engineering & System Safety* 165 (2017): 155–169. DOI: 10.1016/j.ress.2017.03.029.
5. Dmitriev, Vladimir I., and Vladimir V. Karetnikov. "Methods of ensuring the safety of navigation when implement unmanned technology." *Vestnik Gosudarstvennogo universiteta morskogo i rechnogo flota imeni admiral S. O. Makarova* 9.6 (2017): 1149–1158. DOI: 10.21821/2309-5180-2017-9-6-1149-1158.
6. Smolentsev, Sergey V., and Dmitry V. Isakov. "A simple analytical model of ship movement." *Vestnik Gosudarstvennogo universiteta morskogo i rechnogo flota imeni admiral S. O. Makarova* 11.1 (2019): 7–21. DOI: 10.21821/2309-5180-2019-11-1-7-21.
7. Karetnikov, V., S. Rudykh, and A. Butsanets. "Basic principles for creating algorithms of control unmanned ship in port's water area." *River transport (21st century)* 2(90) (2019): 55–57.
8. Pshikhopov, Viacheslav Khasanovich, Mikhail Yur'evich Medvedev, and Viktor Vladimirovich Solovjev. "A hybrid control system of movement of unmanned vessel to a given point." *Izvestiya SFedU. Engineering sciences* 1(203) (2019): 163–176.
9. Dyda, Alexander A., Ksenya N. Chumakova, and Igor I. Pushkarev. "Auxiliary function gradient approach to marine vehicle path-following control." *Russian Journal of Water Transport* 65 (2020): 27–36. DOI: 10.37890/jwt.vi65.125.
10. Panagou, Dimitra, Herbert G. Tanner, and Kostas J. Kyriakopoulos. "Control of nonholonomic systems using reference vector fields." *2011 50th IEEE Conference on Decision and Control and European Control Conference*. IEEE, 2011. 2831–2836. DOI: 10.1109/CDC.2011.6160922.
11. Panagou, Dimitra. "Motion planning and collision avoidance using navigation vector fields." *2014 IEEE International Conference on Robotics and Automation (ICRA)*. IEEE, 2014. 2513–2518. DOI: 10.1109/ICRA.2014.6907210.
12. Sirota, A. A. *Metody i algoritmy analiza dannykh i ikh modelirovanie v Matlab: ucheb. posobie*. SPb.: BKhV — Peterburg, 2016.
13. Yi, Ge, Zhong Liu, Jian-Qiang Zhang, and Jiao Dong. "Research on Underactuated USV Path Following Algorithm." *2020 IEEE 4th Information Technology, Networking, Electronic and Automation Control Conference (ITNEC)*. Vol. 1. IEEE, 2020. 2141–2145. DOI: 10.1109/ITNEC48623.2020.9085222.

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

Дыда Александр Александрович — доктор технических наук, профессор
 Морской государственный университет имени адмирала Г. И. Невельского
 690003, Российская Федерация, г. Владивосток,
 ул. Верхнепортовая, д. 50а
 e-mail: adyda@mail.ru
Пушкарев Игорь Игоревич — аспирант
Научный руководитель:
 Дыда Александр Александрович
 Морской государственный университет имени адмирала Г. И. Невельского
 690003, Российская Федерация, г. Владивосток,
 ул. Верхнепортовая, д. 50а
 e-mail: B_r_i_g88@mail.ru

INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Dyda, Aleksandr A. — Dr. of Technical Sciences, professor
 Maritime State University named after admiral G. I. Nevelskoy
 50a, Verhneportovaya Str., Vladivostok, 690003,
 Russian Federation
 e-mail: adyda@mail.ru
Pushkarev, Igor I. — Postgraduate
Supervisor:
 Dyda, Aleksandr A.
 Maritime State University named after admiral G. I. Nevelskoy
 50a, Verhneportovaya Str., Vladivostok, 690003,
 Russian Federation
 e-mail: B_r_i_g88@mail.ru

Чумакова Ксения Николаевна — аспирант
Научный руководитель:
Дыда Александр Александрович
Морской государственный университет имени
адмирала Г. И. Невельского
690003, Российская Федерация, г. Владивосток,
ул. Верхнепортовая, д. 50а
e-mail: ksushechka_1991@mail.ru

Chumakova, Ksenya N. — Postgraduate
Supervisor:
Dyda, Aleksandr A.
Maritime State University named
after admiral G. I. Nevelskoy
50a, Verhneportovaya Str., Vladivostok, 690003,
Russian Federation
e-mail: ksushechka_1991@mail.ru

*Статья поступила в редакцию 19 марта 2021 г.
Received: March 19, 2021.*

EVALUATION OF THE EFFICIENCY OF USING BALLAST PUMPING TO PREVENT DAMAGE TO THE SHIP'S HULL IN ICE CONDITIONS

A. A. Ershov, P. I. Petukhov

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

The subject of the study is ice navigation, which is always accompanied by significant difficulties and dangers for the ship, its passengers and crew. The most dangerous situation that occurs if at a certain stage of navigation in ice conditions, the ice begins to move, leading to compression of the ice channel, where the ship is located, is considered. In this case, the pressure forces from the ice floes compressing the channel are applied to the vessel hull. These forces, which clamp the ship in the conditions of the ice channel, hinder its movement, contribute to the destruction of the ship hull, create a vacuum and lead to the possible death of the ship, its passengers and crew. The use of ballast pumping to prevent clamping the vessel when the ice channel is compressed by boatmasters navigating in ice conditions is investigated. It is noted that the ballast pumping allows you to deal with the "clamping" of the hull by ice to carry out movement in conditions of the ice channel compression. The advantage of its application is the independence of this procedure from other measures related to the vessel movement and the release from the ice captivity, i. e. to the vessel operation. It can be carried out together with the work of the ship's propulsion system, establishment of ice anchors, washing the hull, etc. Other advantages can be found in ballast transfer operations that can prevent damage to the ship's hull in the conditions of the ice channel compression. At present, the lack of a scientifically based assessment of the efficiency of ballast pumping does not allow us to determine the possibilities and advantages of these measures for a wider range of tasks in order to ensure the safety and security of ship movement in the ice conditions, especially when the ice channel is compressed. The application of a scientifically based analysis and evaluation of the ballast pumping efficiency in the ice navigation conditions is proposed in the paper. This will expand the list of vessels types that may be offered to use this method to avoid damages and their dangerous consequences when navigating in the ice conditions.

Keywords: ice navigation, compression of the ice channel, use of ballast pumping, prevention of ship damage.

For citation:

Ershov, Andrey A., and Pavel I. Petukhov. "Evaluation of the efficiency of using ballast pumping to prevent damage to the ship's hull in ice conditions." *Vestnik Gosudarstvennogo universiteta morskogo i rechnogo flota imeni admiral S. O. Makarova* 13.3 (2021): 316–324. DOI: 10.21821/2309-5180-2021-13-3-316-324.

УДК 655.62.052.4

ОЦЕНКА ЭФФЕКТИВНОСТИ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ ПЕРЕКАЧКИ БАЛЛАСТА ДЛЯ ПРЕДОТВРАЩЕНИЯ ПОВРЕЖДЕНИЯ КОРПУСА СУДНА В ЛЕДОВЫХ УСЛОВИЯХ

А. А. Ершов, П. И. Петухов

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

Темой исследования является ледовое плавание, всегда сопровождающееся значительными трудностями и опасностями для судна, его пассажиров и экипажа. Рассматривается наиболее опасная ситуация, возникающая в том случае, если на определенном этапе плавания в ледовых условиях начинается подвижка льда, приводящая к сжатию ледового канала, в котором находится судно. В этом случае на корпус судна оказываются силы давления со стороны льдин, сжимающих канал. Эти силы, зажимающие судно в условиях ледового канала, препятствуют его движению, способствуют разрушению корпуса судна, созданию водотечности и приводят к возможной гибели судна, его пассажиров и экипажа. Исследовано использование перекачки балласта для предотвращения зажима судна при сжатии ледового канала су-

доводителями, осуществляющими плавание в ледовых условиях. Отмечается, что перекачка балласта позволяет бороться с «зажимом» корпуса льдами для осуществления движения в условиях сжатия ледового канала. Преимуществом ее применения является то, что данная процедура не зависит от других мероприятий, связанных с движением и высвобождением судна из ледового плена, т. е. она может осуществляться вместе с работой двигательно-движительного комплекса судна, заведением ледовых якорей, обмывом корпуса и др. Для мероприятий по перекачке балласта могут быть найдены также другие преимущества, которые могут предотвратить повреждение корпуса судна в условиях сжатия ледового канала. В настоящее время отсутствие научно обоснованной оценки эффективности перекачки балласта не позволяют определить возможности и преимущества этих мероприятий для решения более широкого круга задач с целью обеспечения безопасности и обеспечения движения судна в ледовых условиях, особенно при сжатии ледового канала. В работе предлагается применение научно-обоснованного анализа и оценки эффективности перекачки балласта в условиях ледового плавания. Это позволит расширить перечень типов судов, которым может быть предложено использовать данный способ во избежание повреждений и их опасных последствий при плавании в ледовых условиях.

Ключевые слова: ледовое плавание, сжатие ледового канала, использование перекачки балласта, предотвращение повреждения судна.

Для цитирования:

Ершов А. А. Оценка эффективности использования перекачки балласта для предотвращения повреждения корпуса судна в ледовых условиях / А. А. Ершов, П. И. Петухов // Вестник Государственного университета морского и речного флота имени адмирала С. О. Макарова. — 2021. — Т. 13. — № 3. — С. 316–324. DOI: 10.21821/2309-5180-2021-13-3-316-324.

Введение (Introduction)

Ледовое плавание всегда сопровождается значительными трудностями и опасностями для судна, его пассажиров и экипажа. Наиболее опасная ситуация возникает в том случае, если на определенном этапе плавания в ледовых условиях начинается подвижка льда, приводящая к сжатию ледового канала, в котором находится судно. В данном случае на корпус судна оказывают действие силы сжатия $P_{сж}$ со стороны льдин, сжимающих канал. Эти силы, зажимающие судно в условиях ледового канала, препятствуют его движению, способствуют разрушению корпуса судна, созданию водотечности и приводят к возможной гибели судна, его пассажиров и экипажа. Во избежание возможных опасностей ледового плавания используется *система пневмообмыва корпуса* (при наличии), выполняется особая работа двигательно-движительного комплекса, а в наиболее тяжелых случаях применяется оковка зажатого судна ледоколом, использование ледовых якорей и другие мероприятия, в том числе перекачка водяного балласта судна.

В 2017 г. вступил в действие «Международный полярный кодекс», обязательный для всех судов, осуществляющих плавание в полярных водах, который предусматривает наличие на судах обязательных рекомендаций по «аварийной передаче жидкостей» в случае чрезвычайных ситуаций^{1,2,3,4}. Наличие таких рекомендаций является обязательным условием эксплуатации судна в полярных водах.

Навигационные риски при буксировке в стесненных навигационных условиях рассмотрены в публикациях [1], [2]. Использование перекачки балласта для предотвращения зажимания судна при сжатии ледового канала используется судами, осуществляющими плавание в ледовых условиях [3], [4]. Это мероприятие позволяет бороться с «зажимом» корпуса льдами для осуществления движения в условиях сжатия ледового канала. Преимуществом применения перекачки балласта является независимость этих процедур от других мероприятий, связанных с движением

¹ Международный кодекс для судов, эксплуатирующихся в полярных водах (Полярный кодекс). СПб.: АО «ЦНИИМФ», 2016. 232 с.

² Резолюция MSC.386(94) «Поправки к Международной конвенции по охране человеческой жизни на море 1974 года с поправками» [Электронный ресурс]. Режим доступа: <https://docs.cntd.ru/document/420376047> (дата обращения: 01.03.2021).

³ Международная Конвенция по охране человеческой жизни на море 1974 года (МК СОЛАС–74). (Консолидированный текст, измененный Протоколом 1988 года к ней, с поправками). СПб.: АО «ЦНИИМФ», 2021. 1184 с.

⁴ Международная Конвенция по предотвращению загрязнения с судов 1973 г., измененная Протоколом 1978 г. к ней (МАРПОЛ–73/78). Кн. I. СПб.: АО «ЦНИИМФ», 2017. — 824 с.

судна и высвобождением его из ледового плена, т. е. данная процедура может осуществляться вместе с работой двигательно-движительного комплекса судна, использованием ледовых якорей и т. п. Мероприятия по перекачке балласта имеют также другие преимущества, которые могут предотвратить повреждение корпуса судна в условиях сжатия ледового канала [5]–[12].

В настоящее время отсутствие научно обоснованной оценки эффективности перекачки балласта для предотвращения аварий судов в ледовых условиях не позволяет определить особенности и преимущества данных мероприятий для решения более широкого круга задач обеспечения безопасности и эффективности ледового плавания. Отсутствие подобного анализа не дает возможности конкретизировать типы судов, которые могут эффективно использовать перекачку балласта для обеспечения безопасности движения судна в ледовых условиях, особенно при сжатии ледового канала. Решению данных проблем посвящена настоящая статья.

Методы и материалы (Methods and Materials)

Наибольшую опасность для судна при сжатии ледового канала представляют силы, действующие на корпус со стороны льда, так как они могут приводить к сжатию корпуса, разрушению обшивки, появлению водотечности и даже к гибели судна. Схема сил, действующих на корпус судна, приведена на рис. 1.

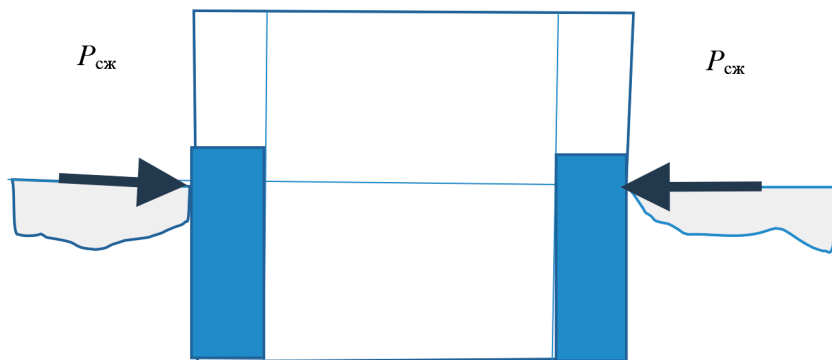


Рис. 1. Схема действия сил на корпус судна при сжатии льда
($P_{сж}$ — силы сжатия льда, кН)

Перекачка балласта обеспечивает крен корпуса судна, создавая дополнительное давление на лед, способствует его разрушению, что препятствует развитию и снижает действие сил сжатия льда ($P_{сж}$). Кроме того, перекачка балласта в условиях сжатия ледового канала имеет и другие положительные свойства, которые требуют анализа и оценки с точки зрения их эффективности, безопасности и практической применимости для различных типов судов, осуществляющих ледовое плавание. Далее необходимо проанализировать каждое преимущество перекачки балласта отдельно.

1. Оценка эффективности перекачки балласта в условиях сжатия ледового канала с точки зрения создания дополнительного давления на лед с целью его разрушения и снижения опасности повреждения корпуса судна.

Схема сил и моментов, действующих на судно и лед при перекачке балласта и появлении крена, приведена на рис. 2. В соответствии с данной схемой уравнение моментов будет иметь следующий вид:

$$Ph \sin \theta = p_6 (y_{62} - y_{61}) \cos \theta - p_{\lambda} B \cos \theta, \quad (1)$$

где θ — угол крена судна, град; B — ширина судна, м.

Остальные обозначения, используемые формуле (1), приведены на рис. 2. После преобразования уравнения (1) примут вид

$$p_{\lambda} = \frac{p_6 (y_{62} - y_{61}) - P_h \cdot \operatorname{tg} \theta}{B}. \quad (2)$$

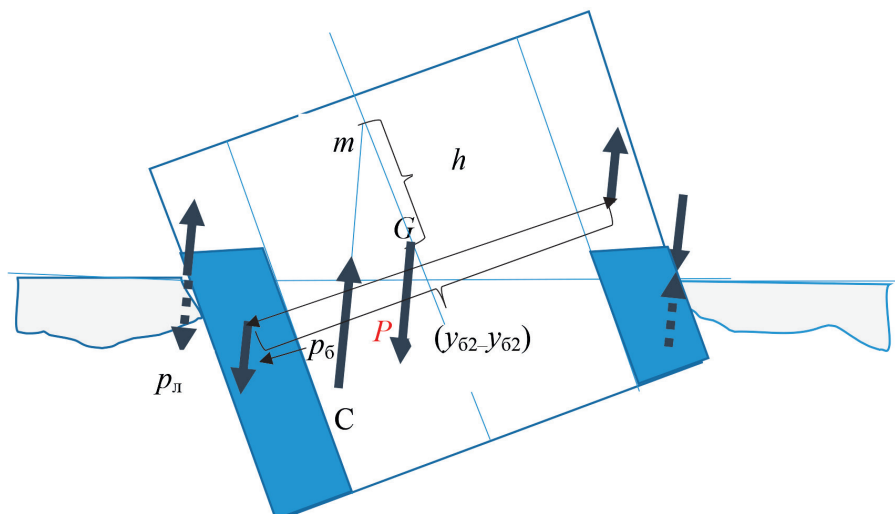


Рис. 2. Схема действия сил на корпус судна и лед при перекачке балласта:

P — весовое водоизмещение судна, кН; p_6 — вес перекачанного балласта, кН;

$p_л$ — сила давления корпуса на лед вследствие наклонения судна после перекачки балласта, кН;

h — метацентрическая высота, м; $(y_{62} - y_{61})$ — расстояние между центрами тяжести перекачанного балласта на правом и левом борту судна, м

Условные обозначения:

сплошными стрелками показаны силы, действующие на судно,

пунктирными — на лед

Пример расчета силы давления корпуса судна на лед (в тоннах) по формуле (2) для судна водоизмещением $\Delta = 50000$ т, $h = 1$ м, $(y_{62} - y_{61}) = 30$ м, $B = 40$ м и массы перекачанного балласта 500 т дан на рис. 3. Анализ результатов расчета показывает значительную эффективность перекачки балласта для разрушения льда, сжимающего судно, так как максимальное давление корпуса на лед возникает в самом начале перекачки балласта (при малых углах крена), делая максимально эффективным любое, даже самое малое наклонение судна при перекачке балласта для разрушения льда, сжимающего корпус судна.

Дополнительным положительным фактором является появление свободных поверхностей при перекачке водяного балласта, которое уменьшает значение метацентрической высоты судна h и увеличивает значение силы давления корпуса судна на лед, рассчитанной по формуле (2). Значения сил давления на лед с учетом его малой площади в пристеночной области корпуса судна являются достаточными для его разрушения даже при больших значениях толщины.

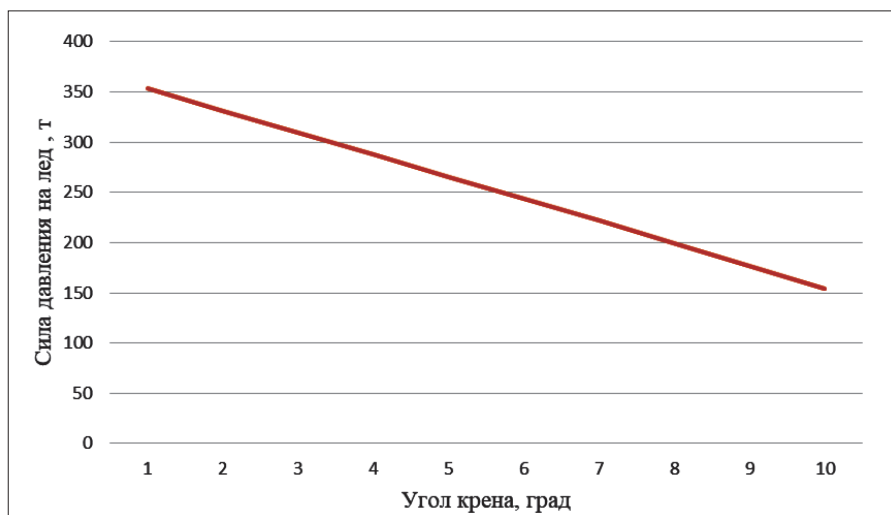


Рис. 3. Расчет силы давления корпуса судна на лед при перекачке балласта

2. Оценка эффективности перекачки балласта в условиях сжатия ледового канала с точки зрения сохранения прочности корпуса судна.

При сжатии ледового канала наибольшее давление льда может находиться в любой точке корпуса судна по высоте борта. При перекачке балласта и появлении крена судно может перемещать точку наибольшего давления льда в точку, расположенную в наиболее прочной части корпуса судна, в пределах так называемого ледового пояса корпуса судна (см. рис. 1 и 2). Таким образом, перекачка балласта может быть эффективной для судов различных типов, имеющих ледовый пояс.

3. Оценка эффективности перекачки балласта в условиях ледового канала с точки зрения уменьшения воздействия силы сжатия льда на корпус судна.

При сжатии ледового канала наибольшее сжатие льда $P_{сж}$ может действовать практически перпендикулярно обшивке корпуса судна (см. рис. 1), что является наиболее опасным для прочности и приводя к разрушению корпуса, появлению водотечности и возможной гибели судна. При перекачке балласта и появлении крена судно может «переводить» силу сжатия в скользящее действие, уменьшающее опасное воздействие силы сжатия $P_{сж}$ на корпус судна (см. рис. 3). Дополнительно скольжение льда может быть увеличено применением пневмообмыва корпуса (при его наличии на судне), вхождением части корпуса в воду при крене, увеличивающем скольжение (на пониженном борту), а также дополнительным выливом воды и / или масел на повышенный борт судна для уменьшения трения, а также другими мероприятиями.

Расчеты показали, что применение подачи жидкости и масел в место взаимодействия корпуса судна и льда вместе с балластировкой судна позволяет на 40–50 % снизить силу сжатия $P_{сж}$ и, следовательно, опасность разрушения корпуса при плавании в ледовых условиях.

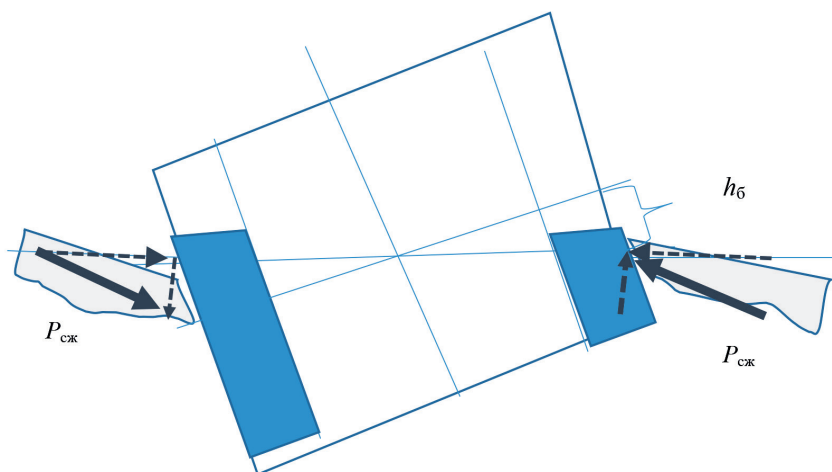


Рис. 4. Перевод силы сжатия льда $P_{сж}$ в скользящее действие при перекачке балласта, накренивании судна и извлечении части борта h_b из воды

4. Оценка эффективности перекачки балласта в условиях сжатия ледового канала с точки зрения оценки повреждений корпуса, извлечения поврежденной части корпуса из воды и предотвращения затопления судна.

При сжатии ледового канала повреждение корпуса может находиться в любой точке по высоте борта судна. При перекачке балласта и появлении крена судно может перемещать имеющиеся повреждения корпуса из-под воды в надводную часть борта судна. Этот прием может быть использован для оценки возможных повреждений и извлечения поврежденной части корпуса из воды для предотвращения поступления воды внутрь судна. Одновременно с предотвращением поступления забортной воды через повреждения удастся предотвратить экологическое загрязнение за счет уменьшения утечки из поврежденной части корпуса судна [4]. Для оценки высоты борта судна, извлеченного из воды с целью оценки повреждений и перемещения их в надводную часть корпуса при балластировке, может быть использована следующая зависимость:

$$h_6 = \frac{B}{2} \operatorname{tg} \theta, \quad (3)$$

где h_6 — высота борта, извлекаемая из воды при накренивании судна после перекачки балласта, м.

Пример расчета h_6 от угла крена по формуле (3) для расчетного судна приведен на рис. 5.

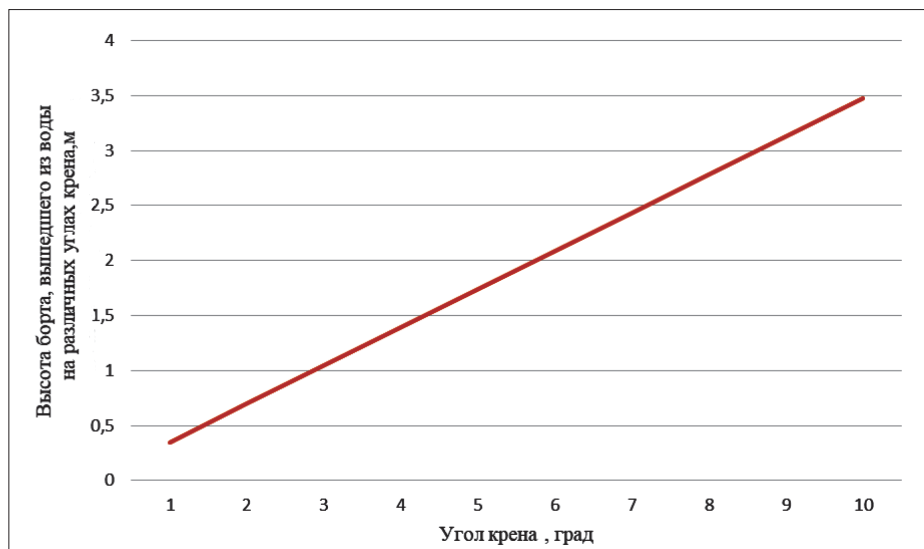


Рис. 5. Расчет высоты борта, вышедшего из воды при накренивании судна в процессе перекачке балласта

Результаты расчета показывают возможность оперативной оценки характера повреждения, быстрого извлечения пробоин с целью предотвращения поступления забортной воды [5], [6], а также экологических загрязнений даже при значительных заглублениях повреждений корпуса судна, которые могут возникнуть при сжатии ледового канала, что свидетельствует о высокой эффективности использования перекачки балласта для этих целей даже при значительной толщине льда, в котором осуществляется плавание судна.

Результаты (Results)

Выполнена научно обоснованная оценка эффективности использования перекачки балласта для предотвращения повреждения корпуса и гибели судна в период ледового плавания. Показано, что использование перекачки балласта и создание крена судна в условиях сжатия ледового канала может оказывать разрушающее действие на лед в пристеночной области корпуса судна, предотвращая его сжатие и повреждение.

В работе показана эффективность любого, даже самого малого накренивания судна при перекачке балласта для разрушения льда, сжимающего корпус судна. Дополнительным положительным фактором является появление свободных поверхностей при перекачке водяного балласта, которое уменьшает значение метацентрической высоты судна h и увеличивает значение силы давления корпуса судна на лед (см. формулу (2)). Величины силы давления на лед, с учетом малой площади льда в пристеночной области корпуса судна, являются достаточными для его разрушения даже при больших значениях толщины.

Отмечается, что при перекачке балласта и появлении крена судно может перемещать точку наибольшего давления льда в точку, расположенную в наиболее прочной части корпуса судна в пределах так называемого *ледового пояса* корпуса судна (см. рис. 1 и 2). Таким образом, перекачка балласта может быть эффективной для судов различных типов, имеющих *ледовый пояс*.

В работе показано, что при сжатии ледового канала наибольшее давление льда, проявляющееся через $P_{сж}$, может действовать практически перпендикулярно обшивке корпуса судна (см. рис. 1), что является наиболее опасным для прочности и может приводить к разрушению корпуса, появлению

водотечности и возможной гибели судна. При перекачке балласта и появлении крена судно может «переводить» силу сжатия в скользящее действие, уменьшающее опасное воздействие силы сжатия $P_{сж}$ на корпус судна (см. рис. 3). Применение подачи жидкости и масел в место взаимодействия корпуса судна и льда вместе с балластировкой судна позволяет на 40–50 % снизить силу сжатия $P_{сж}$ и, следовательно, опасность разрушения корпуса при плавании в ледовых условиях.

В работе показана возможность оперативной оценки характера повреждения, быстрого извлечения пробоин из воды с целью предотвращения поступления воды, а также экологических загрязнений даже при значительных заглублениях повреждений на корпусе судна в условиях сжатия ледового канала. Это свидетельствует о высокой эффективности использования перекачки балласта для этих целей даже при значительной толщине льда, в котором осуществляется ледовое плавание судна.

Обсуждение (Discussion)

Использование перекачки балласта для предотвращения «застревания» судна при сжатии ледового канала используется судами, осуществляющим плавание в ледовых условиях. Эти мероприятия позволяют бороться с «зажимом» корпуса льдами для движения в условиях сжатия ледового канала. Преимуществом применения перекачки балласта является независимость этих процедур от других мероприятий, связанных с движением судна и высвобождением его из ледового плена, т. е. оно может осуществляться вместе с работой двигательно-движительного комплекса судна, использованием ледовых якорей и др. Мероприятия по перекачке балласта имеют также другие преимущества, которые позволяют предотвратить повреждение корпуса судна в условиях сжатия ледового канала. Научно обоснованный анализ эффективности использования перекачки балласта для предотвращения повреждения корпуса и гибели судна в ледовых условиях выполнен в настоящей статье.

Выводы (Summary)

Использование перекачки балласта для предотвращения повреждения корпуса при сжатии льда для высвобождения судна из ледового плена предоставляет большие возможности для эффективного и безопасного функционирования судов различных типов в условиях ледового плавания. Научно обоснованный анализ эффективности использования перекачки балласта для предотвращения повреждения корпуса в условиях ледового плавания, выполненный в работе, позволяет рекомендовать данные мероприятия для всех типов судов ледового класса, осуществляющих плавание в полярных водах.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Некрасов С. Н. Навигационные риски буксировки судна в стесненных навигационных условиях / С. Н. Некрасов, К. И. Ефимов, Д. В. Трененков // Вестник Государственного университета морского и речного флота имени адмирала С. О. Макарова. — 2014. — № 6 (28). — С. 13–19.
2. Ершов А. А. Рекомендации по маневрированию судна в ледовых условиях / А. А. Ершов, С. Ю. Развозов, П. И. Петухов // Вестник Государственного университета морского и речного флота имени адмирала С. О. Макарова. — 2016. — № 5 (39). — С. 20–29. DOI: 10.21821/2309-5180-2016-8-5-20-29.
3. Ершов А. А. Рекомендации по спрямлению судна при аварии в ледовых условиях / А. А. Ершов, П. И. Петухов // Вестник Государственного университета морского и речного флота имени адмирала С. О. Макарова. — 2016. — № 6 (40). — С. 34–42. DOI: 10.21821/2309-5180-2016-8-6-34-42.
4. Ершов А. А. Рекомендации по действиям в чрезвычайных ситуациях в ледовых условиях плавания / А. А. Ершов, П. И. Петухов // Вестник Государственного университета морского и речного флота имени адмирала С. О. Макарова. — 2017. — Т. 9. — № 1. — С. 17–26. DOI: 10.21821/2309-5180-2017-9-1-17-26.
5. Ершов А. А. Некоторые аварии и катастрофы отечественных и иностранных судов: монография / А. А. Ершов, В. И. Никольский. — СПб.: ГУМРФ им. адм. С. О. Макарова, 2013. — 196 с.
6. Шурпак В. К. Полярный кодекс ИМО. Предварительный анализ первой части (Требования по безопасности) / В. К. Шурпак // Научно-технический сборник Российского морского регистра судоходства. — 2015. — № 38–39. — С. 8–17.

7. Работа ледокола при проводке каравана судов во льдах [Электронный ресурс]. — Режим доступа: <https://flot.com/publications/books/shelf/specialcases/35.htm> (дата обращения: 01.03.2021).
8. Агеев А. Принцип работы ледокола: как он ломает лед [Электронный ресурс] / А. Агеев. — Режим доступа: <https://glavpaluba.ru/shipbuilding/1100-princip-raboty-ledokola> (дата обращения: 01.03.2021).
9. Шацбергер Э. М. Тактика плавания во льдах [Электронный ресурс] / Э. М. Шацбергер. — Режим доступа: <http://csef.ru/ru/politica-i-geopolitica/510/taktika-plavaniya-vo-ldah-prodolzhenie-8131> (дата обращения: 01.03.2021).
10. Плавание во льдах под проводкой ледокола [Электронный ресурс]. — Режим доступа: https://studopedia.su/1_41385_plavanie-vo-ldah-pod-provodkoy-ledokola.html (дата обращения: 01.03.2021).
11. Калинина Н. В. Влияние пневмо-омывающего устройства на ходкость ледоколов / Н. В. Калинина // Современные проблемы науки и образования. — 2015. — № 1–1. — С. 308.
12. Gao G. X. Breaking the Ice: Navigation in the Arctic / G. X. Gao, L. Heng, T. Walter, P. Enge // Global Navigation Satellite Systems: Report of a Joint Workshop of the National Academy of Engineering and the Chinese Academy of Engineering. — National Academies Press, 2012. — Pp. 229–238.

REFERENCES

1. Nekrasov, S. N., K. I. Efimov, and D. V. Trenenkov. "Navigation risks towing in cramped navigational conditions." *Vestnik Gosudarstvennogo universiteta morskogo i rechnogo flota imeni admiral S. O. Makarova* 6(28) (2014): 13–19.
2. Ershov, Andrey Alexandrovich, Sergey Jrevich Razvozov, and Pavel Igorevich Petuhov. "Recommendation on maneuvering the vessel in ice conditions." *Vestnik Gosudarstvennogo universiteta morskogo i rechnogo flota imeni admiral S. O. Makarova* 5(39) (2016): 20–29. DOI: 10.21821/2309-5180-2016-8-5-20-29.
3. Ershov, Andrey Alexandrovich, and Pavel Igorevich Petuhov. "Recommendations to straighten the ship in the accident in ice conditions." *Vestnik Gosudarstvennogo universiteta morskogo i rechnogo flota imeni admiral S. O. Makarova* 6(40) (2016): 34–42. DOI: 10.21821/2309-5180-2016-8-6-34-42.
4. Ershov, Andrey A., and Pavel I. Petuhov. "Recommendations for emergency response in ice conditions of navigation." *Vestnik Gosudarstvennogo universiteta morskogo i rechnogo flota imeni admiral S. O. Makarova* 9.1 (2017): 17–26. DOI: 10.21821/2309-5180-2017-9-1-17-26.
5. Ershov, A.A., and V. I. Nikol'skii. *Nekotorye avarii i katastrofy otechestvennykh i inostrannykh sudov: monografiya*. SPb.: GUMRF im. adm. S. O. Makarova, 2013.
6. Shurpyak, V.K. "Polyarnyi kodeks IMO. Predvaritel'nyi analiz pervoi chasti (Trebovaniya po bezopasnosti)." *Nauchno-tehnicheskii sbornik Rossiiskogo morskogo registra sudokhodstva* 38–39 (2015): 8–17.
7. Rabota ledokola pri provodke karavana sudov vo l'dakh. Web. 1 March 2021 <<https://flot.com/publications/books/shelf/specialcases/35.htm>>.
8. Ageev, Aleksandr. Printsip raboty ledokola: kak on lomaet led. Web. 1 March 2021 <<https://glavpaluba.ru/shipbuilding/1100-princip-raboty-ledokola>>.
9. Shatsberger, E. M. Taktika plavaniya vo l'dakh. Web. 1 March 2021 <<http://csef.ru/ru/politica-i-geopolitica/510/taktika-plavaniya-vo-ldah-prodolzhenie-8131>>.
10. Plavanie vo l'dakh pod provodkoi ledokola. Web. 1 March 2021 <https://studopedia.su/1_41385_plavanie-vo-ldah-pod-provodkoy-ledokola.html>.
11. Kalinina, N.V. "Influence of pneumatic-washed device on icebreakers propulsion." *Modern problems of science and education* 1–1 (2015): 308.
12. Gao, G. X., L. Heng, T. Walter, and P. Enge. "Breaking the Ice: Navigation in the Arctic." *Global Navigation Satellite Systems: Report of a Joint Workshop of the National Academy of Engineering and the Chinese Academy of Engineering*. National Academies Press, 2012: 229–238.

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

Ершов Андрей Александрович —
доктор технических наук, доцент
ФГБОУ ВО «ГУМРФ имени адмирала
С. О. Макарова»
198035, Российская Федерация, Санкт-Петербург,
ул. Двинская, 5/7
e-mail: ershov_63@mail.ru, kaf_mus@gumrf.ru

INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Ershov, Andrey A. —
Dr. of Technical Sciences, associate professor
Admiral Makarov State University of Maritime
and Inland Shipping
5/7 Dvinskaya Str., St. Petersburg 198035,
Russian Federation
e-mail: ershov_63@mail.ru, kaf_mus@gumrf.ru

Петухов Павел Игоревич — аспирант

Научный руководитель:

Ершов Андрей Александрович

ФГБОУ ВО «ГУМРФ имени адмирала

С. О. Макарова»

e-mail: sevarus89@gmail.com, kaf_mus@gumrf.ru

Petukhov, Pavel I. — Postgraduate

Supervisor: Ershov, Andrey A.

Admiral Makarov State University of Maritime
and Inland Shipping

5/7 Dvinskaya Str., St. Petersburg 198035,

Russian Federation

e-mail: sevarus89@gmail.com, kaf_mus@gumrf.ru

Статья поступила в редакцию 9 марта 2021 г.

Received: March 9 2021.

DOI: 10.21821/2309-5180-2021-13-3-325-331

SIMULATION OF COMBINED CARGOES TRANSPORTATION SYSTEM

O. A. Izotov, Y. A. Borozdin

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

The assessment of container technologies introduction impact on the transportation of combined shipments deep into the hinterland of the sea container terminal is carried out. The consequences of transferring the main burden of bulk cargo transshipment from the seaport territory to the rear areas of railway container terminals are revealed. The mechanism of reducing the total number and further promotion of transshipment operations to the consignees warehouses gates is considered. The advantages of the introduction of new means of combined cargo consolidation, which ensure the release of heavy container and cargo movement deep into the mainland, while maintaining the advantages of container technologies, are noted. To solve the issues of resource assessment in the transport technologies under consideration, a method for measuring individual types of resources and determining the efficiency level of these resources proportions as part of a particular transport technology is proposed. The task of forming the transportation technology based on the characteristics of optimal participation of each of used in the transportation process resources is formulated. As an example of the above approach, the calculation of the number of tonne operations for different variants of the transportation organization is given. It is noted that the transfer of the main weight of the tonnage operations for the combined cargoes transshipment in a single piece form from the seaport territory to the railway container terminals (cargo stations) by organizing the transportation of such goods in heavy containers is not reflected in the reduction of the tonnage operations total number. The introduction of consolidation new means, namely, in-transit modules, capable to bring the transshipment of tare-pieced cargoes as close as possible to the consignees warehouses, is designed to contribute to this problem solution.

Keywords: transportation modeling, combined cargoes, container technologies, quality indicators of transportation.

For citation:

Izotov, Oleg A., and Yegor A. Borozdin. "Simulation of combined cargoes transportation system." *Vestnik Gosudarstvennogo universiteta morskogo i rechnogo flota imeni admirala S. O. Makarova* 13.3 (2021): 325–331. DOI: 10.21821/2309-5180-2021-13-3-325-331.

УДК 656.073.2

МОДЕЛИРОВАНИЕ ТРАНСПОРТНО-ТЕХНОЛОГИЧЕСКОЙ СИСТЕМЫ ПЕРЕВОЗКИ СБОРНЫХ ГРУЗОВ

О. А. Изотов, Е. А. Бороздин

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

Выполнена оценка влияния внедрения внутренних субконтейнерных технологий на перевозку сборных партий грузов вглубь хинтреленда морского контейнерного терминала. Выявлены последствия переноса основной тяжести по перегрузке тарно-штучных грузов с территории морского порта на тыловые площадки железнодорожных контейнерных терминалов. Рассмотрен механизм сокращения общего количества и дальнейшего продвижения перегрузочных операций к воротам складов грузополучателей. Отмечены преимущества внедрения новых средств укрупнения сборных грузов, обеспечивающих высвобождение большегрузного контейнера и продвижение грузов вглубь материка с сохранением преимуществ контейнерных технологий. Для решения вопросов оценки ресурсов в рассматриваемых технологиях перевозок предложен способ соизмерения отдельных видов ресурсов и определения уровня эффективности их пропорций в составе той или иной технологии перевозки. Сформулирована задача формирования технологии перевозки по признакам оптимального участия каждого из используемых в процессе перевозки ресурсов. В качестве примера рассмотренного подхода приведен расчет количества тонно-операций для различных

вариантов организации перевозок. Отмечается, что перенос основной тяжести тонно-операций по перегрузке сборных грузов в тарно-штучном виде с территории морского порта на железнодорожные контейнерные терминалы (грузовые станции) путем организации перевозок таких грузов в большегрузных контейнерах не нашел отражения в сокращении общего количества тонно-операций. Решению поставленной проблемы призвано способствовать внедрение новых средств укрупнения — внутритранспортных модулей, способных максимально приблизить перегрузку тарно-штучных грузов к складам грузополучателей.

Ключевые слова: моделирование перевозок, сборные грузы, контейнерные технологии, качественные показатели перевозки.

Для цитирования:

Изотов О. А. Моделирование транспортно-технологической системы перевозки сборных грузов / О. А. Изотов, Е. А. Бороздин // Вестник Государственного университета морского и речного флота имени адмирала С. О. Макарова. — 2021. — Т. 13. — № 3. — С. 325–331. DOI: 10.21821/2309-5180-2021-13-3-325-331.

Введение (Introduction)

Внедрение в практику перевозок различных партий грузов вглубь хинтерленда в морских большегрузных контейнерах, кроме получения основных преимуществ контейнерных технологий (сохранность перевозки, стандартизация погрузо-разгрузочных операций и т. д.), позволило освободить морские порты от значительного объема перегрузочных работ с тарно-штучными грузами (рис. 1). Вслед за продвижением контейнеров в тыловые и логистические центры на их грузовые площадки были проведены работы по дальнейшей отправке малых партий грузов смежными видами транспорта (рис. 2). В результате наблюдается развитие транспортной инфраструктуры как в непосредственной близости от морских терминалов — образование так называемых «сухих портов» [1]–[3], так и в глубине территорий страны в целях организации современного возврата линейных контейнеров на морские терминалы [4]–[6].

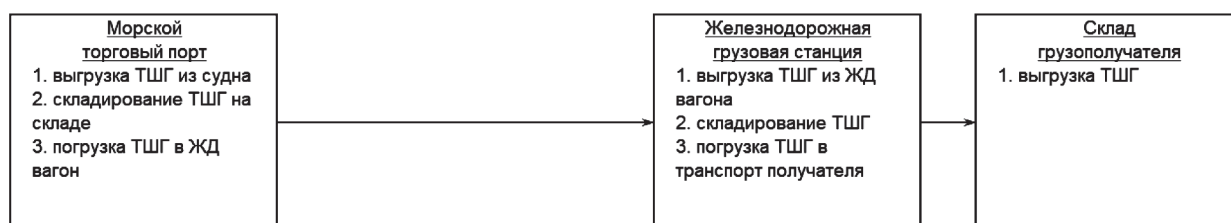


Рис. 1. Схема перевозки сборных грузов в тарно-штучном виде

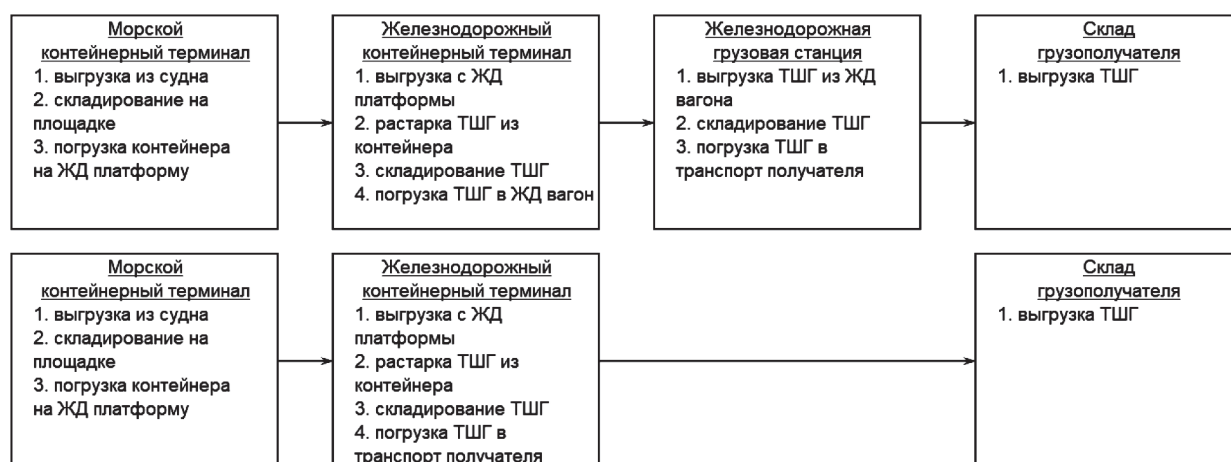


Рис. 2. Схема перевозки сборных грузов в большегрузных контейнерах

Рассмотрим возможность дальнейшего сокращения общего количества погрузочно-разгрузочных операций с тарно-штучными грузами и их максимального приближения непосредственно к складам грузополучателей.

Методы и материалы (Methods and Materials)

В качестве механизма сокращения общего количества или дальнейшего продвижения перегрузочных операций к воротам складов грузополучателей специалистами кафедры портов и грузовых терминалов ГУМРФ им. адм. С. О. Макарова предлагается к внедрению новое средство укрупнения сборных грузов, обеспечивающее высвобождение большегрузного контейнера и продвижение грузов вглубь материка с сохранением преимуществ контейнерных технологий [7]–[9]. Схема перевозки сборных грузов в новых средствах укрупнения приведена на рис. 3.

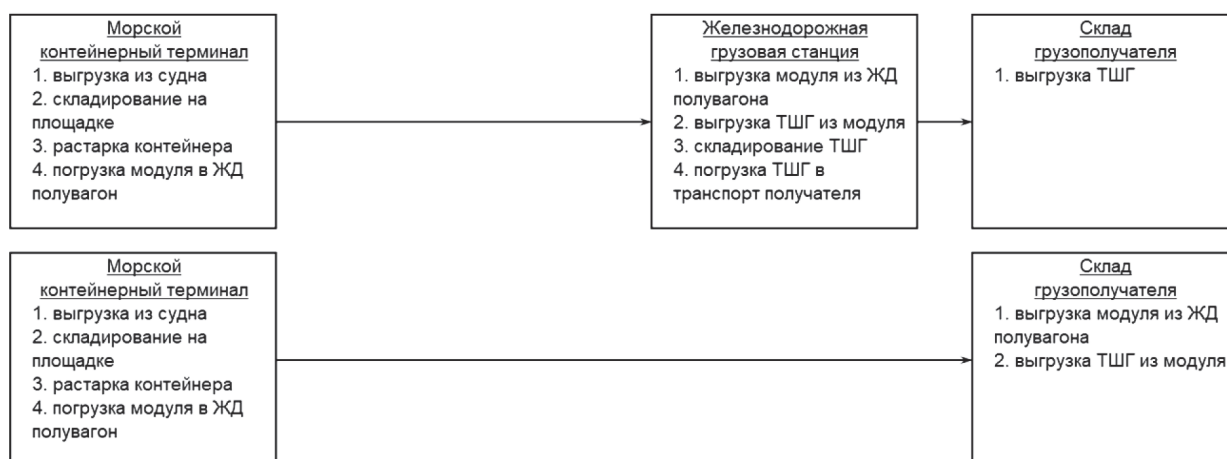


Рис. 3. Схема перевозки сборных грузов в новых средствах укрупнения

Для решения вопросов оценки ресурсов в рассматриваемых технологиях перевозок необходим способ соизмерения отдельных видов ресурсов и определения уровня эффективности пропорций данных ресурсов в составе той или иной технологии перевозки. Сложность данного вопроса объясняется различной природой ресурсов и разномасштабностью их технико-эксплуатационных характеристик.

Технология перевозок включает как технологические процессы на всех объектах перегрузки грузов, так и все технологические операции, выполняемые с грузами на этих объектах. В существующих вариантах организации перевозки, перегрузки грузов в составе одного объекта могут включать от одной до четырех технологических операций [10], [11]. В связи с этим возникает задача формирования технологии перевозки по признакам оптимального участия каждого из используемых ресурсов. В общем виде при ее решении необходимо выполнение следующих процедур: определить способ соизмерения разнородных ресурсов между собой; рассчитать потребное минимальное количество ресурсов каждого вида; определить эффективность структуры технологии перевозок и составляющих ее технологических процессов.

Содержательная часть задачи формируется следующим образом. Имеется определенное задание на перевозку сборной партии грузов между двумя отдельными объектами. Наличие и назначение ресурсов транспорта определяют конкретный вариант организации перевозки, который будет применен при выполнении задания. Соответствующая схема состоит из последовательности P технологических процессов (морской порт, тыловой контейнерный терминал, железнодорожная грузовая станция и т. д.) и технологических операций, выполняемых на этих объектах (судовая, складская, вагонная и т. д.). Каждый технологический процесс характеризуется своим набором технологических операций, определяемых составом разнородных ресурсов R . Ресурсы технологических процессов могут использоваться одновременно (параллельно) и последовательно [12]–[14].

Результаты (Results)

В общем виде технологию перевозки сборной партии грузов можно представить в виде структуры отдельных технологических процессов (рис. 4). При формализации необходимо учитывать, что при установившейся интенсивности работ, включенных в технологию перевозки, работа всех ресурсов определяется в виде

$$R_{\text{ТП}} = nR_{\text{и}} + \sum_{i=1}^n (R_{P_i} - R_{\text{и}}), \quad (1)$$

где $R_{\text{ТП}}$ — итоговая работа технологии перевозки;

$R_{P_i} - R_{\text{и}}$ — работа ресурсов внутри технологических процессов;

R_{P_i} — ресурсы технологического процесса i ;

$i = 1, n$ — количество технологических процессов в составе технологии перевозки.

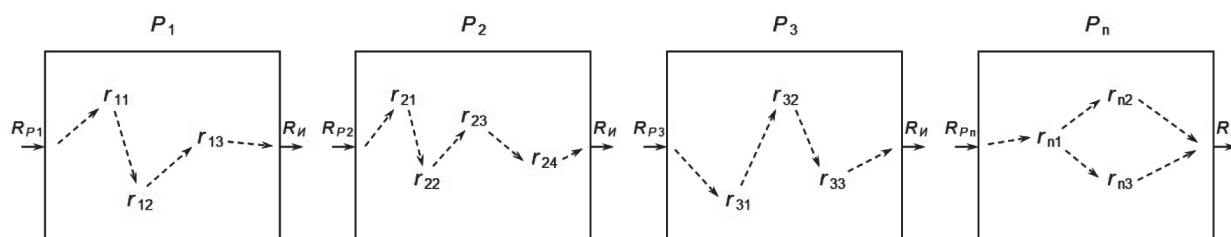


Рис. 4. Схема выполнения технологических процессов при перевозке сборных грузов:

$R_{P_1}, \dots, R_{P_n}$ — ресурсы для технологических процессов; $r_{11}, r_{12}, \dots, r_{n3}$ — технологические операции;

$R_{\text{и}}$ — итоговые результаты технологического процесса ($nR_{\text{и}} < R_{\text{ТП}}$)

Таким образом, полезное использование ресурсов всегда меньше их общей работы для принятой технологии перевозки. При реализации технологии перевозки всегда будет иметь место неравенство

$$\sum_{i=1}^n (R_{P_i} - R_{\text{и}}) > 0. \quad (2)$$

Итоговый результат технологического процесса можно установить по величине грузопереработки (сумме тонно-операций), совершаемых на каждом этапе технологии перевозки грузов. Организаторам перевозочного процесса необходимо знать, какое количество полезных ресурсов потребуется при реализации того или иного варианта [15]–[17].

Коэффициент полезного действия технологии перевозки $\eta_{\text{ТП}}$ можно представить в следующем виде:

$$\eta_{\text{ТП}} = \frac{nR_{\text{и}}}{R_{\text{ТП}}}. \quad (3)$$

Значение $\eta_{\text{ТП}}$ может характеризовать эффективность выбора и организации технологии перевозки.

$$\eta_{P_i} = \frac{R_{\text{и}}}{R_{P_i}}. \quad (4)$$

Перемножив показатели эффективности отдельных технологических процессов, получим

$$\eta_1 \eta_2 \eta_3 \dots \eta_n = \frac{nR_{\text{и}}}{R_{P_1} R_{P_2} R_{P_3} \dots R_{P_n}} = \frac{nR_{\text{и}}}{R_{\text{ТП}}} = \eta_{\text{ТП}}. \quad (5)$$

Следовательно, показатель полной эффективности технологии перевозки равен произведению эффективности работы всех технологических процессов, входящих в ее состав. Таким образом, справедливы следующие выводы: наиболее эффективным является применение применения того или иного варианта перевозки с наименьшим числом технологических операций; целесообразным

является выполнение перевозок с применением средств укрупнения малых партий грузов, обеспечивающих упрощение технологических схем грузопереработки и сокращение перегрузочных операций при равенстве используемых ресурсов.

Подобная интерпретация технологии перевозки и структуры перевозочного процесса позволяет использовать для соизмерения разнородных ресурсов общий показатель их расходования — тонно-операции. Анализ значений η_{pi} и $\sum R_{pi}$ позволяет методически обосновать необходимое минимальное количество ресурсов, составляющих совокупность технологии перевозки, а значит и повысить эффективность перевозочного процесса.

В качестве примера рассмотренного подхода выполним расчет количества тонно-операций для различных вариантов организации перевозки. В табл. 1 приведен расчет следования сборной партии груза через железнодорожную грузовую станцию, в табл. 2, аналогичный расчет, при условии, что груз минует железнодорожную грузовую станцию (см. рис. 1–3).

Таблица 1

**Количество тонно-операций при организации перевозки
через железнодорожную грузовую станцию**

Объекты перегрузки	Количество тонно-операций				
	Морской порт (морской контейнерный терминал)	Железнодорожный контейнерный терминал	Железнодорожная грузовая станция	Склад получателя	Сумма (тонно-операций)
8 ед. ТШГ	24	0	24	8	56
Один контейнер	3	25	24	8	60
Два модуля	8	0	34	8	50

Примечания:

1. Средняя загрузка большегрузного контейнера 12 т или восемь укрупненных на паллетах грузовых мест.
2. Средняя загрузка модуля 6 т или четыре укрупненных на паллетах грузовых места.

Таблица 2

**Количество тонно-операций при организации перевозки
минуя железнодорожную грузовую станцию**

Объекты перегрузки	Количество тонно-операций				
	Морской порт (морской контейнерный терминал)	Железнодорожный контейнерный терминал	Железнодорожная грузовая станция	Склад получателя	Сумма (тонно-операций)
8 ед. ТШГ	24	0	0	8	32
Один контейнер	3	25	0	8	36
Два модуля	8	0	0	8	16

Примечания:

1. Средняя загрузка большегрузного контейнера 12 т, или восемь укрупненных на паллетах грузовых мест.
2. Средняя загрузка модуля 6 т или четыре укрупненных на паллетах грузовых места.

Заключение (Conclusion)

Как видно из выполненного исследования, перенос основной тяжести тонно-операций по перегрузке сборных грузов в торно-штучном виде с территории морского порта на железнодорожные контейнерные терминалы (грузовые станции) путем организации перевозок таких грузов в большегрузных контейнерах не нашел отражения в сокращении общего количества тонно-операций. Решению этой проблемы призвано способствовать внедрение новых средств укрупнения — внутритранспортных модулей, способных максимально приблизить перегрузку тарно-штучных грузов к складам грузополучателей.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Кириченко А. В. Перевозка экспортно-импортных грузов. Организация логистических систем / А. В. Кириченко. — 2-е изд. — СПб.: Питер, 2004. — 506 с.
2. Кузнецов А. Л. Классификация и функциональное моделирование эшелонированных контейнерных терминалов / А. Л. Кузнецов, А. В. Кириченко, А. А. Давыденко // Вестник Государственного университета морского и речного флота имени адмирала С. О. Макарова. — 2015. — № 6 (34). — С. 7–16. DOI: 10.21821/2309-5180-2015-7-6-7-16.
3. Изотов О. А. Роль транспортно-логистических кластеров в формировании контейнерных коридоров перевозок сборных грузов / О. А. Изотов, А. Л. Кузнецов, Д. Л. Головцов // Вестник Астраханского государственного технического университета. Серия: Морская техника и технология. — 2020. — № 2. — С. 127–136. DOI: 10.24143/2073-1574-2020-2-127-136.
4. Кузнецов А. Л. Морская контейнерная транспортно-технологическая система: монография / А. Л. Кузнецов, А. В. Кириченко, А. А. Давыденко. — СПб.: Изд-во МАНЭБ, 2017. — 320 с.
5. Изотов О. А. Технологические решения для организации отправок сборных грузов посредством контейнерных транспортно-технологических систем / О. А. Изотов, А. В. Кириченко, А. Л. Кузнецов // Вестник Государственного университета морского и речного флота имени адмирала С. О. Макарова. — 2019. — Т. 11. — № 4. — С. 609–620. DOI: 10.21821/2309-5180-2019-11-4-609-620.
6. Изотов О. А. Процессы формирования сборных контейнерных партий груза / О. А. Изотов, Ю. И. Васильев, О. А. Ражев // Вестник Государственного университета морского и речного флота имени адмирала С. О. Макарова. — 2020. — Т. 12. — № 2. — С. 252–261. DOI: 10.21821/2309-5180-2020-12-2-252-261.
7. Изотов О. А. Перспективы экспедирования морских контейнерных перевозок / О. А. Изотов, А. Л. Кузнецов, А. В. Гулятьев // Транспортное дело России. — 2019. — № 4. — С. 130–133.
8. Изотов О. А. Перспективы развития технологий перевозки сборных грузов в контейнерах / О. А. Изотов, А. Л. Кузнецов // Вестник Астраханского государственного технического университета. Серия: Морская техника и технология. — 2020. — № 1. — С. 140–148. DOI: 10.24143/2073-1574-2020-1-140-148.
9. Кузнецов А. Л. Имитационное моделирование в задачах анализа операций в морских портах / А. Л. Кузнецов, А. В. Кириченко, В. Н. Щербакова-Слюсаренко // Вестник Государственного университета морского и речного флота имени адмирала С. О. Макарова. — 2018. — Т. 10. — № 2. — С. 259–274. DOI: 10.21821/2309-5180-2018-10-2-259-274.
10. Изотов О. А. Оценка требуемых технологических ресурсов путем статистического моделирования / О. А. Изотов, А. В. Гулятьев // Вестник Государственного университета морского и речного флота имени адмирала С. О. Макарова. — 2018. — Т. 10. — № 3. — С. 497–506. DOI: 10.21821/2309-5180-2018-10-3-497-50.
11. Морис У. Т. Наука об управлении. Байесовский подход / У. Т. Морис. — М.: Мир, 1971. — 304 с.
12. Lv B. Operational optimization of transit consolidation in multimodal transport / B. Lv, B. Yang, X. Zhu, J. Li // Computers & Industrial Engineering. — 2019. — Vol. 129. — Pp. 454–464. DOI: 10.1016/j.cie.2019.02.001.
13. Kuzmicz K. A. Approaches to empty container repositioning problems in the context of Eurasian intermodal transportation / K. A. Kuzmicz, E. Pesch // Omega. — 2019. — Vol. 85. — Pp. 194–213. DOI: 10.1016/j.omega.2018.06.004.
14. Almetova Z. Optimization of delivery lot volumes in terminal complexes / Z. Almetova, V. Shepelev, S. Shepelev // Transportation Research Procedia. — 2017. — Vol. 27. — Pp. 396–403. DOI: 10.1016/j.trpro.2017.12.020.
15. Lee C. Y. Ocean container transport in global supply chains: Overview and research opportunities / C. Y. Lee, D. P. Song // Transportation Research Part B: Methodological. — 2017. — Vol. 95. — Pp. 442–474. DOI: 10.1016/j.trb.2016.05.001.
16. Yin M. Quantity discount pricing for container transportation services by shipping lines / M. Yin, K. H. Kim // Computers & Industrial Engineering. — 2012. — Vol. 63. — Is. 1. — Pp. 313–322. DOI: 10.1016/j.cie.2012.03.008.
17. Vural C. A. Value co-creation in maritime logistics networks: A service triad perspective / C. A. Vural, A. Göçer, Á. Halldórsson // Transport policy. — 2019. — Vol. 84. — Pp. 27–39. DOI: 10.1016/j.tranpol.2018.12.017.

REFERENCES

1. Kirichenko, A. V. *Perevozka eksportno-importnykh грузов. Organizatsiya logisticheskikh sistem*. 2nd edition. SPb.: Piter, 2004.
2. Kuznetsov, Aleksandr Lvovich, Aleksandr Viktorovich Kirichenko, and Aleksandr Aleksandrovich Davydenko. "Classification and functional modeling of echeloned container terminals." *Vestnik Gosudarstvennogo universiteta morskogo i rechnogo flota imeni admirala S. O. Makarova* 6(34) (2015): 7–16. DOI: 10.21821/2309-5180-2015-7-6-7-16.
3. Izotov, Oleg Albertovich, Alexander Lvovich Kuznetsov, and Dmitriy Lvovich Golovtsov. "Role of transport and logistics clusters in creating container corridors for groupage cargo transportation." *Vestnik of Astrakhan State Technical University. Series: Marine engineering and technologies* 2 (2020): 127–136. DOI: 10.24143/2073-1574-2020-2-127-136.
4. Kuznetsov, A. L., A. V. Kirichenko, and A. A. Davydenko. *Morskaya konteynernaya transportno-tekhnologicheskaya sistema: monografiya*. SPb.: Izd-vo MANEB, 2017.
5. Izotov, Oleg A., Aleksandr V. Kirichenko, and Aleksandr L. Kuznetsov. "Technological solutions for cargoes shipment through the container transport and technological systems." *Vestnik Gosudarstvennogo universiteta morskogo i rechnogo flota imeni admirala S. O. Makarova* 11.4 (2019): 609–620. DOI: 10.21821/2309-5180-2019-11-4-609-620.
6. Izotov, Oleg A., Yuri I. Vasiliev, and Oleg A. Razhev. "Processes for forming groupage container consignments." *Vestnik Gosudarstvennogo universiteta morskogo i rechnogo flota imeni admirala S. O. Makarova* 12.2 (2020): 252–261. DOI: 10.21821/2309-5180-2020-12-2-252-261.
7. Izotov, O., A. Kuznetsov, and A. Gulyaev. "The prospects for freight forwarding container shipping." *Transport business of Russia* 4 (2019): 130–133.
8. Izotov, Oleg Albertovich, and Alexander Lvovich Kuznetsov. "Development prospects of technologies of grouped cargo containerization." *Vestnik of Astrakhan State Technical University. Series: Marine engineering and technologies* 1 (2020): 140–148. DOI: 10.24143/2073-1574-2020-1-140-148.
9. Kuznetsov, Aleksandr L., Aleksandr V. Kirichenko, and Victoria N. Shcherbakova-Slyusarenko. "Simulation in the tasks of sea port operational analyses." *Vestnik Gosudarstvennogo universiteta morskogo i rechnogo flota imeni admirala S. O. Makarova* 10.2 (2018): 259–274. DOI: 10.21821/2309-5180-2018-10-2-259-274.
10. Izotov, Oleg A., and Alexander V. Gulyaev. "Assessment of required technological resources by statistical simulation." *Vestnik Gosudarstvennogo universiteta morskogo i rechnogo flota imeni admirala S. O. Makarova* 10.3 (2018): 497–506. DOI: 10.21821/2309-5180-2018-10-3-497-50.
11. Morris, William T. *Management Science: A Bayesian Introduction*. 1st Edition. Prentice Hall, 1968.
12. Lv, Bowen, Bin Yang, Xiaolin Zhu, and Jun Li. "Operational optimization of transit consolidation in multimodal transport." *Computers & Industrial Engineering* 129 (2019): 454–464. DOI: 10.1016/j.cie.2019.02.001.
13. Kuzmicz, Katarzyna Anna, and Erwin Pesch. "Approaches to empty container repositioning problems in the context of Eurasian intermodal transportation." *Omega* 85 (2019): 194–213. DOI: 10.1016/j.omega.2018.06.004.
14. Almetova, Zlata, Vladimir Shepelev, and Sergey Shepelev. "Optimization of Delivery Lot Volumes in Terminal Complexes." *Transportation Research Procedia* 27 (2017): 396–403. DOI: 10.1016/j.trpro.2017.12.020.
15. Lee, Chung-Yee, and Dong-Ping Song. "Ocean container transport in global supply chains: Overview and research opportunities." *Transportation Research Part B: Methodological* 95 (2017): 442–474. DOI: 10.1016/j.trb.2016.05.001.
16. Yin, Ming, and Kap Hwan Kim. "Quantity discount pricing for container transportation services by shipping lines." *Computers & Industrial Engineering* 63.1 (2012): 313–322. DOI: 10.1016/j.cie.2012.03.008.
17. Vural, Ceren Altuntaş, Aysu Göçer, and Árni Halldórsson. "Value co-creation in maritime logistics networks: A service triad perspective." *Transport Policy* 84 (2019): 27–39. DOI: 10.1016/j.tranpol.2018.12.017.

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

Изотов Олег Альбертович —
кандидат технических наук, доцент
Бороздин Егор Алексеевич — лаборант
ФГБОУ ВО «ГУМРФ имени адмирала
С. О. Макарова»
198035, Российская Федерация, Санкт-Петербург,
ул. Двинская, 5/7
e-mail: iztv65@rambler.ru, kaf_pgt@gumrf.ru

INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Izotov, Oleg A. —
PhD, associate professor
Borozdin, Yegor A. — Laboratory assistant
Admiral Makarov State University of Maritime
and Inland Shipping
5/7 Dvinskaya Str., St. Petersburg, 198035,
Russian Federation
e-mail: iztv65@rambler.ru, kaf_pgt@gumrf.ru

Статья поступила в редакцию 5 апреля 2021 г.

Received: April 5, 2021.

PROPOSALS ON THE METHOD FOR CALCULATING WATER LEAKAGES THROUGH THE SLUICE GATES AND VALVES

S. G. Kovyrshin¹, K. P. Morgunov²

¹ — Tsimlyanskiy district of hydraulic structures and shipping —
branch of “Volgo-Don” Administration, Volgogradsk, Russian Federation

² — Admiral Makarov State University of Maritime and Inland Shipping,
St. Petersburg, Russian Federation

The proposals for adjusting the method for determining water leakages through leaks in the sluice gates and valves are presented in the paper. The methodology for leaks accounting and determining the values of infiltrated water consumptions is determined by the current “Instruction for observations and research at navigable hydraulic structures”. However, as shown in the paper, the methodology established by the current regulatory document is not free from shortcomings. The effect on the change in water levels in the lock chamber of the simultaneous processes of water inflow through the leaks of the upstream end of the lock and leakages through the structures of the downstream end of the lock is not taken into account. For a more accurate determination of the change in water levels in the chamber, it is necessary to take into account both processes and their mutual influence, that is, after calculating the filtration leaks through the downstream end of the lock, the leaks through the upstream end of the lock must be recalculated, and vice versa. A new approach to determine the leaks using an iterative calculation process is proposed. Comparison of the data obtained by calculation using two methods with the results of experiments carried out on the operating gateway № 15 of the Volgo-Don Administration is carried out. It is noted that the data obtained according to the method established by the current regulatory document give overestimated values of the water levels in the chamber in comparison with the experience. The coincidence of the experimental data with the data calculated by the proposed iterative method has turned out to be more reliable. In addition, unreliability and laboriousness of the methods for monitoring the water level in the chamber using a boat or binoculars, as recommended by the current instructions, are noted. It is recommended to use the modern technical means for measuring and processing results, which are currently available as part of the equipment of operating shipping locks.

Keywords: shipping lock, lock chamber, sluice gates and valves, water leakages, iterative calculation methods.

For citation:

Kovyrshin, Sergey G., and Konstantin P. Morgunov. “Proposals on the method for calculating water leakages through the sluice gates and valves.” *Vestnik Gosudarstvennogo universiteta morskogo i rechnogo flota imeni admirala S. O. Makarova* 13.3 (2021): 332–340. DOI: 10.21821/2309-5180-2021-13-3-332-340.

УДК 626.45: 532.575.2

ПРЕДЛОЖЕНИЯ ПО МЕТОДИКЕ РАСЧЕТА УТЕЧЕК ВОДЫ ЧЕРЕЗ ВОРОТА И ЗАТВОРЫ СУДОХОДНЫХ ШЛЮЗОВ

С. Г. Ковыршин¹, К. П. Моргунов²

¹ — Цимлянский РГСиС — филиал ФБУ «Администрация «Волго-Дон»,
Волгодонск, Российская Федерация

² — ФГБОУ ВО «ГУМРФ имени адмирала С. О. Макарова»,
Санкт-Петербург, Российская Федерация

В статье обоснованы предложения по корректировке методики определения утечек воды через неплотности в воротах и затворах судоходного шлюза. Методология учета утечек и определения значений расходов просачивающейся воды обусловлена действующей «Инструкцией по наблюдениям и исследованиям на судоходных гидротехнических сооружениях». Однако существующая методика, установленная в соответствии с действующим нормативным документом, не лишена недостатков. В частности, в ней не учитывается влияние на изменение уровней воды в камере шлюза одновременных процессов поступ-

ления воды через неплотности верхней головы и утечки через конструкции нижней головы. Отмечается, что для более точного определения изменения уровней воды в камере необходим учет обоих процессов и их взаимное влияние, т. е. после расчета фильтрационных утечек через нижнюю голову должны быть пересчитаны утечки через верхнюю голову и наоборот. Предложен новый подход к определению утечек с использованием итерационного процесса расчета. Выполнено сравнение данных, полученных расчетным способом по двум методикам, с результатами опытов, выполненных на действующем шлюзе № 15 ФБУ «Администрация «Волго-Дон». Обращается внимание на то, что данные, полученные по методике, установленной в соответствии с действующей инструкцией, дают завышенные по сравнению с опытными данными значения уровней воды в камере. Подчеркивается, что более достоверным оказалось совпадение опытных данных с данными, рассчитанными по предлагаемой итерационной методике. Кроме того, отмечается ненадежность и трудозатратность методов наблюдения за уровнем воды в камере с использованием лодки или бинокля, как это рекомендовано действующей инструкцией. Рекомендовано использование современных технических средств измерений и обработки результатов, имеющихся в настоящее время в составе оборудования действующих судоходных шлюзов.

Ключевые слова: судоходный шлюз, камера шлюза, утечка воды, ворота и затворы, итерационные методы расчета.

Для цитирования:

Ковыркин С. Г. Предложения по методике расчета утечек воды через ворота и затворы судоходных шлюзов / С. Г. Ковыркин, К. П. Моргунов // Вестник Государственного университета морского и речного флота имени адмирала С. О. Макарова. — 2021. — Т. 13. — № 3. — С. 332–340. DOI: 10.21821/2309-5180-2021-13-3-332-340.

Introduction (Введение)

Гидравлические процессы, имеющие место при наполнении и опорожнении камер судоходных шлюзов, оказывают существенное влияние на безопасность условий шлюзования судов, поэтому исследованию этих процессов всегда уделялось большое внимание. Так, в работах [1]–[3] выполнен анализ гидравлических процессов в шлюзах с различными системами питания, работы [4]–[6] посвящены вопросам физического и математического моделирования режимов течения, проблемы изменения характеристик систем наполнения в процессе длительной эксплуатации или реконструкций рассмотрены в работах [7]–[9]. Анализ недостатков существующих систем питания шлюзов и предложения по их улучшению представлены в работах [10]–[12]. Кроме того, влияние на характер наполнения и опорожнения камер оказывают утечки воды через неплотности затворов, расположенных на водопроводных галереях, а также затворенные ворота. Наблюдения за ними является важным источником информации о состоянии уплотнений металлоконструкций.

Данные об увеличении расхода воды, фильтрующейся (просачивающейся) через закрытые ворота и затворы, позволяют судить об износе уплотнений в течение навигации, а также о качестве ремонта, выполненного в течение межнавигационного периода. Согласно нормативному документу [13], показателем, определяющим работу уплотнений, является расход воды, проникающей через них при закрытых воротах и затворах. При этом на практике весьма важной задачей является количественная оценка таких утечек. На шлюзах с искусственным (машинным) питанием верхнего бьефа утечки воды являются прямым источником непроизводительных потерь: объем утечек непосредственно связан с дополнительным объемом перекачки воды насосами и может быть выражен в конкретных суммах затрат на электроэнергию, обслуживание и поставку запчастей для насосных станций. Кроме того, в процессе утечек на металлоконструкциях ворот и затворов могут развиваться вибрационные и кавитационные явления, приводящие, в свою очередь, к их преждевременному износу.

Методы и материалы (Methods and Materials)

Расход воды, просачивающейся через щели и неплотности в воротах и затворах, которые в гидравлическом отношении можно рассматривать как отверстия, «работающие» в напорном режиме, определяется по формуле

$$Q = \mu \omega \sqrt{2gH}, \quad (1)$$

где Q — расход воды, м³/с; μ — коэффициент расхода; ω — суммарная площадь живого сечения отверстий, м²; $g = 9,81$ м/с² — ускорение свободного падения; H — геометрический напор, м, представляющий собой расстояние от центра отверстия до свободной поверхности жидкости.

Использование формулы (1) для выполнения практических расчетов величины утечек через ворота и затворы является затруднительным ввиду сложности оценки коэффициента расхода μ , а также определения реальных величин площади неплотностей ω и действительного напора H .

На практике, согласно требованиям инструкции [13], рекомендуется применять методику, в которой для определения расхода утечек камера шлюза используется в качестве мерного сосуда. При поступлении воды в камеру через ворота и затворы верхней головы или истечении из нее воды через устройства нижней головы будет изменяться уровень воды в камере. Тогда фильтрационный расход воды, поступающей, например, через верхнюю голову, можно определить в виде

$$Q_B = \Omega \frac{h_B}{t_B}, \quad (2)$$

где Ω — площадь зеркала камеры шлюза, м²; h_B — повышение уровня воды в камере за период наблюдений, м; t_B — время наблюдений, с.

Однако в реальности одновременно с поступлением воды в камеру через неплотности в уплотнениях верхней головы будут наблюдаться утечки воды из камеры через неплотности в нижней голове. Более того, вследствие волновых явлений в камере шлюза и подходном канале может возникнуть ситуация обратной фильтрации, что существенно исказит результаты опыта и затруднит оценки. Поэтому, согласно [13], определять утечки воды через верхнюю голову следует при уровне воды в камере на 1–2 м выше уровня нижнего бьефа (УНБ), а при определении фильтрации через нижнюю голову, соответственно, на 1–2 м ниже уровня верхнего бьефа. Таким образом, при расчете утечек через верхнюю голову необходимо учитывать утечки воды через нижнюю голову и наоборот. В этом случае формула (2) для расчета утечек через верхнюю голову примет вид

$$Q_B = \Omega \frac{h_B}{t_B} + A \Omega \frac{h_H}{t_H}, \quad (3)$$

где $\Omega \frac{h_H}{t_H}$ — фильтрационный расход через нижнюю голову; A — коэффициент, показывающий, какую долю фильтрации через нижнюю голову следует учитывать при определении утечек через верхнюю голову.

Рассуждая аналогично, можно получить формулу для расчета утечек через нижнюю голову:

$$Q_H = \Omega \frac{h_H}{t_H} + B \Omega \frac{h_B}{t_B}. \quad (4)$$

Здесь коэффициент B определяет долю утечек через верхнюю голову, которую следует учитывать при расчетах утечек через нижнюю голову.

Величины коэффициентов A и B зависят от конструкции верхней головы шлюза — наличия стенки падения. Согласно формуле (1), расход утечек пропорционален квадратному корню из напора. При этом следует понимать, что утечки через верхнюю голову увеличивают уровень воды в камере. Если в начале цикла измерений уровень воды был равен y_B и в течение периода наблюдений изменился на величину h_B , то в среднем за период наблюдений напор на нижнюю голову можно принять равным $(y_B + 0,5h_B)$. Утечки через нижнюю голову уменьшают уровень воды в камере, поэтому при начальном напоре H_H средний напор за период наблюдений равен $(H_H - 0,5h_H)$. Тогда с учетом пропорциональности расхода квадратному корню из напора получим формулы для расчета коэффициентов A и B :

$$A = \sqrt{\frac{y_B + 0,5h_B}{H_H - 0,5h_H}}; \quad B = \sqrt{\frac{y_H + 0,5h_H}{H_B - 0,5h_B}}.$$

Эти формулы для определения коэффициентов для шлюза без стенки падения приведены в инструкции [13].

При наличии в конструкции верхней головы шлюза стенки падения формулы (3), (4) принимают вид:

$$Q_B = \frac{\Omega \left(\frac{h_B}{t_B} + A \frac{h_H}{t_H} \right)}{1 - AB}; \quad (5)$$

$$Q_H = \frac{\Omega \left(\frac{h_H}{t_H} + B \frac{h_B}{t_B} \right)}{1 - AB}, \quad (6)$$

где коэффициенты A и B для шлюза со стенкой падения.

Данные коэффициенты A и B , в соответствии с [1], определяются выражениями:

$$A = \sqrt{\frac{y_B + 0,5 h_B}{H_H - 0,5 h_H}}; \quad B = \sqrt{\frac{y_H + 0,5 h_H}{0,5 H_1}}. \quad (7)$$

Здесь y_B и y_H — разница уровней в камере и верхнем и нижнем бьефах соответственно; H_1 — напор на верхнюю голову со стороны камеры; H_H — напор на нижнюю голову.

Однако анализ показывает, что формулы (5)–(7) имеют некоторые неточности. Так, напор на пороге верхней головы в формуле для определения коэффициента B остается постоянным во время наблюдения и равным H_1 , поэтому коэффициент 0,5 в данном случае является ошибочным. Кроме того, в процессе расчетов следует учитывать взаимное влияние утечек через нижнюю и верхнюю головы, т. е. после расчета фильтрационных утечек через нижнюю голову должны быть пересчитаны утечки через верхнюю голову и наоборот. Расчеты должны выполняться итерационным методом [14]. Учет итерационного процесса приводит к следующим выражениям для расходов утечек:

$$Q_B = \frac{\Omega \frac{h_B}{t_B} + A Q_H}{K_B}; \quad (8)$$

$$Q_H = \frac{\Omega \frac{h_H}{t_H} + B Q_B}{K_H}. \quad (9)$$

Здесь $K_B = \sqrt{\frac{H_H}{H_H}}$; $K_H = \sqrt{\frac{H_B}{H_H}}$ — использованные параметры; $\overline{H_H}$ и $\overline{H_B}$ — среднее за время наблюдения значение напора на верхнюю и нижнюю головы соответственно; $\overline{H_H}$ — среднее значение полного (максимального) напора.

Изменение уровня воды в камере определится величиной изменения объема, который состоит из притока через верхнюю голову и оттока через нижнюю. Тогда из формул (8), (9) получим

$$h = \frac{Q_B K_B - Q_H K_H}{\Omega} t.$$

Таким образом определится отметка уровня воды в камере с учетом взаимного влияния утечек воды через нижнюю и верхнюю головы.

Результаты (Results)

Для проверки адекватности итерационной модели был выполнен ряд расчетов, в процессе которых в качестве входных данных задавались значения Q_B и Q_H , а также рассчитывались теоретические значения h при различных разностях уровней в камере и верхнем и нижнем бьефах y_B , y_H . Полученные значения h использовались при вычислениях расчетных полных расходов Q_B , Q_H по формулам (5), (6) и (8), (9).

В качестве входных данных модели были использованы значения уровней и расходов, характерных для шлюза № 15 Цимлянского РГСЧС филиала ФБУ «Администрация «Волго-Дон»:

УВБ = 24,60 м — уровень верхнего бьефа;

УНБ = 12,50 м — уровень нижнего бьефа;

$Q_v = 900 \text{ м}^3/\text{с}$ — расход через верхнюю голову;

$Q_n = 500 \text{ м}^3/\text{с}$ — расход через нижнюю голову.

Результаты расчета Q_v , Q_n при различных уровнях в камере, верхнем и нижнем бьефах y_v , y_n приведены в табл. 1, откуда видно, что результаты расчетов, выполненных по итерационным формулам (8), (9), полностью соответствуют значениям, заданным математической моделью, тогда как расчеты, выполненные с помощью формул (5), (6), заимствованных из инструкции [13], завышают заданные значения. Кроме того, разница уровней y_v , y_n не должна оказывать влияние на результаты вычисления полных расходов Q_v , Q_n , однако для формул, приведенных в инструкции [13], такая зависимость четко прослеживается. Для уточнения методики расчета утечек и сравнения полученных значений с опытными данными был проведен ряд опытов на шлюзе № 15 Цимлянского гидроузла.

Таблица 1

Результаты теоретических расчетов утечек Q_v , Q_n

№ п/п.	Уровень верхнего бьефа	Уровень нижнего бьефа	y_v	y_n	h_v	h_n	Формулы (5), (6)		Итерационные формулы (8), (9)	
							Q_v	Q_n	Q_v	Q_n
1	24,60	12,50	1,0	1,0	0,43	−0,03	966	700	900	500
2	24,60	12,50	1,5	1,0	0,41	−0,03	986	713	900	500
3	24,60	12,50	2,0	1,0	0,40	−0,03	1005	726	900	500
4	24,60	12,50	1,0	1,5	0,43	0,03	989	757	900	500
5	24,60	12,50	1,5	1,5	0,41	0,03	1018	781	900	500
6	24,60	12,50	2,0	1,5	0,40	0,03	1046	804	900	500
7	24,60	12,50	1,0	2,0	0,43	0,08	1012	813	900	500
8	24,60	12,50	1,5	2,0	0,41	0,08	1052	851	900	500
9	24,60	12,50	2,0	2,0	0,40	0,08	1092	889	900	500
Среднее значение							1018	782	900	500
Среднеквадратическое отклонение S							39	64	0	0
Коэффициент вариации V , %							3,8	8,2	0	0

Шлюз № 15 — однокамерный со стенкой падения. Для данного типа шлюзов, согласно инструкции [13], величину утечек следует рассчитывать по формулам (5), (6). Схемы опытов по определению утечек через верхнюю и нижнюю головы приведены на рисунке (с. 337).

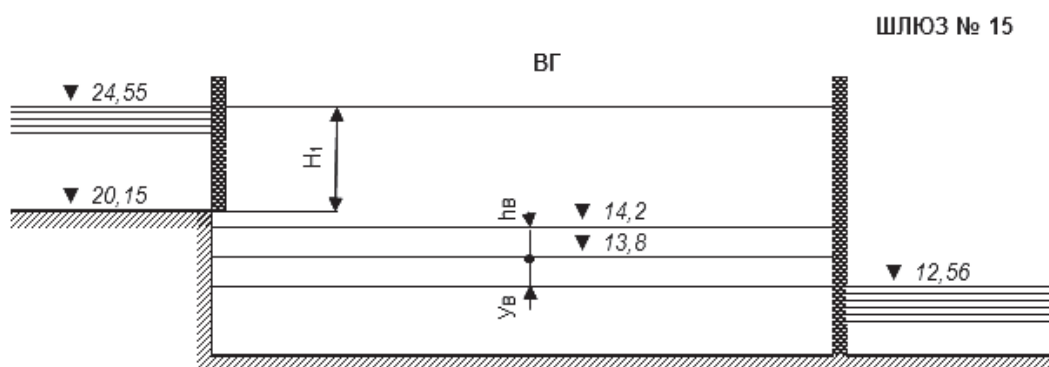
В процессе опытных работ были определены утечки через верхнюю Q_v и нижнюю Q_n головы с использованием формул (5), (6) инструкции [13] и итерационных формул (8), (9). Результаты опытных работ представлены в табл. 2.

Таблица 2

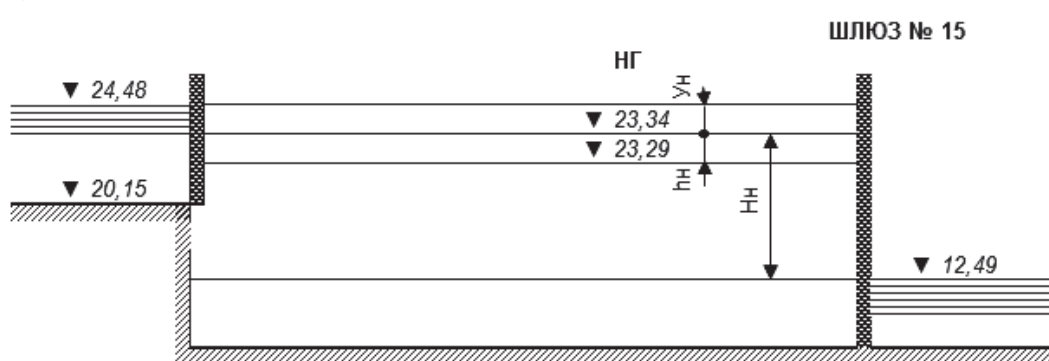
Результаты опытных работ по определению утечек Q_v , Q_n

№ п/п.	Уровень верхнего бьефа	Уровень нижнего бьефа	y_v	y_n	h_v	h_n	Формулы (5), (6)		Формулы (8), (9)	
							Q_v	Q_n	Q_v	Q_n
1	24,55	12,56	2,33	1,47	0,68	− 0,16	1956	1484	1461	918
2	24,55	12,56	1,73	1,47	0,40	− 0,16	1019	816	863	423
3	24,55	12,48	0,14	1,47	0,53	− 0,16	1125	836	984	498
4	24,55	12,56	2,33	1,06	0,68	0,05	1926	1484	1599	918
5	24,56	12,55	1,73	1,06	0,40	0,05	1000	816	917	866
6	24,55	12,48	0,14	1,06	0,53	0,05	1110	897	995	605
Среднее значение							1356	1013	1139	653
Среднеквадратическое отклонение S							456	389	312	199
Коэффициент вариации V , %							34	38	27	30

а)



б)



Схемы опытов по определению утечек через верхнюю (а) и нижнюю (б) головы

На практике величина утечек неоднозначно зависит от напора. С одной стороны, согласно уравнению (1), с возрастанием давления на ворота и затворы возрастает величина утечек, однако, с другой стороны, увеличивающееся давление способствует более плотному створению ворот и затворов верхней или нижней головы и, как следствие, снижению величины утечек. Преобладание того или иного процесса зависит от конкретных ситуаций. Тем не менее на практике результаты группируются около некоторого среднего значения величины утечек с определенным среднеквадратическим отклонением (табл. 2). Анализ результатов практических работ показывает, что значения среднеквадратического отклонения S и коэффициента вариации V , %, полученные по данным расчетов с применением различных формул, существенно отличаются. Формулы инструкции [13], как и приведенные в теоретических расчетах, дают более высокие значения по сравнению с результатами, рассчитанными по итерационным формулам, откуда следует, что кроме разброса значений, вызванных естественными механическими причинами (различные условия створения), формулы для расчета, приведенные в инструкции [13], вносят дополнительные погрешности.

Закключение (Conclusion)

На основе результатов проведенного исследования можно сделать вывод о том, что ряд положений инструкции [13] нуждается в корректировке, поскольку этот документ был издан в 1981 г. и соответствовал уровню развития науки и техники того периода времени. В настоящее время с развитием компьютерных технологий возможно применение более совершенных численных методов. Как отмечается в статье, применение итерационных методов дает более точные значения величины утечек. Кроме того, необходимо пересмотреть рекомендованные разницы уровней для проведения измерений. Так, согласно инструкции [13], при выполнении измерений следует устанавливать разницу уровней y_B, y_H , равную 1–2 м. Однако практические результаты показывают, что более оптимальные значения y_B, y_H лежат в диапазоне 0,5–0,7 м, так как в этом случае условия створения наиболее близки к наполненному или опорожненному состояниям камеры. Также видно, насколько

ненадежны и трудозатратны методы наблюдения уровня воды в камере с использованием лодки или бинокля, как это рекомендовано в инструкции [13]. Современные шлюзы оснащены модифицированными компьютеризированными системами, позволяющими определять уровни в бьефах и в камере с высокой точностью (например, информационно-управляющая система технологической безопасности судопропуска (ИУС ТБС), установленная на шлюзах ВДСК). Все эти особенности, на наш взгляд, должны найти отражение в нормативных документах.

Инструкция [13] является основным документом, регламентирующим деятельность всех служб гидротехнических сооружений. Поэтому актуальное обновление этого документа позволит более своевременно и обоснованно применять технические решения и, соответственно, сократить непроизводительные потери предприятия.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Гапеев А. М. Системы питания судоходных шлюзов водой: монография / А. М. Гапеев, В. В. Кононов. — СПб.: Изд-во ГУМРФ им. адмирала С. О. Макарова, 2013. — 268 с.
2. Гапеев А. М. Гидравлические расчеты судоходных шлюзов: монография / А. М. Гапеев, В. В. Кононов, К. П. Моргунов. — СПб.: Лань, 2020. — 232 с.
3. Гапеев А. М. Обоснование безопасных режимов наполнения (опорожнения) камеры проектируемого шлюза / А. М. Гапеев, Н. М. Морозова // Журнал университета водных коммуникаций. — 2011. — № 3. — С. 11–13.
4. Рябов Г. Г. Моделирование процесса наполнения камеры судоходного шлюза с учетом данных натурных наблюдений / Г. Г. Рябов, А. Н. Ушакевич, Р. С. Смирнов // Вестник Государственного университета морского и речного флота имени адмирала С. О. Макарова. — 2017. — Т. 9. — № 5. — С. 993–1006. DOI: 10.21821/2309-5180-2017-9-5-993-1006.
5. Гапеев А. М. Совершенствование системы наполнения камер судоходных шлюзов Саратовского гидроузла / А. М. Гапеев, К. П. Моргунов, А. В. Подрешетникова // Вестник Государственного университета морского и речного флота имени адмирала С. О. Макарова. — 2017. — Т. 9. — № 5. — С. 984–992. DOI: 10.21821/2309-5180-2017-9-5-984-992.
6. Гапеев А. М. Система наполнения камеры низконапорного судоходного шлюза из-под сегментных подъемно-опускных ворот / А. М. Гапеев, К. П. Моргунов, М. К. Карачева // Вестник Государственного университета морского и речного флота имени адмирала С. О. Макарова. — 2017. — Т. 9. — № 6. — С. 1227–1233. DOI: 10.21821/2309-5180-2017-9-6-1227-1233.
7. Гапеев А. М. Анализ изменения основных параметров системы наполнения камеры судоходного шлюза № 7 канала им. Москвы / А. М. Гапеев, К. П. Моргунов // Вестник Государственного университета морского и речного флота имени адмирала С. О. Макарова. — 2019. — Т. 11. — № 1. — С. 78–86. DOI: 10.21821/2309-5180-2019-11-1-78-86.
8. Гарибин П. А. Реновация систем наполнения водой камер судоходных шлюзов № 1–6 Волго-Балтийского водного пути / П. А. Гарибин, А. В. Богатов // Вестник Государственного университета морского и речного флота имени адмирала С. О. Макарова. — 2020. — Т. 12. — № 4. — С. 640–653. DOI: 10.21821/2309-5180-2020-12-4-640-653.
9. Гапеев А. М. Анализ эксплуатационных показателей судоходных шлюзов с малыми и средними напорами / А. М. Гапеев, К. П. Моргунов // Транспорт Российской Федерации. — 2020. — № 1 (86). — С. 33–37.
10. Гапеев А. М. Анализ показателей работы системы наполнения камер типовых шлюзов Волго-Донского судоходного канала / А. М. Гапеев, К. П. Моргунов // Гидротехника XXI век. — 2020. — № 1 (41). — С. 50–53.
11. Гапеев А. М. Основные показатели системы наполнения камеры судоходного шлюза с цилиндрическими водовыпусками / А. М. Гапеев, К. П. Моргунов // Гидротехническое строительство. — 2020. — № 9. — С. 35–39.
12. Gapeev A. Quality assessment of the system of filling a shipping lock chamber from under the segmental guillotine gate / A. Gapeev, K. Morgunov, M. Karacheva // International Scientific Conference Energy Management of Municipal Facilities and Sustainable Energy Technologies EMMFT 2019: Volume 1. — Springer Nature, 2021. — Vol. 1258. — Pp. 433–441. DOI: 10.1007/978-3-030-57450-5_37.

13. Инструкция по наблюдениям и исследованиям на судоходных гидротехнических сооружениях. Ч. I: Гидротехническая / Главное управление водных путей и гидротехнических сооружений Минречфлота РСФСР. — М.: Транспорт, 1981. — 72 с.

14. Ковыршин С. Г. Современные методы расчета фильтрации через ворота и затворы гидротехнических сооружений / С. Г. Ковыршин // Актуальные проблемы современной когнитивной науки: сб. ст. междунар. науч.-практ. конф. (17 февраля 2019 г., г. Таганрог). — Уфа: OMEGA SCIENCE, 2019. — С. 51–55.

REFERENCES

1. Gapeev, A. M., and V. V. Kononov. *Sistemy pitaniya sudokhodnykh shlyuzov vody: monografiya*. SPb.: Izd-vo GUMRF im. admirala S. O. Makarova, 2013.

2. Gapeev, A. M., V. V. Kononov, and K. P. Morgunov. *Gidravlicheskie raschety sudokhodnykh shlyuzov: monografiya*. SPb.: Lan', 2020.

3. Gapeev, A. M., and N. M. Morozova. "Substantiation of safe modes of filling (emptying) of the chamber of the projected sluice." *Zhurnal universiteta vodnykh kommunikatsii* 3 (2011): 11–13.

4. Ryabov, Georgiy G., Alexandr N. Ushakevich, and Ruslan S. Smirnov. "Simulation the filling navigation lock chamber process by results of field observations." *Vestnik Gosudarstvennogo universiteta morskogo i rechnogo flota imeni admirala S. O. Makarova* 9.5 (2017): 993–1006. DOI: 10.21821/2309-5180-2017-9-5-993-1006.

5. Gapeev, Anatolii M., Konstantin P. Morgunov, and Alisa V. Podreshetnikova. "Improvement of the system filling of the shipping lock's chambers of Saratov's hydroscheme." *Vestnik Gosudarstvennogo universiteta morskogo i rechnogo flota imeni admirala S. O. Makarova* 9.5 (2017): 984–992. DOI: 10.21821/2309-5180-2017-9-5-984-992.

6. Gapeev, Anatolii M., Konstantin P. Morgunov, and Mariya K. Karacheva. "Filling system of low-shipping shipping camera chamber from segment lifting-gate doors." *Vestnik Gosudarstvennogo universiteta morskogo i rechnogo flota imeni admirala S. O. Makarova* 9.6 (2017): 1227–1233. DOI: 10.21821/2309-5180-2017-9-6-1227-1233.

7. Gapeev, Anatolii M., and Konstantin P. Morgunov. "Analysis of changes in the basic parameters of the system of filling the chamber of the ship lock № 7 of the Moscow canal." *Vestnik Gosudarstvennogo universiteta morskogo i rechnogo flota imeni admirala S. O. Makarova* 11.1 (2019): 78–86. DOI: 10.21821/2309-5180-2019-11-1-78-86.

8. Garibin, Pavel A., and Aleksandr V. Bogatov. "Renovation of water filling systems for the chambers of shipping locks № 1–6 of the Volga-Baltic waterway." *Vestnik Gosudarstvennogo universiteta morskogo i rechnogo flota imeni admirala S. O. Makarova* 12.4 (2020): 640–653. DOI: 10.21821/2309-5180-2020-12-4-640-653.

9. Gapeyev, A. M., and K. P. Morgunov. "Analysis of performance characteristics of shipping locks with low and midsized water head." *Transport of the Russian Federation* 1(86) (2020): 33–37.

10. Gapeev, A. M., and K. P. Morgunov. "Analiz pokazatelei raboty sistemy napolneniya kamer tipovykh shlyuzov Volgo-Donskogo sudokhodnogo kanala." *Gidrotekhnika XXI vek* 1(41) (2020): 50–53.

11. Gapeev, A. M., and K. P. Morgunov. "The main indicators of the system filling the camera of the navigation gateway with cylindrical outlets." *Gidrotekhnicheskoe Stroitel'stvo* 9 (2020): 35–39.

12. Gapeev, A., K. Morgunov, and M. Karacheva. "Quality assessment of the system of filling a shipping lock chamber from under the segmental guillotine gate." *International Scientific Conference Energy Management of Municipal Facilities and Sustainable Energy Technologies EMMFT 2019. Volume 1*. Vol. 1258. Springer Nature, 2021. 433–441. DOI: 10.1007/978-3-030-57450-5_37.

13. *Instruktsiya po nablyudeniyam i issledovaniyam na sudokhodnykh gidrotekhnicheskikh sooruzheniyakh. Chast' I. Gidrotekhnicheskaya*. M.: Transport, 1981.

14. Kovyrshin, S. G. "Sovremennye metody rascheta fil'tratsii cherez vorota i zatvory gidrotekhnicheskikh sooruzhenii." *Aktual'nye problemy sovremennoi kognitivnoi nauki: sbornik statei Mezhdunarodnoi nauchno-prakticheskoi konferentsii (17 fevralya 2019 g., g. Taganrog)*. Ufa: OMEGA SCIENCE, 2019. 51–55.

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

Ковыршин Сергей Геннадьевич —
начальник Цимлянского гидроузла
Цимлянский РГСиС — филиал ФБУ
«Администрация «Волго-Дон»
347360, Российская Федерация, г. Волгодонск,
ул. Морская, д. 7
e-mail: sergenkov@mail.ru

INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Kovyrshin, Sergey G. —
Head of the Tsimlyansky waterworks facility
Tsimlyanskiy district of hydraulic structures and
shipping — branch of "Volgo-Don" Administration
7 Morskaya Str., Volgogradsk, 347360,
Russian Federation
e-mail: sergenkov@mail.ru

Моргунов Константин Петрович —
кандидат технических наук, доцент
ФГБОУ ВО «ГУМРФ имени адмирала
С. О. Макарова»
198035, Российская Федерация, г. Санкт-Петербург,
ул. Двинская, 5/7
e-mail: morgunovkp@gumrf.ru

Morgunov, Konstantin P. —
PhD, associate professor
Admiral Makarov State University of Maritime
and Inland Shipping
5/7 Dvinskaya Str., St. Petersburg, 198035,
Russian Federation
e-mail: morgunovkp@gumrf.ru

*Статья поступила в редакцию 8 марта 2021 г.
Received: March 8 2021.*

DOI: 10.21821/2309-5180-2021-13-3-341-358

CUBIC SPLINES SYNTHESIS OF A DISTORTED ISOLINE IN THE ASPECT OF USING DIFFERENTIAL MODE OF SATELLITE NAVIGATION

I. V. Yuyukin

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

The issue of practical application of the concept of «smoothness» in the new paradigm of isogeometric analysis for the interpolation of any navigation isoline based on the method of spline functions is investigated. It is noted that in the process of studying the problem of the exact approximation of the isoline curvature, the practical possibility of bending a planar curve in physical space with the possibility of the existence of discontinuity points is allowed. Taking into account the considered geometric effect it creates a theoretical prerequisite for the synthesis of complex navigation isolines. Variations in the solution of the task are reduced to the optimal selection of the spline modification according to the degree of «smoothness». To understand the possibilities of the mathematical resource, a comparative assessment of a typical set of spline interpolants in the form of linear, quadratic or parabolic, cubic and irrational splines is given. The advantages and disadvantages of each piecewise function are considered. The linear multi-links competing with the perspective cubic spline are interpreted as the minimum splines of the possible maximum «smoothness». The characteristics of the practical arsenal of interpolation tools are illustrated by the explanatory drawings. The cubic spline is recognized as the most preferred form-preserving phenomenon. Theoretically, the leading role of cubic piecewise polynomials in the processing of navigation information is proved. The real advantages of cubic spline interpolation are justified. The mechanism of modernization of the hybrid approximation algorithm with obtaining the effect of the speed of computational operations due to the concretized representation of matrix compositions in the development of the Schoenberg's hypothesis is investigated. In contrast to the classical approach with the permanent calculation of each spline element, the operating with previously known numerical realizations of the matrix structure is proposed. A clarifying geometric interpretation of the probability of occurrence of a distorted navigation isoline is given when using the differential mode of satellite navigation as an alternative to the precise point positioning. The studied theoretical assumptions are confirmed by the practical creation of high-speed application programs for the purpose of «smooth» approximation of a discontinuous isoline or isosurface based on the methods of cubic piecewise approximation. The software upgrade in the proposed study is based on the introduction in the algorithm of additional logical conditions for optimal mathematical manipulation of the points of discontinuity of navigation isolines.

Keywords: curvature approximation, planar curve, spline-interpolant, linear splines, quadratic splines, parabolic splines, cubic splines, irrational splines, Schoenberg's hypothesis, precise point positioning.

For citation:

Yuyukin, Igor V. "Cubic splines synthesis of a distorted isoline in the aspect of using differential mode of satellite navigation." *Vestnik Gosudarstvennogo universiteta morskogo i rechnogo flota imeni admirala S. O. Makarova* 13.3 (2021): 341–358. DOI: 10.21821/2309-5180-2021-13-3-341-358.

УДК 656.61.052 656

СИНТЕЗ КУБИЧЕСКИМИ СПЛАЙНАМИ ИСКАЖЕННОЙ ИЗОЛИНИИ В АСПЕКТЕ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ ДИФФЕРЕНЦИАЛЬНОГО РЕЖИМА СПУТНИКОВОЙ НАВИГАЦИИ

И. В. Ююкин

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

Исследован вопрос практического применения понятия «гладкости» в новой парадигме изогеометрического анализа для интерполяции любой навигационной изолинии на основе метода сплайн-функций. Отмечается, что в процессе изучения проблемы точного приближения кривизны изолинии допускается практическая возможность изгиба плоской кривой в физическом пространстве с возможностью существования

точек разрыва. Учет рассматриваемого геометрического эффекта создает теоретическую предпосылку синтеза сложных навигационных изолиний. Вариации решения задачи сводятся к оптимальному подбору сплайновой модификации по степени «гладкости». Для понимания возможностей математического ресурса приводится сравнительная оценка типичного набора сплайн-интерполянтов в виде линейных, квадратичных или параболических, кубических и нерациональных сплайнов. Рассматриваются преимущества и недостатки каждой кусочной функции. Конкурирующие с перспективным кубическим сплайном линейные многозвенники интерпретируются как минимальные сплайны возможной максимальной «гладкости». Характеристика практического арсенала интерполяционных средств иллюстрируется поясняющими рисунками. Кубический сплайн признается наиболее предпочтительным формосохраняющим феноменом. Теоретически доказывается лидирующая роль кубических кусочных многочленов в вопросах обработки навигационной информации. Обосновываются реальные преимущества кубической сплайн-интерполяции. Исследуется механизм модернизации гибридного алгоритма аппроксимации с получением эффекта быстродействия вычислительных операций за счет конкретизированного представления матричных композиций в развитии гипотезы Шенберга. Предлагается оперирование с заранее известными числовыми реализациями структуры матриц в отличие от классического подхода с перманентным вычислением каждого сплайнового элемента. Дана уточняющая геометрическая интерпретация вероятности возникновения искаженной навигационной изолинии при использовании дифференциального режима спутниковой навигации как альтернативы точного позиционирования положения. Рассматривается алгоритмическая возможность аппроксимации сложной изолинии на основе специальных разработанных предложений. Ситуация моделирования разрывной изолинии является авторской точкой зрения на перспективу восстановления искаженной навигационной изолинии кубическими сплайнами. Исследованные теоретические предположения подтверждаются практическим созданием прикладных программ высокого быстродействия с целью «гладкого» приближения разрывной изолинии или изоповерхности на основе методов кубической кусочной аппроксимации. Модернизация программного обеспечения в предлагаемом исследовании основывается на введении в алгоритм дополнительных логических условий оптимального математического манипулирования точками разрыва навигационных изолиний.

Ключевые слова: приближение кривизны, плоская кривая, сплайн-интерполянт, линейные сплайны, квадратичные сплайны, параболические сплайны, кубические сплайны, нерациональные сплайны, гипотеза Шенберга, точное позиционирование положения.

Для цитирования:

Ююкин И. В. Синтез кубическими сплайнами искаженной изолинии в аспекте использования дифференциального режима спутниковой навигации / И. В. Ююкин // Вестник Государственного университета морского и речного флота имени адмирала С. О. Макарова. — 2021. — Т. 13. — № 3. — С. 341–358. DOI: 10.21821/2309-5180-2021-13-3-341-358.

Введение (Introduction)

Выдвигается гипотеза о принципиальной возможности синтеза абсолютно любой навигационной изолинии на основе *метода сплайн-функций*. Вариации решения данной задачи сводятся к оптимальному подбору сплайновой модификации по степени «гладкости». С геометрической точки зрения кубический сплайн является наиболее предпочтительным формосохраняющим интерполянтом, поскольку он формирует пространственную «гладкую» кривую [1]. При рассмотрении вопроса манипулирования формой восстанавливаемого кубическим сплайном математического объекта в новой парадигме изогеометрического анализа допускается практическая возможность изгиба «гладкой» кривой в физическом пространстве [2]. Данный геометрический эффект ориентирует исследователя на теоретическую возможность синтеза самых сложных изолиний. Для получения оптимальной интерполяции с математической точки зрения выгодно использовать кусочные полиномы третьей степени. Кубический сплайн имеет максимальный класс «гладкости», обеспечивающий наличие непрерывности производных второго порядка в серии точек «склейки» кусочной конструкции. Дифференцируемость до вторых производных в точках многозвенного соединения однозначно не создает «гладкости» кубического сплайна в смысле приближения минимума кривизны искусственно синтезируемой плоской кривой. Для того чтобы получить минимум кривизны или максимум «гладкости», у любой изолинии дополнительно необходимо обеспечить правильную ориентацию набора контрольных вершин характеристического многоугольника сплайнового базиса.

Масштабирующий многовершинный контур многозвенной функции геометрически формируется при соединении прямыми линиями позиций полюсов интерполяции [3]. Интерполяционная кривая конструируется на базисе контрольных вершин характеристического многоугольника, единственным образом задающего ее геометрическую форму [4]. Плоской кривой однозначно принадлежат первая и последняя базисная вершина через реализацию так называемых *граничных условий*, в то время как промежуточные вершины характеризуют производные, порядок и алгебраический вид самой навигационной изолинии. Для получения приемлемой схемы сплайнового приближения навигационной функции необходимо учитывать взаимосвязь между полюсами интерполяции и сеточной организацией узлов. Версия аппроксимации методом наименьших квадратов является наиболее обоснованным способом выбора полюсов интерполяции [5].

Локальное изменение вершин в одиночном сеточном сегменте деформирует форму алгебраической кривой только внутри выбранного интервала, в то время как остальная часть синтезируемой кривой останется прежнего геометрического вида. Отличительная черта *локальности* заключается в том, что значения сплайна на промежутке между двумя узлами сетки зависят исключительно от интерполированной навигационной функции только в некоторой окрестности фиксированного диапазона при полном отсутствии геометрического влияния на внешний вид интерполяционной кривой на остальных сеточных сегментах [6]. Практически *свойство локальности* существенно затрудняет исследователю реальную возможность осуществлять независимые изменения формы результирующей кривой за пределами определенного координатного отрезка при ограниченной возможности конструкторской манипуляции общим видом сплайновой конструкции. Данный эффект технологически обуславливается локальностью базиса кубического сплайна [7].

Фактически кубический сплайн задает своими конструктивными особенностями идеальный вариант приближения, так как применение сплайна меньшей степени автоматически приведет к возможности расходимости самого процесса интерполяции ввиду понижения «гладкости» алгебраической кривой [8]. В настоящее время кубические сплайны являются важнейшим инструментом в задачах, связанных с аппроксимацией функций [9]. Хорошие дифференциальные свойства и алгоритмичность делают аппарат кубических сплайнов универсальным инновационным средством обработки разнообразной навигационной информации.

В целом имеет место характерная ситуация, когда, на основе частного абстрактного случая использования кубического сплайна, научное исследование порождает многократность конкретных прикладных применений в процессе решения разноплановых навигационных задач. Представляется целесообразным в аспекте обработки навигационной информации отдать предпочтение совершенному сплайновому алгоритму с апробированным быстродействием и высокой точностью вычислений в отличие от существующих методов интерполяции [10]. Использование устойчивых математических процедур, безусловно, может повысить стандарты безопасности судовождения при синхронном игнорировании вероятности аварийности ввиду недостатков традиционных расчетных методов.

Более выгодным является применение перспективных алгоритмов на опережение возможности появления аварийной ситуации без допущения роста аварийности, обусловленного использованием морально устаревших классических методов. В теоретическом плане проблема повышения точности судовождения решается также путем совершенствования алгоритмов обработки информации с учетом того, что недостатками современных математических методов являются лежащие в их основе допущения и предположения, не позволяющие гарантированно решать задачи аппроксимации с приемлемой точностью [11].

Основная проблема использования традиционных алгоритмов заключается в том, что они не могут рассматриваться как алгоритмы универсальной аппроксимации при исключении возможности потенциального моделирования реально существующих зависимостей с любой наперед заданной степенью точности [11]. С целью реализации прикладных возможностей сплайн-функций в рамках проекта геометрического моделирования сложной изолинии сформулированы следующие задачи:

1. Необходимость теоретического подтверждения гипотезы о возможности разработки математической концепции использования искаженной изолинии в процессе обработки навигационной информации.
2. Обоснование оптимальности и эффективности применения кубических сплайнов для восстановления изолиний с элементами функционального разрыва при сравнительной оценке с альтернативными интерполянтами.
3. Анализ свойства локальности и экстремального свойства сплайнов для разработки рекомендаций по их практическому использованию в сплайновых алгоритмах.
4. Формирование точки зрения о непосредственном использовании сетки искаженных дифференциальными поправками изолиний при уточняющей геометрической интерпретации для понимания перспективы многофакторной обработки навигационной информации.
5. Выполнение обзора оценки точности современных возможностей дифференциального режима спутниковой навигации.
6. Рассмотрение вопроса субъективного математического манипулирования измерительными данными при аппроксимационном моделировании изолиний и изоповерхностей.
7. Разработка высокоскоростного программного обеспечения для «гладкого» приближения любой изолинии и изоповерхности на основе методов кубической кусочной аппроксимации.

Методы и материалы (Methods and Materials)

Для понимания возможностей применения математического ресурса сплайн-функций представляется логичным выполнить сравнительную оценку типичных интерполянтов. Сплайн первой степени геометрически представляет собой ломаную линию, проходящую через полюса интерполяции за счет конструирования геометрии объекта на основе комплексирования линейного сплайнового базиса (рис. 1) [6]. За внешней простотой рисунка скрывается специфичный вариант из арсенала сплайновых средств, позволяющих успешно решить прикладную задачу судовождения с неулучшаемыми показателями точности. В ситуации аппроксимации линейными сплайновыми комбинациями порядок приближения даже на равномерной сетке будет лишь вторым, а на неравномерной сетке — минимальным (первым) [9]. Если по условию практической навигационной задачи такой точности достаточно, то в данном случае появляется целесообразность применения линейного функционала [12].

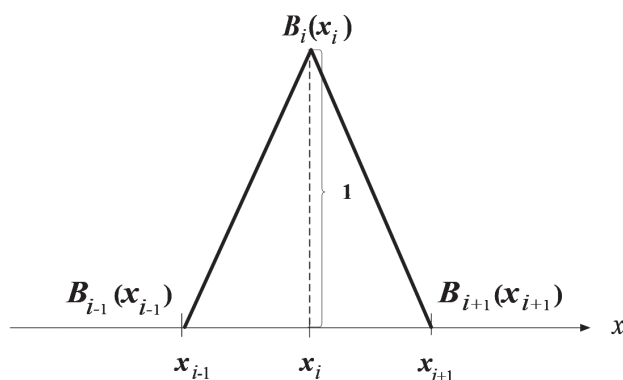


Рис. 1. Базис фрагментарного линейного B-сплайна

При этом простом «сценарии» решения практических задач необходимо учитывать, что аппроксимация ломаными линиями не может быть в полном смысле «гладкой» и поэтому эффективной. Кусочно-линейную функцию нерационально применять в программной реализации алгоритма обработки навигационной информации ввиду провоцирования «лестничного эффекта» при компьютерной визуализации практических приложений задач судовождения [12]. Единственное преимущество сплайна первой степени заключается в том, что он формализуется по явным формулам, не требуя задания *краевых условий* [12]. Линейный сплайн с позиций теории приближения можно интерпретировать как минимальный сплайн возможной максимальной «гладкости» [13].

Понять идею линейной интерполяции лучшим образом позволит внимательное наблюдение за работой художника. Обычно эскиз схематически выполняется для того, чтобы выразить общую идею рисунка. Такой подход демонстрирует суть геометрической интерпретации *метода линейной сплайновой интерполяции*. Однако графические неточности в виде «звездных» элементов убедительно подчеркивают стратегические недостатки применимости линейного сплайна в сравнительной оценке с преимуществом кубических многозвенных конструкций [12].

Возможной альтернативой линейной интерполяции может явиться приближение аналитических функций параболическими сплайнами. В общем случае существует определенный круг специальных математических задач так называемой *выпуклой интерполяции*, или *сплайн-интерполяции с ограничениями типа неравенств* по применимости сплайнов второй степени. Параболические сплайны являются многозвенниками меньшей степени «гладкости» по сравнению с кубическими *сглаживающими сплайнами*, что объясняется их некоторой математической «искусственностью». Под данным термином понимается отсутствие *экстремальных свойств* кусочно-квадратических функций, т. е. их дифференцируемость может быть реализуема только до первой производной, тогда как кубические сплайны обладают непрерывностью до производных второго порядка. При этом степень свободы каждой части кусочного двучлена остается неопределенной, что автоматически предполагает многообразие ситуаций интерполяции в неявной форме. Математические условия монотонности для параболического сплайна являются менее строгими, чем для кубического.

Использование параболических сплайнов оправдано при интерполяции аналитических функций малой «гладкости» [14]. Главными отрицательными условиями применения квадратичных сплайнов являются факты отсутствия наследования геометрической формы интерполируемой функции и вероятность нежелательных всплесковых осцилляций восстановленной кривой в определенных обстоятельствах [15].

Кубический сплайн — это кусочно-полиномиальная дважды непрерывно дифференцируемая функция однократного дефекта, составленная из фрагментов кубических многочленов. Данное определение позволяет интерпретировать указанный математический феномен как *экстремальный сплайн* наивысшей «гладкости». Свойство экстремальности позволяет практически решить важную задачу приближения сплайнами со «сглаживанием» исходных данных в ситуации, когда в измерениях присутствует погрешность. *Сглаживающий сплайн* характеризуется тем, что проходит в некоторой окрестности заданных исходных значений, в отличие от интерполяционного сплайна, строго проходящего через все позиции измеренных данных. По сравнению с интерполяционным сплайном эволюция до сглаживающего сплайна требует большего объема вычислительных операций. При решении вопроса о том, какой сплайн синтезировать, необходимо в первую очередь учитывать погрешности информационных данных. Практически бесполезным является применение сглаживающего сплайна, когда экспериментальная информация задана с точностью, сопоставимой с погрешностью представления чисел в двоичной системе счисления компьютерных вычислительных операций. В то же время неизбежно приходится строить сглаживающий сплайн, когда, согласно условию задачи, на качественные характеристики кусочного многозвенника накладываются жесткие ограничения.

Все недостатки, присущие линейным и параболическим сплайнам, в значительной степени нивелируются при переходе к кубическим сплайнам. Лидирующая роль сплайнов третьей степени однозначно проявляется при компьютерной визуализации программных алгоритмов удобочитаемостью графических визуализаций и практическим отсутствием графических искажений, подобных «звездным эффектам» [12]. В случае кубического сплайна геометрические разрывы в узлах интерполяции отсутствуют, а полиномы, примыкающие к каждому сеточному узлу, «склеиваются» в один алгебраический многочлен. Полиномиальный кубический сплайн может получить эффективное представление для вычислений по *схеме Горнера* с целью методического обеспечения максимального быстродействия расчетной процедуры [16]. Таким образом, наиболее востребованными и используемыми в практических приложениях могут оказаться кубические сплайны как основной и универсальный инструмент приближения навигационных функций благодаря хорошим аппроксимативным свойствам в сочетании с присущей им относительной простотой компьютерных реализаций [17].

Более универсальным и удобным оказалось применение на практике именно кусочно кубических многочленов как сплайнов, обладающих *свойством наилучшей «гладкости»* с целью эффективного моделирования плоских кривых и плавных приближений поверхностей [18]. Хорошие аппроксимативные свойства в сочетании с эффективностью компьютерных реализаций возводят кубические сплайны в ранг оптимального средства решения различных задач судовождения.

Сплайны четвертой степени и выше интерпретируются как нерациональные. Инкорпорирование в обработку навигационной информации сплайновых конструкций высоких степеней неизбежно вызывает существенное усложнение расчетных процедур с синхронной потерей быстродействия вычислительных операций. Системы уравнений для сплайнов более высоких степеней неоправданно усложняются, диагональное преобладание в соответствующих системах уравнений отсутствует, что не позволяет гарантировать устойчивое вычисление определяемых параметров и затрудняет получение оценок погрешности и изучение сходимости процесса интерполяции [19]. Отсутствие фактора устойчивости алгоритма является признаком возможности прогрессивного роста вычислительных погрешностей.

Поскольку кубический случай является лучшим вариантом аппроксиматора, представляется целесообразным конкретизировать гибридный алгоритм двумерного приближения навигационной функции при определенной ситуации использования многосвязников третьей степени. Для этого необходимо однозначное представление составляющих элементов алгоритмического конгломерата в виде комбинаторики *B*-сплайнов и сплайнов лагранжева типа [12]. Для моделирования базиса в пространстве кусочно-многочленных функций [20] предлагается к реализации следующая алгоритмическая комбинация стратегической структуры решения задачи интерполяции в соответствии с *гипотезой Шенберга* [21]:

$$S(x) = \sum_{i=0}^{N+1} c_i B_i(x), \quad (1)$$

где $S(x)$ — базисный финитный сплайн с генерацией по координате x ;

c_i — скалярные сплайновые коэффициенты, подлежащие математическому определению или (в геометрической интерпретации) контрольные вершины характеристического многоугольника сплайнового базиса;

$B_i(x)$ — «шапочные» функции базисного сплайна.

Отличие фрагментарного *B*-сплайна $S(x)$ от однократного формата лагранжева аналога заключается в финитности конструкции базисного интерполянта (рис. 1 и 2). Рассмотрим подробно на рис. 2 представление кубического *B*-сплайна (1), акцентируя внимание на числовых значениях «шапочных» функций, реализующихся в каждом интерполяционном узле в конкретные цифры.

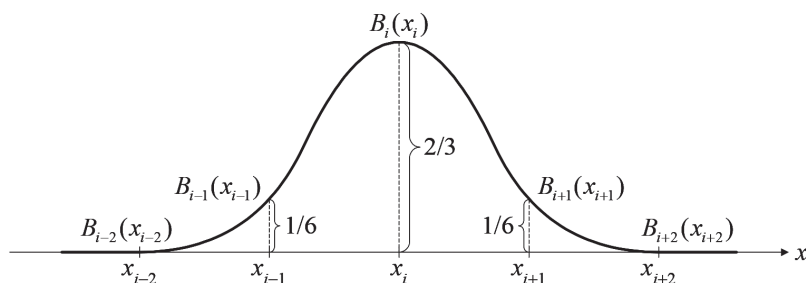


Рис. 2. Цифровая реализация «шапочных» функций фрагментарного кубического *B*-сплайна

Узловые «функции-крыши» $B_i(x_i)$ базисного кубического сплайна на пятиузловом сеточном интервале принимают следующие числовые значения в соответствии с рис. 2:

$$B_i(x_i) = \frac{2}{3}; B_{i-1}(x_{i-1}) = B_{i+1}(x_{i+1}) = \frac{1}{6}; B_{i-2}(x_{i-2}) = B_{i+2}(x_{i+2}) = 0. \quad (2)$$

Математическая конструкция кубического сплайна лагранжева типа в одномерной композиции представлена на рис. 3.

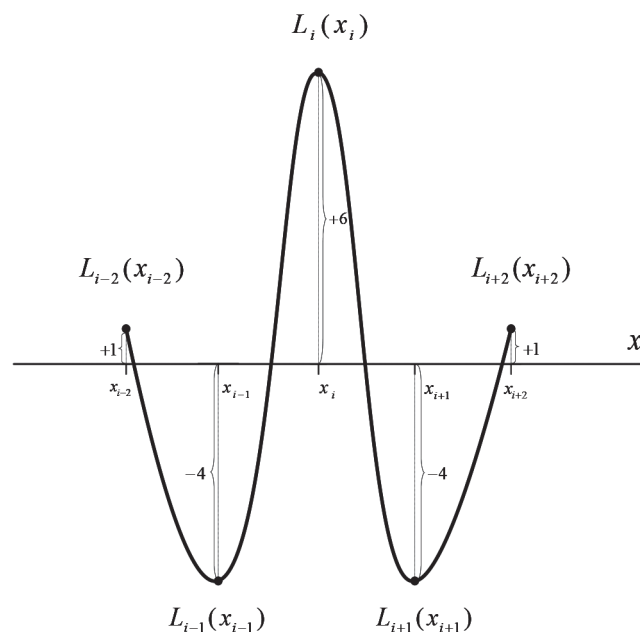


Рис. 3. Цифровые реализации фрагментарного кубического сплайна лагранжева типа

Принцип построения кубических многочленов Лагранжа на пятиузловом сеточном сегменте технологически является идентичным своему аналогу в виде кубического нормализованного *B*-сплайна (см. рис. 2). Для равномерной сетки коэффициенты сплайновых аналогий Лагранжа реализуются в виде конкретных чисел в соответствии с рис. 3:

$$L_{i,i-2} = +1; L_{i,i-1} = -4; L_{i,i} = +6; L_{i,i+1} = -4; L_{i,i+2} = +1. \quad (3)$$

Отличие интерполянта Лагранжа от базисного сплайна заключается в утрате ключевого свойства нормализованности при отсутствии разбиения единицы на определенных сеточных носителях конечной минимальной длины. Базисный и лагранжев сплайн в сравнении с восстанавливаемой изолинией представляют разные физические объекты. Например, *B*-сплайн организует базовую искусственную конструкцию, а не является самым непосредственным фрагментом кривой [22].

Реальная математическая кривая на примере базисного сплайна генерируется путем умножения последовательности финитных функций $B_i(x_i)$ на координаты вершин характеристического многоугольника сплайнового базиса c_i в каждой произвольной сеточной точке x [23]. Таким образом, многозвенник является вторичной конструкцией по отношению к оригинальной функциональной зависимости $U = f(x, y)$ — рис. 4.

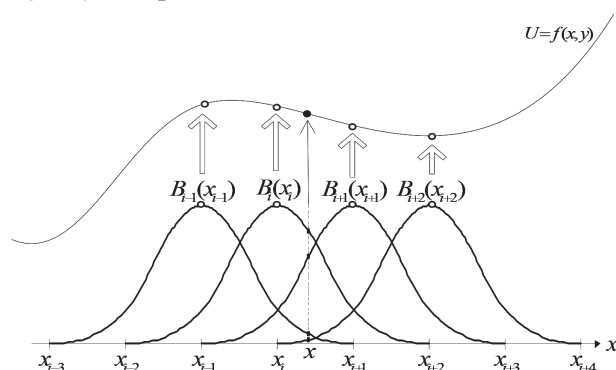


Рис. 4. Геометрическая интерпретация моделирования абстрактной навигационной изолинии кубическими базисными сплайнами

Система уравнений гибридного комбинации B -сплайна с его лагранжевым аналогом в блочно-матричной форме в общем виде может быть представлена следующим образом [5]:

$$\begin{bmatrix} E_1 & E_2 \\ \frac{1}{\sqrt{p}} E_1 & H_2 \\ E_2 & \frac{1}{\sqrt{p}} H_1 \\ \frac{1}{\sqrt{p}} H_1 & \frac{1}{\sqrt{p}} H_2 \end{bmatrix} \times [C] = \begin{bmatrix} F \\ 0 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix}. \quad (4)$$

Клетки блочных матриц E_1 , E_2 и H_1 , H_2 , соответственно, в общем виде формируются коэффициентами $B_{g, k+1}(\varphi_q)$, $B_{h, m+1}(\lambda_r)$ и $L_{g, k+1}(\varphi_q)$, $L_{h, m+1}(\lambda_r)$ [5]:

$$E_1 = \begin{bmatrix} B_{-k, k+1}(\varphi_1) & \dots & B_{g, k+1}(\varphi_1) \\ B_{-k, k+1}(\varphi_2) & \dots & B_{g, k+1}(\varphi_2) \\ \dots & \dots & \dots \\ B_{-k, k+1}(\varphi_q) & \dots & B_{g, k+1}(\varphi_q) \end{bmatrix}; \quad E_2 = \begin{bmatrix} B_{-m, m+1}(\lambda_1) & \dots & B_{h, m+1}(\lambda_1) \\ B_{-m, m+1}(\lambda_2) & \dots & B_{h, m+1}(\lambda_2) \\ \dots & \dots & \dots \\ B_{-m, m+1}(\lambda_r) & \dots & B_{h, m+1}(\lambda_r) \end{bmatrix}. \quad (5)$$

$$H_1 = \begin{bmatrix} L_{-k, k+1}(\varphi_1) & \dots & L_{g, k+1}(\varphi_1) \\ L_{-k, k+1}(\varphi_2) & \dots & L_{g, k+1}(\varphi_2) \\ \dots & \dots & \dots \\ L_{-k, k+1}(\varphi_q) & \dots & L_{g, k+1}(\varphi_q) \end{bmatrix}; \quad H_2 = \begin{bmatrix} L_{-m, m+1}(\lambda_1) & \dots & L_{h, m+1}(\lambda_1) \\ L_{-m, m+1}(\lambda_2) & \dots & L_{h, m+1}(\lambda_2) \\ \dots & \dots & \dots \\ L_{-m, m+1}(\lambda_r) & \dots & L_{h, m+1}(\lambda_r) \end{bmatrix}.$$

Поиск вероятнейшего решения (4) может быть эффективно реализован на основе модернизированного метода наименьших квадратов [5]. Оптимальная применимость кубических B -сплайнов в практических приложениях обуславливается небольшими погрешностями вычислений на основе применения данных аппроксимантов [24]. Популярность кубического сплайна экспериментально подтверждается доказанной высокой точностью вычислительных операций до шестого порядка в расчете любого навигационного параметра при интерполяции любой навигационной изолинии [12]. При использовании кубических сплайнов был эффективно решен многовариантный спектр прикладных навигационных задач: аппроксимация геоида [25], сплайновое восстановление рельефа подводной топографии на основе батиметрических измерений [12], сплайн-интерполяция гиперболической навигационной изолинии [16], поиск ошибок в навигационных базах данных методом компьютерной визуализации синтезированных сплайновых изоповерхностей [26].

Результаты (Results)

С целью детализированного представления B -сплайновых алгоритмов предлагается выполнить конкретизацию матричных композиций типа (5), скомпонованных из набора числовых сочетаний кубического сплайна как наиболее оптимального для реализации матричного исчисления [6]. Конкретизированное оформление математических конструкций может способствовать минимизации неформализуемой интуиции, обычно присутствующей у исследователя в любом

тщательно разработанном алгоритме, для субъективного математического манипулирования полем измерительных данных при аппроксимационном восстановлении поверхностей или аналитических кривых [27]. Чертежник на основе собственного опыта на подсознательном уровне воспринимает информацию о геометрической форме, содержащуюся в измерительных данных, и интуитивно проводит плоские кривые корректно и плавно [28]. Сплайновый подход является эффективным инструментарием для моделирования геометрических объектов в автоматизированном проектировании для исключения влияния человеческого фактора [29].

Избавиться от дробного представления коэффициентов базисного кубического сплайна позволит умножение на цифру шесть каждой «шапочной» функции $B_i(x_i)$ с целью оперирования целочисленными значениями:

$$B_i(x_i) = 4; \quad B_{i-1}(x_{i-1}) = B_{i+1}(x_{i+1}) = 1. \quad (6)$$

Общий матричный коэффициент $1/6$ перед матрицами E_1 и E_2 на рис. 4 возвращает представление B -сплайна к оригинальной числовой конструкции (2), нивелируя ситуацию искусственного домножения на цифру шесть узловых значений «шапочных» функций. Сдвигом строк клеточных матриц E_1 и E_2 на рис. 5 реализуются ленточные версии данных в конкретном представлении прямоугольной таблицы чисел «функций-крыш» B -сплайна на примере кубического аппроксиманта в случае задания естественных краевых условий [30]. По существу, через краевые условия в конструкцию сплайна включаются свободные параметры, варьированием которых, в известной степени, можно управлять формой сплайна:

$$E_1 = \frac{1}{6} \times \begin{bmatrix} \dots & 1 & 0 & 0 & 0 & \dots \\ \dots & 4 & 1 & 0 & 0 & \dots \\ \dots & 1 & 4 & 1 & 0 & \dots \\ \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \\ \dots & 1 & 4 & 1 & 0 & \dots \\ \dots & 0 & 0 & 1 & 4 & \dots \\ \dots & 0 & 0 & 0 & 1 & \dots \end{bmatrix}; \quad E_2 = \frac{1}{6} \times \begin{bmatrix} \dots & 1 & 0 & 0 & 0 & \dots \\ \dots & 4 & 1 & 0 & 0 & \dots \\ \dots & 1 & 4 & 1 & 0 & \dots \\ \dots & 0 & 1 & 4 & 1 & \dots \\ \dots & 0 & 0 & 1 & 4 & \dots \\ \dots & 0 & 0 & 0 & 1 & \dots \end{bmatrix}.$$

Рис. 5. Конкретизированная трехдиагональная матрица интерполяционного кубического B -сплайна

Трансформированные числовые реализации формул (5) выделены отличительными красными прямоугольниками в презентации матрицы E_1 . Трехдиагональное сочетание демонстрируется красными линиями на примере матрицы E_2 . В процессе анализа рис. 5 выявляется доминирование главной диагонали. Аналогичным сдвигом строк клеточных матриц H_1 и H_2 на рис. 6 реализуются ленточные версии блочных матриц в конкретном представлении прямоугольной таблицы чисел сплайна лагранжева типа на примере кубического случая при задании естественных краевых условий [30].

Числовые последовательности формулы (2) выделены отличительными красными прямоугольниками в презентации матрицы H_1 в полном соответствии с числовыми реализациями, представленными на рис. 3. Пятидиагональная математическая привилегированность продемонстрирована в виде красных линий на примере матрицы H_2 . Явное диагональное преобладание в матрицах E_1, E_2 и H_1, H_2 очевидно, а следовательно, решение матричной композиции существует и является единственно возможным [1].

$$H_1 = \begin{bmatrix} \dots & +1 & \pm 0 & \pm 0 & \pm 0 & \pm 0 & \pm 0 & \dots \\ \dots & -4 & +1 & \pm 0 & \pm 0 & \pm 0 & \pm 0 & \dots \\ \dots & +6 & -4 & +1 & \pm 0 & \pm 0 & \pm 0 & \dots \\ \dots & -4 & +6 & -4 & +1 & \pm 0 & \pm 0 & \dots \\ \dots & \boxed{+1} & \boxed{-4} & \boxed{+6} & \boxed{-4} & \boxed{+1} & 0 & \dots \\ \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \\ \dots & \pm 0 & \boxed{+1} & \boxed{-4} & \boxed{+6} & \boxed{-4} & \boxed{+1} & \dots \\ \dots & \pm 0 & \pm 0 & +1 & -4 & +6 & -4 & \dots \\ \dots & \pm 0 & \pm 0 & \pm 0 & +1 & -4 & +6 & \dots \\ \dots & \pm 0 & \pm 0 & \pm 0 & \pm 0 & +1 & -4 & \dots \\ \dots & \pm 0 & \pm 0 & \pm 0 & \pm 0 & \pm 0 & +1 & \dots \end{bmatrix}$$

$$H_2 = \begin{bmatrix} \dots & +1 & \pm 0 & \pm 0 & \pm 0 & \pm 0 & \pm 0 & \dots \\ \dots & -4 & +1 & \pm 0 & \pm 0 & \pm 0 & \pm 0 & \dots \\ \dots & +6 & -4 & +1 & \pm 0 & \pm 0 & \pm 0 & \dots \\ \dots & -4 & +6 & -4 & +1 & \pm 0 & \pm 0 & \dots \\ \dots & +1 & -4 & +6 & -4 & +1 & \pm 0 & \dots \\ \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \\ \dots & \pm 0 & +1 & -4 & +6 & -4 & +1 & \dots \\ \dots & \pm 0 & \pm 0 & +1 & -4 & +6 & -4 & \dots \\ \dots & \pm 0 & \pm 0 & \pm 0 & +1 & -4 & +6 & \dots \\ \dots & \pm 0 & \pm 0 & \pm 0 & \pm 0 & +1 & -4 & \dots \\ \dots & \pm 0 & \pm 0 & \pm 0 & \pm 0 & \pm 0 & +1 & \dots \end{bmatrix}$$

Рис. 6. Конкретизированная пятидиагональная матрица интерполяционного кубического сплайна лагранжева типа

Задачи интерполирования и аппроксимации сплайнами фактически связаны с решением систем алгебраических уравнений с ленточными матрицами. Например, для построения интерполяционного кубического B -сплайна необходимо решить систему с трехдиагональной матрицей (рис. 5), а для организации конструкции кубического сплайна лагранжева типа появляется необходимость решения системы с пятидиагональной матрицей (рис. 6). Матричное диагональное преобладание обеспечивает существование и единственность кубического сплайна [1]. С математической точки зрения диагональное преобладание означает невырожденность рассматриваемой матрицы, что гарантирует существование решения системы алгебраических уравнений в матричном исчислении [28]. Диагональное преобладание матриц обеспечивает алгоритму корректность и устойчивость в том смысле, что все алгебраические действия, связанные с матричным исчислением, выполнимы, т. е. знаменатели в формулах нигде не обращаются в ноль.

Конкретизированное представление матриц в алгоритме при его программной реализации позволяет дополнительно увеличить быстродействие расчетов, так как оперирование с заранее известными числами является более эффективным в отличие от необходимости перманентного вычисления каждого элемента матрицы по теоретической формуле (1), предложенной Шенбергом с целью унифицированного применения для сплайнов различных степеней. Поскольку коэффициенты заранее известны в случае определенности использования кубического сплайна (2), (6) или его аналога лагранжева типа (3), целесообразно непосредственно в расчете задействовать предварительно сформированные на основе выбора кубического интерполянта числа, условно абстрагируясь от общего применения теоретической формулы (1), требующей, по своей стратегической сути, каждый раз вычисления заново сплайновых коэффициентов в тактических вариантах выбора сплайнов первой, второй, третьей или четвертой степени.

Абстрактный характер конкретизированного представления матриц в теоретическом исследовании получает конкретное оптимальное воплощение при программной реализации гибридного сплайнового алгоритма. Выявленная целесообразность применения кубического сплайна позволяет предельно конкретизировать алгоритм для разработки высокоскоростного программного обеспечения. В данном исследовании рассматривается алгоритмическая возможность аппроксимации любой навигационной функции вплоть до искаженной изолинии, возникающей от принятия уточняющих поправок дифференциального режима.

Предположим, что абстрактная навигационная изолиния, изначально представленная на рис. 4, задействована в процессе обработки навигационной информации в дифференциальном режиме, характеризующегося оперативным учетом специальных поправок в реальном времени для повышения точности определения в позиционировании морского подвижного объекта. С геометрической точки зрения учет поправок неизбежно вызовет трансформацию любой навигационной изолинии, как гипотетически интерпретировано на рис. 7.

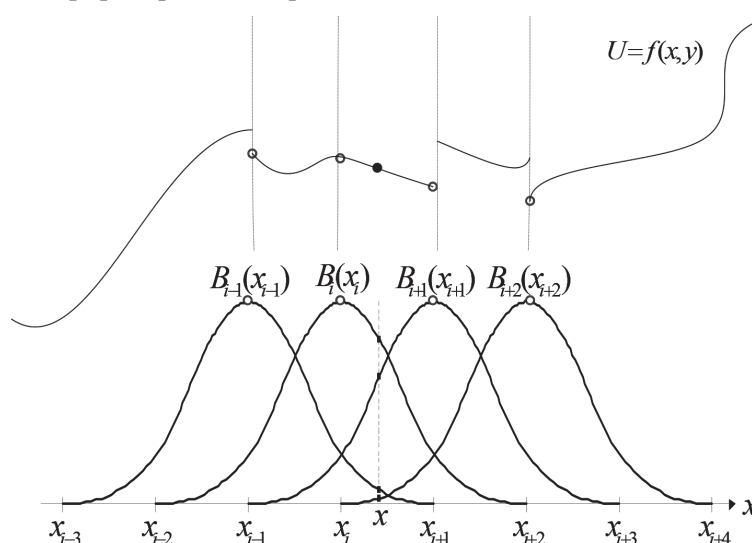


Рис. 7. Гипотетическая геометрическая интерпретация аппроксимации кубическими базисными сплайнами абстрактной искаженной навигационной изолинии

Ввиду сложности оперирования искаженными изолиниями такие атрибуты математических основ судовождения всегда исключались из процесса обработки информации, и задача реализации дифференциального режима решалась сугубо технически, без какой-либо геометрической оценки. Впервые предлагается пересмотреть стереотипное абстрагирование от геометрической интерпретации искаженной изолинии, поскольку методы сплайн-функций позволяют оперировать также с такими сложными алгебраическими объектами, как разрывные изолинии, подобные геометрическому объекту, интерпретированному на рис. 7. Сформируем абстрактную искаженную изолинию, трансформированную из обычной гладкой алгебраической кривой за счет ввода поправок дифференциального режима. Сложность представленной гипотетической изолинии обуславливается наличием вероятного существования трех возможных внутренних точек разрыва в координатах x_{i-1} , x_{i+1} , x_{i+2} . В качестве разрывов допускаются предельные случаи математического искажения изолинии. Во внутренних точках разрыва навигационная функция $U = f(x, y)$ условно не определена.

Фактически с позиций теории приближения функций кусочная функция $S(x)$ имеет два значения в каждой позиции разрывности, а именно: функциональное значение слева определяется левым сплайновым многочленом, значение функции справа — правым многочленом. Для определенности предлагается выбирать в каждой точке разрыва значение справа, т. е. условно считать, что $S(x)$ является непрерывной экстраполированной функцией справа, что дает определенную

однозначность программной реализации сплайнового алгоритма. Для преобразования точки разрыва левый и правый многочлен виртуально «склеиваются» в один правый с организацией унимодальной функции, уменьшающей вариацию. Таким образом, точка разрыва обладает свойством строгого альтернирования в смысле совпадения по значению с правым многочленом при абстрагировании от фактического существования функциональной неопределенности ввиду формального условия «отсутствия узла».

Предположение о принципиальной возможности моделирования разрывной изолинии является особой авторской точкой зрения на перспективу аппроксимации искаженной навигационной изолинии кубическими сплайнами. С математической точки зрения при этом можно по-прежнему условно считать, что функция $U = f(x, y)$ имеет два значения в каждой точке разрыва. Однако при кусочно-многочленной аппроксимации для кубического случая теоретически допускается ситуация разрыва одной производной при так называемом *существовании однократного дефекта сплайна*, что позволяет в данном случае игнорировать факт двойственности функциональных значений.

Как показано на рис. 7, для получения наибольших порядков приближения навигационной функции точки разрыва должны быть включены в число узлов координатной сетки независимым образом в качестве дополнительного условия. Если при восстановлении искаженной изолинии не позаботиться о целесообразности принятия таких специальных математических мер, то для кубического сплайна будет характерным появление флуктуирующих осцилляций. При оптимальном выборе узлов наличие разрыва практически не влияет на стратегическое поведение сплайна в геометрическом понимании процесса аппроксимации.

Предлагаемый подход позволяет считать искаженную изолинию практически идентичной кубическо-многочленной функции с принципиально возможным применением к синтезированию разрывной изолинии в полной мере аппарата сплайн-функций. Благодаря данной точке зрения отпадает стратегическая необходимость применения сложных рутинных математических процедур при анализе определенности кубического аппроксиматора в точке объективно оцениваемого формального разрыва. В соответствии с этим программная реализация разработанных алгоритмов практически не меняется по содержанию, за исключением добавления в цикл паскаль-программы эпизодического логического условия приравнивания в точке разрыва искаженной изолинии по функциональности значения справа. Таким образом, кубическая кусочно-многочленная функция в прикладной программе рассматривается как непрерывная функция справа, что фактически однозначно создает возможность использования в обработке навигационной информации искаженной изолинии как таковой.

Данный подход позволяет при дифференциальном режиме сформировать теоретическое тенденцию оперирования искаженными изолиниями в развитие классического метода изолиний для обработки навигационной информации, а не абстрагироваться от него технической детализацией учета корректировочных поправок.

Обсуждение (Discussion)

При дифференциальном методе выполняется постоянное сравнение эталонных геодезических координат береговой аппаратуры с данными спутниковой навигационной системы. Поправки, полученные в результате сравнения, передаются подвижным потребителям, что позволяет повысить точность определения места судна каждого объекта. Дифференциальный режим имеет особенную эффективность при вынужденном использовании геометрически неоптимальных спутников. С целью высокоточного позиционирования сигналы спутников дополняются корректирующими поправками, передаваемыми передатчиком опорной береговой станции для компенсации погрешности финальной обсервации. В основе дифференциальной навигации используется физический эффект относительного постоянства погрешностей во времени и пространстве.

Дифференциальный режим по своей концептуальности, безусловно, является безупречным способом определения места судна, повышающим точностные характеристики обсервации

на порядок [31]. При использовании дифференциальных методов электронного местоопределения морских транспортных средств точность повышается до 3–10 м в пределах рабочей зоны контрольно-корректирующей станции спутниковой радионавигационной системы [31]. С помощью дифференциальных дополнений глобальной навигационной спутниковой системы на внутренних водных путях Российской Федерации можно осуществлять практически непрерывные высокоточные определения места речного судна с точностью 1–5 м с вероятностью 95 % [32].

В настоящее время ведутся интенсивные исследования по повышению точностных характеристик дифференциального режима GPS на основе различных математических методик. Предложен метод повышения точности определения местоположения с использованием измерений расстояний между спутниками при однозначно неопределенной перспективе практического применения данного подхода, но с зафиксированным фактом, свидетельствующем о том, что дифференциальный GPS (DGPS) показывает лучшую производительность, чем автономный [33]. При локальном дифференциальном местоопределении на основе измерений псевдодальности без использования псевдофазовых измерений в рамках так называемого *альтернативного точного метода позиционирования* — *Precise Point Positioning* (PPP) достигается точность около 0,5 м в режиме реального времени [34].

Уточнение позиции в локальной дифференциальной системе достигается за счет использования морским подвижным потребителем результатов точных измерений псевдодальностей, передаваемых опорной станцией, располагающейся в центре некоторой локальной зоны, размер которой характеризуется протяженностью в пределах 200 км [35]. В центре такой зоны точность абсолютного местоопределения составляет 0,5 м и менее, а к ее границам точность постепенно понижается до точности стандартного спутникового определения места судна. При высокоточном местоопределении (PPP) становится возможным представление координат навигационной аппаратуры потребителя с ошибкой, не превышающей 1–3 см в режиме послесекансной обработки с опозданием в 3–5 мин из-за совместной обработки измерений псевдодальностей, псевдофаз и учета высокоточных корректирующих поправок [35]. Для достижения сантиметровой точности глобальной навигационной спутниковой системы с кодовым разделением каналов применяются алгебраические методы решения определения высокоточных абсолютных координат потребителя на основе разрешения неоднозначности целочисленностей псевдофаз [36]. В пересечении псевдостадиометрических спутниковых изоповерхностей с земной поверхностью образуются исследуемые сложные навигационные изолинии при дальномерном методе определения места судна относительно нескольких одновременно наблюдаемых спутников.

Сложность геометрического вида изолиний определяется в зависимости от фактического выбора математической модели планеты. Прерогатива использования поверхности геоида является наиболее предпочтительной ввиду устранения упрощенного применения приближительной реконструкции гравитационного облика Земли [25]. В ситуации выбора геоида получается наиболее сложная геометрическая форма навигационной изолинии с допускаемыми точками функционального разрыва. В случае применения в современном судовождении сплайновой модели геоида нивелируется различие систем позиционирования, определяемое разными параметрами эллипсоидов, взятых за геодезическую основу при производстве бумажной или электронной морской карты. При этом автоматически возникает унификация деятельности вахтенного помощника ввиду возможности безаварийной работы в одной координатной парадигме навигационного пространства с методическим обеспечением абсолютной точности судовождения.

Существующая до настоящего времени множественность применяемых геодезических систем координат создает очевидные неудобства для мореплавателей при спутниковых наблюдениях. Различия в географических координатах одной и той же точки на земной поверхности, отнесенных к различным геодезическим системам, могут достигать 700 м [37]. Такая величина фактического несоответствия места судна с координатами, нанесенными на морскую карту, имеет серьезное практическое значение с точки зрения обеспечения навигационной безопасности плавания. Для того, чтобы исключить это влияние, необходимо каждый раз согласовать систему координат карты и систему координат радиотехнического средства определения места судна.

Ввиду алгоритмических затруднений обработки информации при традиционном представлении о математической неформализуемости оперирования искаженными изолиниями данный вопрос ранее не рассматривался в научной литературе с геометрической точки зрения, вопреки классическим правилам математических основ судовождения. Выполненное исследование может принципиально изменить сформировавшуюся позицию на основе уточненного геометрического представления интерполяции кубическими базисными сплайнами абстрактной искаженной навигационной изолинии. Изложенная в работе точка зрения позволяет непосредственно использовать сетку искаженных поправками изолиний в графической обработке навигационной информации при широко применяемом в современном судовождении дифференциальном режиме. Исканная изолиния имеет сложную математическую формализацию, поэтому классическим путем решить навигационную задачу при геометрической интерпретации в данном случае невозможно, в отличие от синтеза искаженных изолиний методами сплайн-интерполяции, который не представляет реальной математической проблемы с позиций аппарата кусочных аппроксимаций.

Выводы (Summary)

Проведенное исследование возможности синтеза и компьютерной визуализации геометрически сложных изолиний и изоповерхностей на основе использования методов сплайн-функций позволяет сделать следующие выводы:

1. Разработана концепция использования искаженной изолинии в процессе обработки навигационной информации при широко используемом в современной спутниковой навигации дифференциальном режиме.
2. Обоснована оптимальность и эффективность применения кубических сплайнов для восстановления сложных изолиний при сравнительной оценке с альтернативными интерполянтами в качестве линейных, параболических и нерациональных сплайнов.
3. Проанализированы такие важные аспекты теории приближения функций, как свойство локальности и экстремальное свойство сплайнов. Даны рекомендации по практическому использованию рассматриваемых теоретических постулатов.
4. Представлена геометрическая интерпретация искаженной навигационной изолинии, формируемой при использовании поправок дифференциального режима ГЛОНАСС/GPS.
5. Выполнен обзор оценки точности современных возможностей дифференциального режима спутниковой навигации как альтернативы точного позиционирования положения.
6. Благодаря математически обоснованной устойчивости предложенных сплайновых алгоритмов исключено влияние человеческого фактора в автоматизированном генерировании навигационных изолиний и изоповерхностей за счет минимизации влияния неформализуемой исследовательской интуиции.
7. Разработано программное обеспечение высокого быстродействия для «гладкого» приближения разрывной навигационной изолинии или изоповерхности, сформированной из искаженных изолиний на основе методов кубической кусочной аппроксимации в интерактивной среде программирования «Турбо Паскаль» с возможностью компьютерной визуализации геометрических образов.
8. Сопоставимый результат в современных научных публикациях отсутствует.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Kvasov B. Weighted cubic and biharmonic splines / B. Kvasov, T. W. Kim // Computational Mathematics and Mathematical Physics. — 2017. — Vol. 57. — Is. 1. — Pp. 26–44. DOI: 10.1134/S0965542517010109.
2. Taheri A.H. Adaptive w-refinement: A new paradigm in isogeometric analysis / A.H. Taheri, K. Suresh // Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering. — 2020. — Vol. 368. — Pp. 113180. DOI: 10.1016/j.cma.2020.113180.
3. Taheri A. H. Generalizations of non-uniform rational B-splines via decoupling of the weights: theory, software and applications / A. H. Taheri, S. Abolghasemi, K. Suresh // Engineering with Computers. — 2020. — Vol. 36. — Pp. 1831–1848. DOI: 10.1007/s00366-019-00799-w.

4. Han X. Bicubic B-spline surface constrained by the Biharmonic PDE / X. Han, J. Han // *Applied Mathematics and Computation*. — 2019. — Vol. 361. — Pp. 766–776. DOI: 10.1016/j.amc.2019.06.025.
5. Ююкин И. В. Модификация метода наименьших квадратов для сплайн-аппроксимации навигационной изоповерхности / И. В. Ююкин // *Вестник Государственного университета морского и речного флота имени адмирала С. О. Макарова*. — 2019. — Т. 11. — № 4. — С. 631–639. DOI: 10.21821/2309-5180-2019-11-4-631-639.
6. Chaudhuri A. B-Splines / A. Chaudhuri // *Encyclopedia of Computer Graphics and Games*. — Springer, Cham, 2019. — Pp. 1–11. DOI: 10.1007/978-3-319-08234-9_359-1.
7. Ююкин И. В. Интерполяция навигационной функции сплайном лагранжева типа / И. В. Ююкин // *Вестник Государственного университета морского и речного флота имени адмирала С. О. Макарова*. — 2020. — Т. 12. — № 1. — С. 57–70. DOI: 10.21821/2309-5180-2020-12-1-57-70.
8. Volkov Yu. S. Fifty years to Schoenberg's problem on the convergence of spline interpolation / Yu. S. Volkov, Yu. N. Subbotin // *Proceedings of the Steklov Institute of Mathematics*. — 2015. — Vol. 288. — Is. 1. — Pp. 222–237. DOI: 10.1134/S0081543815020236.
9. Волков Ю. С. О погрешности приближения простейшей локальной аппроксимацией сплайнами / Ю. С. Волков, В. В. Богданов // *Сибирский математический журнал*. — 2020. — Т. 61. — № 5. — С. 1000–1008. DOI: 10.33048/smzh.2020.61.503.
10. Ююкин И. В. Сплайн-интерполяция навигационных изолиний / И. В. Ююкин // *Вестник Государственного университета морского и речного флота имени адмирала С. О. Макарова*. — 2019. — Т. 11. — № 6. — С. 1026–1036. DOI: 10.21821/2309-5180-2019-11-6-1026-1036.
11. Дерябин В. В. Алгоритмизация счисления пути судна на основе нейросетевых технологий: автореф. дисс. ... д-ра техн. наук / В. В. Дерябин. — СПб., 2019. — 43 с.
12. Ююкин И. В. Применение метода сплайн-функций при компьютерной визуализации подводного рельефа / И. В. Ююкин // *Вестник Государственного университета морского и речного флота имени адмирала С. О. Макарова*. — 2021. — Т. 13. — № 1. — С. 64–79. DOI: 10.21821/2309-5180-2021-13-1-64-79.
13. Makarov A. A. On Two Algorithms of Wavelet Decomposition for Spaces of Linear Splines / A. A. Makarov // *Journal of Mathematical Sciences*. — 2018. — Vol. 232. — Is. 6. — Pp. 926–937. DOI: 10.1007/s10958-018-3920-z.
14. Kvasov B. I. Parabolic B-splines in interpolation problems / B. I. Kvasov // *USSR Computational Mathematics and Mathematical Physics*. — 1983. — Vol. 23. — Is. 2. — Pp. 13–19. DOI: 10.1016/S0041-5553(83)80041-X.
15. Богданов В. В. Об условиях формосохранения при интерполяции параболическими сплайнами по Субботину / В. В. Богданов, Ю. С. Волков // *Труды Института математики и механики УрО РАН*. — 2016. — Т. 22. — № 4. — С. 102–113. DOI: 10.21538/0134-4889-2016-22-4-102-113.
16. Ююкин И. В. Навигационное использование e-Logan в модификации с методом сплайн-функций / И. В. Ююкин // *Вестник Государственного университета морского и речного флота имени адмирала С. О. Макарова*. — 2020. — Т. 12. — № 4. — С. 703–715. DOI: 10.21821/2309-5180-2020-12-4-703-715.
17. Volkov Yu. S. Shape-preserving interpolation by cubic splines / Yu. S. Volkov, V. V. Bogdanov, V. L. Miroshnichenko, V. T. Shevaldin // *Mathematical Notes*. — 2010. — Vol. 88. — Is. 6. — Pp. 798–805. DOI: 10.1134/S0001434610110209.
18. Волков Ю. С. Сплайны как инструмент геометрического моделирования (к 80-летию со дня рождения Ю. С. Завьялова) / Ю. С. Волков, В. Л. Мирошникенко, С. И. Фадеев // *Сибирские электронные математические известия*. — 2011. — Т. 8. — С. А.11–А.16.
19. Volkov Yu. S. Convergence of Quartic Interpolating Splines / Yu. S. Volkov // *Proceedings of the Steklov Institute of Mathematics*. — 2020. — Vol. 308. — Pp. 196–202. DOI: 10.1134/S0081543820020169.
20. Lukomskii S. F. On Binary B-splines of Second Order / S. F. Lukomskii, M. D. Mushko // *Izvestiya of Saratov University. New series. Series: Mathematics. Mechanics. Informatics*. — 2018. — Vol. 18. — Is. 2. — Pp. 172–182. — DOI: 10.18500/1816-9791-2018-18-2-172-182.
21. Schoenberg, I. J. Contribution to the Problem of Approximation of Equidistant Data by Analytic Functions / I. J. Schoenberg // *Quarterly of Applied Mathematics*. — 1946. — Vol. 4. — № 1. — Pp. 45–99. DOI: 10.1090/qam/15914.
22. Ююкин И. В. Оптимизация моделирования навигационной изоповерхности методами базисных финитных сплайнов / И. В. Ююкин // *Вестник Государственного университета морского и речного флота имени адмирала С. О. Макарова*. — 2019. — Т. 11. — № 2. — С. 266–274. DOI: 10.21821/2309-5180-2019-11-2-266-274.

23. Wand M. P. On semiparametric regression with O'Sullivan penalized splines / M. P. Wand, J. T. Ormerod // Australian & New Zealand Journal of Statistics. — 2008. — Vol. 50. — Is. 2. — Pp. 179–198. DOI: 10.1111/j.1467-842X.2008.00507.x.
24. Valentin J. Gradient-Based Two-Scale Topology Optimization With B-Splines on Sparse Grids / J. Valentin, D. Hübner, M. Stingl, D. Pflüger // SIAM Journal on Scientific Computing. — 2020. — Vol. 42. — Is. 4. — Pp. B1092–B1114. DOI: 10.1137/19M128822X.
25. Ююкин И. В. Аппроксимация геоида методами сплайн-функций / И. В. Ююкин // Вестник Государственного университета морского и речного флота имени адмирала С. О. Макарова. — 2020. — Т. 12. — № 2. — С. 262–271. DOI: 10.21821/2309-5180-2020-12-2-262-271.
26. Ююкин И. В. Поиск ошибок в базе навигационных данных методом визуализации сплайновой изоповерхности / И. В. Ююкин // Вестник Государственного университета морского и речного флота имени адмирала С. О. Макарова. — 2020. — Т. 12. — № 3. — С. 481–491. DOI: 10.21821/2309-5180-2020-12-3-481-491.
27. Chaudhuri A. Shape Deformation Models / A. Chaudhuri // Encyclopedia of Computer Graphics and Games. — Springer, Cham, 2019. — Pp. 1–10. DOI: 10.1007/978-3-319-08234-9_358-1.
28. Bogdanov V. V. Shape-Preservation Conditions for Cubic Spline Interpolation / V. V. Bogdanov, Yu. S. Volkov // Siberian Advances in Mathematics. — 2019. — Vol. 29. — Is. 4. — Pp. 231–262. DOI: 10.3103/S1055134419040011.
29. Ратнер Е. А. Сплайн-интерполяция для построения трехмерных батиметрических моделей при картографировании внутренних водных путей / Е. А. Ратнер, А. И. Зайцев, М. А. Квасной // Вестник Государственного университета морского и речного флота имени адмирала С. О. Макарова. — 2020. — Т. 12. — № 5. — С. 894–905. DOI: 10.21821/2309-5180-2020-12-5-894-905.
30. Wu Y. Generating bicubic B-spline surface by a sixth order PDE / Y. Wu, C.-G. Zhu // AIMS Mathematics. — 2021. — Vol. 6. — Is. 2. — Pp. 1677–1694. DOI: 10.3934/math.2021099.
31. Песков Ю. А. Морская навигация с ГЛОНАСС/GPS / Ю. А. Песков. — М.: Моркнига, 2010. — 148 с.
32. Каретников В. В. Использование речной дифференциальной подсистемы ГЛОНАСС/GPS на внутренних водных путях Российской Федерации при проведении путевых работ / В. В. Каретников, Р. В. Волков, Г. В. Киселевич // Вестник Государственного университета морского и речного флота имени адмирала С. О. Макарова. — 2015. — № 3 (31). — С. 63–68. DOI: 10.21821/2309-5180-2015-7-3-63-68.
33. Jang J. Improvement of Differential GPS Performance Using Range Measurements Between Satellites / J. Jang, S. Sung, Y. J. Lee // International journal of Aeronautical and Space Sciences. — 2020. — Vol. 21. — Is. 1. — Pp. 201–209. DOI: 10.1007/s42405-019-00198-x.
34. Подкорытов А. Н. Высокоточное местоопределение в глобальных навигационных спутниковых системах в абсолютном режиме за счет разрешения неоднозначности псевдофазовых измерений: дис. ... канд. техн. наук / А. Н. Подкорытов. — М., 2014. — 195 с.
35. Podkorytov A. The influence of network structure on quality of satellite corrections for precise point positioning in GNSS / A. Podkorytov // IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. — IOP Publishing, 2020. — Vol. 868. — Is. 1. — Pp. 012031. DOI: 10.1088/1757-899X/868/1/012031.
36. Поваляев А. А. Алгебраические основы обработки измерений при высокоточном абсолютном местоопределении по сигналам ГНСС с кодовым разделением каналов / А. А. Поваляев, А. Н. Подкорытов, С. А. Никитин, Д. В. Филимонова // Ракетно-космическое приборостроение и информационные системы. — 2019. — Т. 6. — № 1. — С. 4–16. DOI: 10.30894/issn2409-0239.2019.6.1.4.16.
37. Каврайский А. В. О связи систем координат, используемых в морской картографии и навигации / А. В. Каврайский // Навигация и гидрография. — 1995. — № 1. — С. 21–25.

REFERENCES

1. Kvasov, Boris, and Tae-Wan Kim. “Weighted cubic and biharmonic splines.” *Computational Mathematics and Mathematical Physics* 57.1 (2017): 26–44. DOI: 10.1134/S0965542517010109.
2. Taheri, Alizera H., and Suresh Krishnan. “Adaptive w-refinement: A new paradigm in isogeometric analysis.” *Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering* 368 (2020): 113180. DOI: 10.1016/j.cma.2020.113180.
3. Taheri, Alizera H., Saeed Abolghasemi, and Suresh Krishnan. “Generalizations of non-uniform rational B-splines via decoupling of the weights: theory, software and applications.” *Engineering with Computers* 36 (2020): 1831–1848. DOI: 10.1007/s00366-019-00799-w.

4. Han, Xuli, and Jing Han. "Bicubic B-spline surface constrained by the Biharmonic PDE." *Applied Mathematics and Computation* 361 (2019): 766–776. DOI: 10.1016/j.amc.2019.06.025.
5. Yuyukin, Igor V. "Modification of the least squares method for spline approximation of navigational isosurface." *Vestnik Gosudarstvennogo universiteta morskogo i rechnogo flota imeni admirala S. O. Makarova* 11.4 (2019): 631–639. DOI: 10.21821/2309-5180-2019-11-4-631-639.
6. Chaudhuri, Arindam. "B-Splines." *Encyclopedia of Computer Graphics and Games*. Springer, Cham, 2019. 1–11. DOI: 10.1007/978-3-319-08234-9_359-1.
7. Yuyukin, Igor V. "Interpolation of navigational function by lagrange type spline." *Vestnik Gosudarstvennogo universiteta morskogo i rechnogo flota imeni admirala S. O. Makarova* 12.1 (2020): 57–70. DOI: 10.21821/2309-5180-2020-12-1-57-70.
8. Volkov, Yu S., and Yu N. Subbotin. "Fifty years to Schoenberg's problem on the convergence of spline interpolation." *Proceedings of the Steklov Institute of Mathematics* 288.1 (2015): 222–237. DOI: 10.1134/S0081543815020236.
9. Volkov, Yu. S., and V. V. Bogdanov. "On error estimates of local approximation by splines." *Siberian Mathematical Journal* 61.5 (2020): 1000–1008. DOI: 10.33048/smzh.2020.61.503.
10. Yuyukin, Igor V. "Spline interpolation of navigational isolines." *Vestnik Gosudarstvennogo universiteta morskogo i rechnogo flota imeni admirala S. O. Makarova* 11.6 (2019): 1026–1036. DOI: 10.21821/2309-5180-2019-11-6-1026-1036.
11. Deryabin, Victor V. *Algoritimizatsiya schisleniya puti sudna na osnove metodov neyrosetevykh tehnologii*. Abstract of Dr. Diss. SPb, 2019.
12. Yuyukin, Igor V. "Application of the spline-functions method in computer visualization of underwater relief." *Vestnik Gosudarstvennogo universiteta morskogo i rechnogo flota imeni admirala S. O. Makarova* 13.1 (2021): 64–79. DOI: 10.21821/2309-5180-2021-13-1-64-79.
13. Makarov, Anton A. "On Two Algorithms of Wavelet Decomposition for Spaces of Linear Splines." *Journal of Mathematical Sciences* 232.6 (2018): 926–937. DOI: 10.1007/s10958-018-3920-z.
14. Kvasov, Boris I. "Parabolic B-splines in interpolation problems." *USSR Computational Mathematics and Mathematical Physics* 23.2 (1983): 13–19. DOI: 10.1016/S0041-5553(83)80041-X.
15. Bogdanov, V. V., and Yu. S. Volkov. "Shape preservation conditions under interpolation by Subbotin's parabolic splines." *Proceedings of Krasovskii Institute of Mathematics and Mechanics UB RAS* 22.4 (2016): 102–113. DOI: 10.21538/0134-4889-2016-22-4-102-113.
16. Yuyukin, Igor V. "Navigational use of e-Loran in modification with spline functions method." *Vestnik Gosudarstvennogo universiteta morskogo i rechnogo flota imeni admirala S. O. Makarova* 12.4 (2020): 703–715. DOI: 10.21821/2309-5180-2020-12-4-703-715.
17. Volkov, Yu. S., V. V. Bogdanov, V. L. Miroshnichenko, and V. T. Shevaldin. "Shape-preserving interpolation by cubic splines." *Mathematical Notes* 88.6 (2010): 798–805. DOI: 10.1134/S0001434610110209.
18. Volkov, Yu. S., V. L. Miroshnichenko, and S. I. Fadeev. "Splines as a geometric modeling tool (to the 80 anniversary of the birth of Yu. S. Zav'yalov)." *Siberian Electronic Mathematical Reports* 8 (2011): A11–A16.
19. Volkov, Yu. S. "Convergence of Quartic Interpolating Splines." *Proceedings of the Steklov Institute of Mathematics* 308 (2020): 196–202. DOI: 10.1134/S0081543820020169.
20. Lukomskii, Sergey Feodorovich, and Maxim Dmitrievich Mushko. "On Binary B-splines of Second Order." *Izvestiya of Saratov University. New series. Series: Mathematics. Mechanics. Informatics* 18.2 (2018): 172–182. DOI: 10.18500/1816-9791-2018-18-2-172-182.
21. Schoenberg, Isaac Jacob. "Contribution to the Problem of Approximation of Equidistant Data by Analytic Functions." *Quarterly of Applied Mathematics* 4.1 (1946): 45–99. DOI: 10.1090/qam/15914.
22. Yuyukin, Igor V. "Optimization of navigational isosurface simulation by the methods of basic finite splines." *Vestnik Gosudarstvennogo universiteta morskogo i rechnogo flota imeni admirala S. O. Makarova* 11.2 (2019): 266–274. DOI: 10.21821/2309-5180-2019-11-2-266-274.
23. Wand, Matt P., and John T. Ormerod. "On semiparametric regression with O'Sullivan penalized splines." *Australian & New Zealand Journal of Statistics* 50.2 (2008): 179–198. DOI: 10.1111/j.1467-842X.2008.00507.x.
24. Valentin, Julian, Daniel Hübner, Michael Stingl, and Dirk Pflüger. "Gradient-Based Two-Scale Topology Optimization With B-Splines on Sparse Grids." *SIAM Journal on Scientific Computing* 42.4 (2020): B1092–B1114. DOI: 10.1137/19M128822X.

25. Yuyukin, Igor V. "Geoid approximation by spline functions methods." *Vestnik Gosudarstvennogo universiteta morskogo i rechnogo flota imeni admirala S. O. Makarova* 12.2 (2020): 262–271. DOI: 10.21821/2309-5180-2020-12-2-262-271.
26. Yuyukin, Igor V. "Search for errors in the base of navigation data by the method of spline isosurface visualization." *Vestnik Gosudarstvennogo universiteta morskogo i rechnogo flota imeni admirala S. O. Makarova* 12.3 (2020): 481–491. DOI: 10.21821/2309-5180-2020-12-3-481-491.
27. Chaudhuri, Arindam. "Shape Deformation Models." *Encyclopedia of Computer Graphics and Games*. Springer, Cham, 2019: 1–10. DOI: 10.1007/978-3-319-08234-9_358-1.
28. Bogdanov, Vladimir V., and Yuriy S. Volkov. "Shape-Preservation Conditions for Cubic Spline Interpolation." *Siberian Advances in Mathematics* 29.4 (2019): 231–262. DOI: 10.3103/S1055134419040011.
29. Ratner, Elizaveta A., Aleksei I. Zaitsev, and Maksim A. Kvasnoy. "Spline interpolation for building three-dimensional bathymetric models at charting inland waterways." *Vestnik Gosudarstvennogo universiteta morskogo i rechnogo flota imeni admirala S. O. Makarova* 12.5 (2020): 894–905. DOI: 10.21821/2309-5180-2020-12-5-894-905.
30. Wu, Yan, and Chun-Gang Zhu. "Generating bicubic B-spline surface by a sixth order PDE." *AIMS Mathematics* 6.4 (2021): 1677–1694. DOI: 10.3934/math.2021099.
31. Peskov, Yuriy A. *Morskaya navigatsiya s GLONASS/GPS*. M.: Morkniga, 2010.
32. Karetnikov, Vladimir V., Roman V. Volkov, and Gennadiy V. Kiselevich. "To the question of use river differential subsystem GLONASS/GPS on the inland Russian waterways at carrying out of track works." *Vestnik Gosudarstvennogo universiteta morskogo i rechnogo flota imeni admirala S. O. Makarova* 3(31) (2015): 63–68. DOI: 10.21821/2309-5180-2015-7-3-63-68.
33. Jang, JinHyeok, Sangkyung Sung, and Young Jae Lee. "Improvement of Differential GPS Performance Using Range Measurements Between Satellites." *International Journal of Aeronautical and Space Sciences* 21.1 (2020): 201–209. DOI: 10.1007/s42405-019-00198-x.
34. Podkorytov, A. N. *Vysokotochnoe mestoopredelenie v global'nykh navigatsionnykh sputnikovyykh sistemakh v absolyutnom rezhime za schet razresheniya neodnoznachnosti psevdofazovykh izmerenii*. PhD Diss. M., 2014.
35. Podkorytov, Andrey. "The influence of network structure on quality of satellite corrections for precise point positioning in GNSS." *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*. Vol. 868. No. 1. IOP Publishing, 2020. DOI: 10.1088/1757-899X/868/1/012031.
36. Povalyaev, Alexander A., Andrey N. Podkorytov, S. A. Nikitin, and D. V. Filimonova. "Algebraic Fundamentals to Process Measurements at High-Precision Absolute Positioning based on GNSS Signals with Code Division of Channels." *Rocket-space device engineering and information systems* 6.1 (2019): 4–16. DOI: 10.30894/issn2409–0239.2019.6.1.4.16.
37. Kavraiskii, A.V. "O svyazi sistem koordinat, ispol'zuemykh v morskoi kartografii i navigatsii." *Navigatsiya i gidrografiya* 1 (1995): 21–25.

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРЕ

Ююкин Игорь Викторович —
кандидат технических наук, доцент
ФГБОУ ВО «ГУМРФ имени адмирала
С. О. Макарова»
198035, Российская Федерация, г. Санкт-Петербург,
ул. Двинская, 5/7
e-mail: enigma_777@mail.ru, kaf_nav@gumrf.ru

INFORMATION ABOUT THE AUTHOR

Yuyukin, Igor V. —
PhD, associate professor
Admiral Makarov State University of Maritime
and Inland Shipping
5/7 Dvinskaya Str., St. Petersburg, 198035,
Russian Federation
e-mail: enigma_777@mail.ru, kaf_nav@gumrf.ru

Статья поступила в редакцию 3 марта 2021 г.
Received: March 3 2021.

DOI: 10.21821/2309-5180-2021-13-3-359-371

EVALUATING THE METACENTRIC HEIGHT OF CONTAINER SHIP INFLUENCE ON GENERATION OF CONDITIONS CONTRIBUTING TO THE OCCURRENCE OF PARAMETRIC ROLLING RESONANCE

R. S. Tsarik

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

The influence of the container ship metacentric height on forming of conditions contributing to the occurrence of parametric rolling resonance is considered. It is noted that in the theory of ship rolling and existing methods of forecasting and taking into account parametric rolling resonance of container ships, the influence of the actual height of the centers of gravity of containers on the metacentric height, and, accordingly, on the parameters of ship rolling, is not considered. In the actual conditions of the ship operation, the rolling parameters are determined in fact, using a stopwatch and eye-measuring. The increase in accidents with the loss of containers overboard, gives every reason to consider that already at the planning stage of the ship voyage, it is critically important to know its actual metacentric height and how it will affect the rolling parameters in the expected hydrometeorological conditions. The purpose of this study is a comparative evaluation of the influence of the metacentric height of a container ship on the forming of conditions that contribute to the occurrence of a parametric rolling resonance. For this purpose, two specific conditions for the occurrence of parametric rolling, in accordance with the provisions of the circular letter of the International Maritime Organization, aimed at ensuring the safety of ships navigation in adverse weather and sea conditions are considered in the paper. The change in the actual metacentric height of the container ship is estimated taking into account the possible values of the actual height of the centers of gravity of the containers. As a result, it is confirmed that the change in the metacentric height of the container ship affects the conditions for the occurrence of parametric rolling. This is expressed in changing in the period of rolling, which depends on the metacentric height, and the period of the waves encounter, which depends, among other things, on the course and speed of the ship. It is concluded that it is necessary to take into account the actual metacentric height of the container to assess the safety of navigation in the expected hydrometeorological conditions of the voyage. It is shown how the combined change in the metacentric height, ship course and speed affects the occurrence of parametric rolling of the container ship.

Keywords: container ship, container, center of gravity, stability, metacentric height, parametric resonance, rolling.

For citation:

Tsarik, Ruslan Stanislavovich. "Evaluating the metacentric height of container ship influence on generation of conditions contributing to the occurrence of parametric rolling resonance." *Vestnik Gosudarstvennogo universiteta morskogo i rechnogo flota imeni admirala S. O. Makarova* 13.3 (2021): 359–371. DOI: 10.21821/2309-5180-2021-13-3-359-371.

УДК 656.61.052

ОЦЕНКА ВЛИЯНИЯ МЕТАЦЕНТРИЧЕСКОЙ ВЫСОТЫ КОНТЕЙНЕРОВОЗА НА ФОРМИРОВАНИЕ УСЛОВИЙ, СПОСОБСТВУЮЩИХ ВОЗНИКНОВЕНИЮ ПАРАМЕТРИЧЕСКОЙ БОРТОВОЙ КАЧКИ

Р. С. Царик

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

Рассмотрено влияние метацентрической высоты контейнеровоза на формирование условий, способствующих возникновению параметрического резонанса по бортовой качке. Отмечается, что в теории качки судна и существующих методах прогнозирования и учета параметрического резонанса контейнеровозов не рассматривается влияние фактической аппликаты центров тяжести контейнеров на метацентрическую высоту, а, соответственно, и на параметры качки судна. В реальных условиях плавания судна

параметры качки определяются фактически, с использованием секундомера, и глазомерно. Рост аварийности с потерей контейнеров за борт позволяет считать, что уже на стадии планирования рейса судна критически важно знать его фактическую метацентрическую высоту и то, какое влияние она будет оказывать на параметры качки в ожидаемых гидрометеорологических условиях. Целью данного исследования является сравнительная оценка влияния метацентрической высоты контейнеровоза на формирование условий, способствующих возникновению параметрического резонанса по бортовой качке. Для этого в работе рассмотрены два характерных условия возникновения параметрической бортовой качки в соответствии с положениями циркулярного письма Международной морской организации, направленного на обеспечение безопасности плавания судов в неблагоприятных погодных условиях и состоянии моря. Изменение фактической метацентрической высоты контейнеровоза оценивалось с учетом возможных значений фактической аппликаты центров тяжести контейнеров. В результате было подтверждено, что изменение метацентрической высоты контейнеровоза оказывает влияние на условия возникновения параметрической бортовой качки. Это выражается в изменении периода бортовой качки, зависящего от метацентрической высоты, и периода набегания волн на судно, зависящего в том числе от курса и скорости судна. Сделан вывод о том, что необходимо учитывать фактическую метацентрическую высоту контейнеровоза для оценки безопасности плавания в ожидаемых гидрометеорологических условиях рейса. Показано, как совокупное изменение метацентрической высоты, курса и скорости судна влияет на возникновение параметрической бортовой качки контейнеровоза.

Ключевые слова: контейнеровоз, контейнер, центр тяжести, остойчивость, метацентрическая высота, параметрический резонанс, бортовая качка.

Для цитирования:

Царик Р. С. Оценка влияния метацентрической высоты контейнеровоза на формирование условий, способствующих возникновению параметрической бортовой качки / Р. С. Царик // Вестник Государственного университета морского и речного флота имени адмирала С. О. Макарова. — 2021. — Т. 13. — № 3. — С. 359–371. DOI: 10.21821/2309-5180-2021-13-3-359-371.

Введение (Introduction)

Поперечно симметричное судно, двигаясь на идеальном встречном или попутном волнении с большой длиной волны, будет испытывать килевую качку, подъем и скольжение на волне, не испытывая при этом в большинстве случаев бортовой качки. Однако даже в таких условиях при определенной частоте набегания волн может возникнуть также бортовая качка, которая начавшись, может вырасти до большой амплитуды, ограниченной демпфированием крена, и в экстремальных условиях подвергнуть судно, груз и экипаж большой опасности. В теории колебаний это явление называется *параметрически возбужденными колебаниями*, или упрощенно — *параметрическими колебаниями*. Применительно к судовождению данное явление называется *параметрической качкой*, или *параметрическим резонансом*. Термин описывает состояние движения, возникающего не в результате прямого воздействия изменяющейся во времени внешней силы или момента, а в результате периодического изменения определенных внутренних параметров колебательной системы.

Параметрическая бортовая качка представляет собой очень серьезную опасность для судна. Вероятность переворачивания крупнотоннажного контейнеровоза очень мала, однако потеря палубных контейнеров и повреждение конструкций судна являются вполне типичным результатом параметрического резонанса. В таких условиях значительно ухудшается обитаемость судна, самочувствие членов экипажа и способность ими исполнять свои служебные обязанности, в том числе обеспечивать безопасность.

Впервые на параметрический резонанс начали обращать пристальное внимание в 1950-х гг., во время расследования аварий с небольшими, в основном рыболовными судами, акцентируя внимание на опасности плавания на попутном волнении и недостаточной остойчивости. Первоначально считалось, что именно небольшие суда с недостаточной остойчивостью могут подвергнуться параметрическому резонансу. Однако с развитием трансокеанских контейнерных перевозок и ростом контейнеровместимости судов начали отмечать возникновение параметрического резонанса также и у крупнотоннажных контейнеровозов. Так, в октябре 1998 г. контейнеровоз APL China попал в штормовые условия в Тихом океане, испытав параметрическую бортовую качку. В результате

более 60 % контейнеров были потеряны за борт или получили повреждения. Этот случай явился одним из первых официально признанных примеров параметрического резонанса с крупнотоннажным контейнеровозом. В январе 2003 г. контейнеровоз *Maersk Carolina*, следуя в штормовых условиях в Атлантическом океане, испытал крен до 47° . Чрезвычайно интенсивная бортовая качка продолжалась в течение нескольких минут. В результате 133 контейнера были потеряны и более 50 — повреждены. Иски за потерю груза превысили 4 млн долл. В течение первых двух месяцев 2021 г. произошло четыре серьезные аварии в штормовых условиях с потерей контейнеров за борт, общее количество которых составило более 1100 единиц.

Проблеме параметрического резонанса посвящено большое количество работ как иностранных, так и отечественных исследователей. Некоторые из них рассматривают этот вопрос безотносительно к типам судов, другие — фокусируют внимание именно на контейнеровозах как на одном из наиболее подверженных параметрическому резонансу типов судов. В работе [1] автором выполнено исследование теоретических методов и их численных решений для прогнозирования параметрической качки судна. Проведенные эксперименты включали встречное и попутное волнение для двух состояний загрузки. Был сделан вывод о том, что явление параметрического резонанса неоднозначно для регулярного и нерегулярного волнения.

Эксперименты, направленные на изучение связи между значениями метацентрической высоты и углами крена судна на волнении, выполнены авторами в работе [2]. В результате установлено, что снижение скорости судна относительно неблагоприятного значения всегда приводит к уменьшению бортовой качки. Увеличение скорости судна не дает такого однозначного результата и при этом отмечается, что на параметры бортовой качки большее влияние оказывает ускорение судна, чем непосредственно увеличенная скорость.

В работе [3] автором выполнено исследование влияния различных параметров на возникновение и интенсивность параметрического резонанса, а также предложена концепция судовой системы оперативного выявления условий, при которых судно может подвергнуться параметрической бортовой качке. Несмотря на то, что эксперименты проводились с использованием моделей рыболовных траулеров, автором сделано заключение о том, что полученные результаты могут быть применены и к другим типам судов, в частности, к контейнеровозам.

Условия возникновения параметрического резонанса у крупнотоннажных контейнеровозов при встречном волнении были исследованы группой ученых в работе [4]. В результате было подтверждено, что параметрическая качка вызывает значительные дополнительные нагрузки на палубные контейнерные штабели, которые могут превышать значения, установленные правилами соответствующих классификационных обществ.

Способ использования диаграммы Ю. В. Ремеза для отображения возможности возникновения параметрического резонанса при определенных курсовых углах волн и заданной скорости движения судна предложен отечественными авторами в работе [5]. Проведенные эксперименты подтвердили, что для возникновения параметрического резонанса не обязательно следование судна в штормовых условиях. Авторы данного исследования пришли к выводу о том, что использование диаграммы является целесообразным для определения опасных зон параметрического резонанса по бортовой качке и может повысить безопасность при плавании судна в шторм.

Интересным представляется исследование, выполненное отечественными учеными в работе [6]. Авторами была предложена расчетная программа на основе диаграмм Ю. В. Ремеза и А. И. Богданова, выполненная в программе Excel, позволяющая определять зоны резонанса бортовой, килевой и вертикальной качки, а также параметрического резонанса. Программа применима для условий глубокой и мелкой воды и учитывает индивидуальные характеристики судна.

В работе [7] отечественными учеными было исследовано возникновение параметрической бортовой качки с учетом влияния вертикальных колебаний судна. Авторами приведены результаты расчетов амплитудно-частотных характеристик параметрической бортовой качки для танкера и контейнеровоза при разных вариантах загрузки. В результате был сделан вывод о значительном влиянии аппликаты центра тяжести судна на резонансные амплитуды параметрической качки.

Каждое из приведенных ранее исследований подтверждает тот факт, что параметрическая бортовая качка представляет собой серьезную опасность для судна. При этом авторы предлагают различные подходы для определения условий возникновения параметрического резонанса, однако применительно к контейнеровозам вопрос учета фактической метацентрической высоты, зависящей от аппликаты центра тяжести контейнеров, не рассматривается.

Целью настоящего исследования является оценка влияния метацентрической высоты контейнеровоза, зависящей от аппликаты центра тяжести контейнера, на формирование условий, способствующих возникновению параметрического резонанса по бортовой качке.

Методы и материалы (Methods and Materials)

Возникновение бортовой качки при плавании судна лагом к волне очевидно. Для судна, следующего на попутном или встречном волнении, колебание морской поверхности, сопровождающееся килевой и вертикальной качкой, приводит к изменению во времени геометрии подводной части корпуса, что, в свою очередь, обуславливает изменение во времени метацентрической высоты (МЦВ), т. е. способности судна противостоять внешним силам, пытающимся вывести его из состояния равновесия (накрентить). Пример изменения плеч восстанавливающего момента и МЦВ в виде диаграмм статической остойчивости (ДСО) в зависимости от положения судна на волне показан на рис. 1.

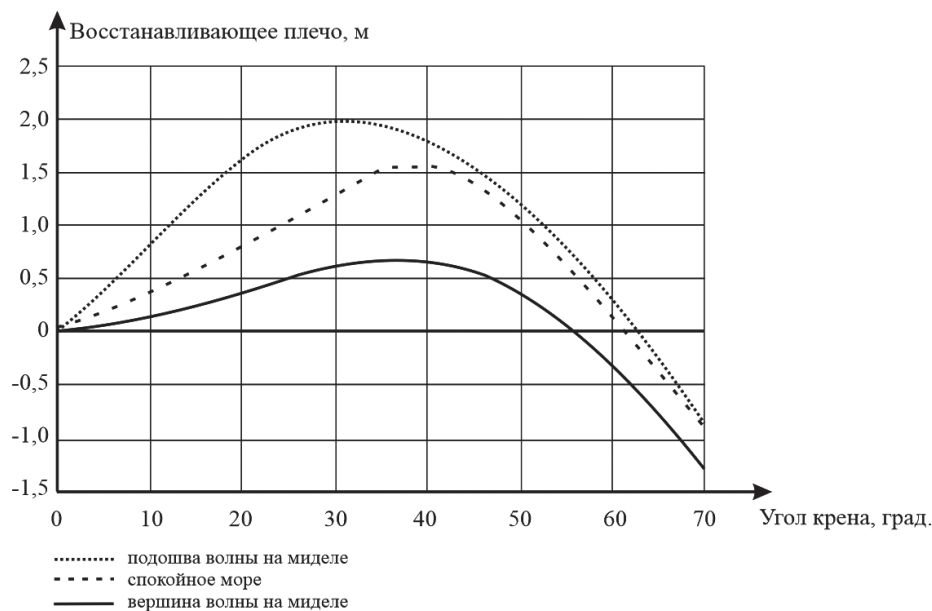


Рис. 1. Диаграммы статической остойчивости крупнотоннажного контейнеровоза при разном положении судна на волне

Графически причина такого изменения остойчивости от положения судна относительно профиля волны показана на рис. 2. Когда носовая и кормовая части судна находятся на гребнях последовательных волн, а средняя часть корпуса (мидель) — на подошве между ними, плоскость ватерлинии в среднем шире, чем при спокойной поверхности моря из-за расширяющейся формы корпуса в этих секциях, что приводит к увеличению МЦВ и восстанавливающих моментов. Когда гребень находится на миделе судна, средняя ширина плоскости ватерлинии, а, следовательно, МЦВ и восстанавливающие моменты, как правило, меньше, из-за сужения ватерлинии в носовой и кормовой частях судна, чем при спокойной поверхности моря.

В данной работе рассматривается плавание судна на регулярном волнении, без дополнительных динамических воздействий в виде ударов волн в корпус судна и шквалистых порывов ветра. Для оценки условий возникновения параметрической бортовой качки необходимо учитывать следующие факторы: размерные характеристики и скорость судна, МЦВ, длину и период волны, а также угол набегания волны на судно.

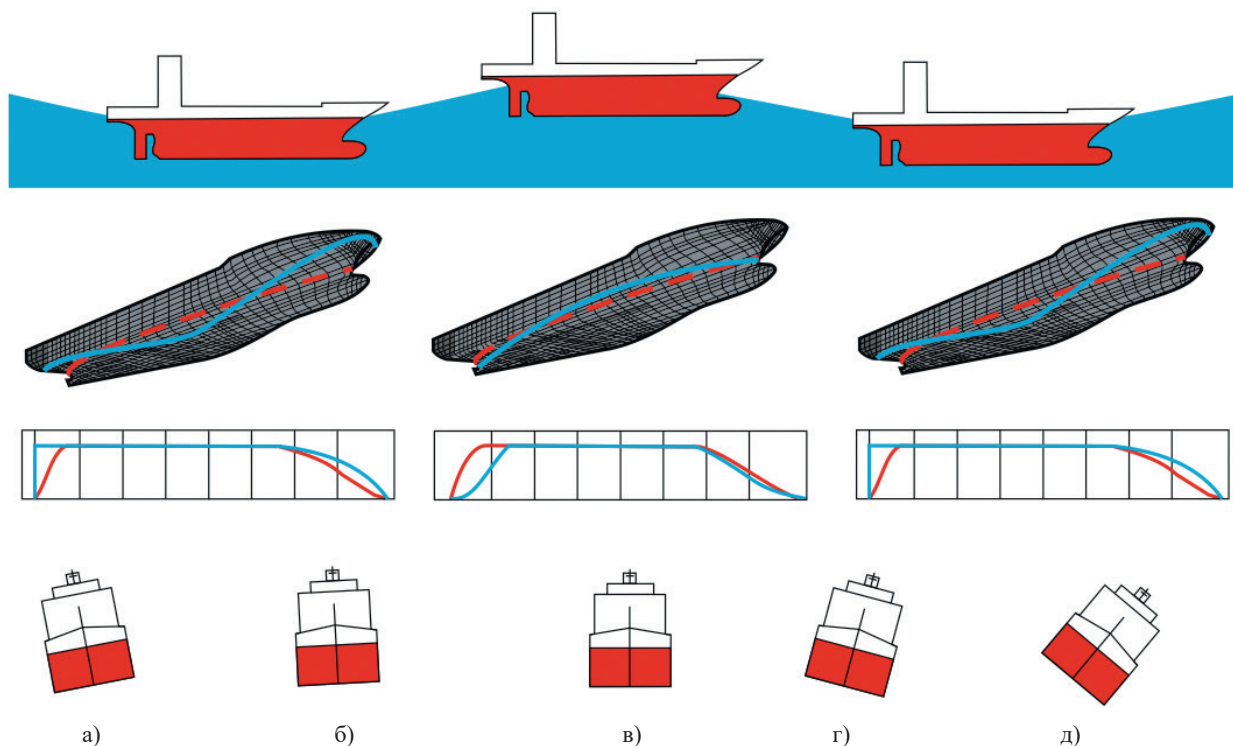


Рис. 2. Схема возникновения параметрической бортовой качки:

- а* — остойчивость увеличена, восстанавливающий момент большой;
б — ускорение бортовой качки под воздействием сильного восстанавливающего момента;
в — остойчивость снижена; *г* — судно продолжает крениться при сниженной остойчивости;
д — остойчивость увеличена, большой восстанавливающий момент
 (далее переход в состояние *а*: цикл качки повторяется с увеличением угла крена)

Длина и ширина судна неизменны, параметры волнения также принимаются неизменными для рассматриваемых условий. Скорость и курс судна могут быть скорректированы в зависимости от текущих условий плавания для минимизации негативного воздействия волнения. При этом МЦВ, как отмечалось ранее, может изменяться в зависимости от положения судна на волне. Кроме того, фактическая МЦВ может значительно отличаться от расчетной из-за разницы между фактической аппликацией центра тяжести (ЦТ) судна и расчетной [8] и [9]. Таким образом, возникает задача определения фактических условий, способствующих возникновению параметрического резонанса, которые могут отличаться в результате использования разных исходных данных, а именно МЦВ, оказывая при этом значительное влияние на безопасность судна.

Одним из руководящих документов по предотвращению опасных ситуаций в неблагоприятных условиях погоды и волнения является циркулярное письмо ИМО¹. Согласно этому документу, параметрический резонанс по бортовой качке наступает в следующих случаях:

1. Остойчивость изменяется с периодом столкновения с волной (T_E), который примерно равен периоду бортовой качки судна ($T_E = T_\theta$). Остойчивость достигает минимума один раз в течение каждого периода качки T_θ . Из-за тенденции замедленного восстановления после накренения с большой амплитудой, период T_θ может в определенной степени адаптироваться к периоду T_E , так что этот вид параметрической качки может возникать при широком диапазоне значений T_E . При волнении с кормовых курсовых углов может быть замечен переход к гармоническому резонансу.

2. Остойчивость изменяется с периодом столкновения с волной T_E , который примерно равен половине периода бортовой качки судна ($T_E = 1/2T_\theta$). Остойчивость достигает минимума дважды в течение каждого периода качки T_θ . При попутном волнении и волнении с кормовых курсовых

¹ MSC.1/Circ.1228 Revised guidance to the master for avoiding dangerous situation in adverse weather and sea conditions.

углов, когда T_E становится больше T_0 , это может происходить только при очень больших периодах T_0 , что указывает на предельное значение остойчивости неповрежденного судна. В результате возникает симметричная качка с большими амплитудами и тенденцией адаптации реакции судна к T_E из-за снижения остойчивости при нахождении судна на гребне волны. Параметрическая качка с соотношением периодов $T_E = 1/2T_0$ может также возникать при встречном волнении и волнении с носовых курсовых углов.

Период бортовой качки легко может быть определен при помощи секундомера. Взаимосвязь периода бортовой качки и метacentрической высоты судна определяется «капитанской формулой»:

$$T_0 = \frac{CB}{\sqrt{h}}, \quad (1)$$

где T_0 — период бортовой качки судна, с; B — ширина судна, м; h — поперечная МЦВ, м; C — коэффициент, принятый равным 0,8.

Очевидно, что T_0 зависит от h . Этим и обуславливается возможность влияния на параметрическую бортовую качку величиной МЦВ. В качестве контролируемых параметров, участвующих в формировании условий, способствующих возникновению параметрической бортовой качки, обычно рассматривают скорость и курс судна. Скорость судна определяет период набегания волн (T_E), а курс судна — угол их набегания (q).

Период набегания волн на судно рассчитывается следующим образом:

$$T_E = \frac{3T_w^2}{3T_w + V_c \cos q} = \frac{1,92\lambda}{2,4\sqrt{\lambda} + V_c \cos q}, \quad (2)$$

где V_c — скорость судна, уз; q — угол набегания волн на судно, град; λ — длина волны, м.

Очевидно, что T_E зависит от $V_c \cos q$, чем и обуславливается возможность влияния на возникновение параметрического резонанса курса и скорости судна.

Условия возникновения параметрического резонанса по бортовой качке предполагают определенное соотношение МЦВ, курса и скорости судна. Если курс и скорость судна традиционно рассматриваются как критерии, определяющие как вход в резонансную зону, так и выход из нее, то влияние МЦВ требует дополнительного изучения.

Поскольку условия параметрического резонанса предполагают соответствующее равенство периодов T_E и T_0 , изменение в одной части равенства должно быть компенсировано определенным изменением в другой части равенства. Например, изменение МЦВ в составе T_0 должно быть компенсировано изменением V_c и / или q в составе T_E . Это является сутью оценки влияния МЦВ на условия параметрического резонанса по бортовой качке, исследуемого в настоящей работе.

Поскольку настоящая работа является продолжением исследований, проведенных в работе [9], в качестве экспериментального судна здесь также использовался крупнотоннажный контейнеровоз С-класса японской компании Mitsui O. S.K Line MOL Courage (ex. APL Poland) вместимостью 8110 ДФЭ. Судно имеет ширину (B) — 45,6 м. Для штормовых условий был рассмотрен диапазон скоростей судна 12–19 уз и диапазон МЦВ — 1,3–10 м. Рассмотрен диапазон длин волн 60–250 м, а в качестве основной выбрана волна, длина которой равна 130 м.

Результаты (Results)

Значения курсовых углов набегания волн (q) были рассчитаны для двух условий возникновения параметрического резонанса по бортовой качке: $T_E = 1/2T_0$ и $T_E = T_0$, при разных значениях МЦВ (h) и скорости судна (V_c), диапазон которых был выбран исходя из наиболее вероятных практических значений, как отмечалось ранее. Для основного резонанса по бортовой качке ($T_E = 1/2T_0$) были получены результаты, представленные в табл. 1.

Таблица 1

Угол набегания волн на судно при $T_E = 1/2T_0$

h	$V_c, \text{уз}$							
	12	13	14	15	16	17	18	19
1,3	169	155	147	142	137	134	131	128
1,4	159	149	143	138	134	131	128	126
1,5	152	145	139	135	132	129	126	124
2,0	132	128	125	122	120	118	116	115
2,5	119	116	114	112	111	110	109	108
3,0	108	106	105	104	103	102	102	101
3,5	98	98	97	97	96	96	96	95
3,9	92	91	91	91	91	91	91	91
4,0	90	90	90	90	90	90	90	90
4,1	88	88	89	89	89	89	89	89
4,5	82	83	83	84	84	84	85	85
5,0	74	76	77	78	78	79	80	80
5,5	67	69	70	72	73	74	75	76
6,0	59	62	64	66	67	69	70	71
6,5	51	55	57	60	62	64	65	67
7,0	43	47	51	54	56	59	61	62
7,5	33	39	44	48	51	54	56	58
8,0	19	29	36	41	45	48	51	53
8,1	15	27	34	39	44	47	50	52
8,2	10	25	32	38	42	46	49	52
8,3	—	22	31	36	41	45	48	51
8,4	—	19	29	35	40	44	47	50
8,5	—	15	26	33	38	43	46	49
8,6	—	11	24	32	37	41	45	48
8,7	—	1	22	30	36	40	44	47
8,8	—	—	19	28	34	39	43	46
8,9	—	—	16	26	33	38	42	45
9,0	—	—	12	24	31	36	40	44
9,1	—	—	6	22	30	35	39	43
9,2	—	—	—	19	28	34	38	42
9,3	—	—	—	17	26	32	37	41
9,4	—	—	—	13	24	31	36	40
9,5	—	—	—	9	22	29	35	39
9,6	—	—	—	—	20	28	33	38
9,7	—	—	—	—	18	26	32	37
9,8	—	—	—	—	15	24	31	35
9,9	—	—	—	—	11	23	29	34
10,0	—	—	—	—	6	21	28	33

Полученные результаты в графическом виде приведены на рис. 3.

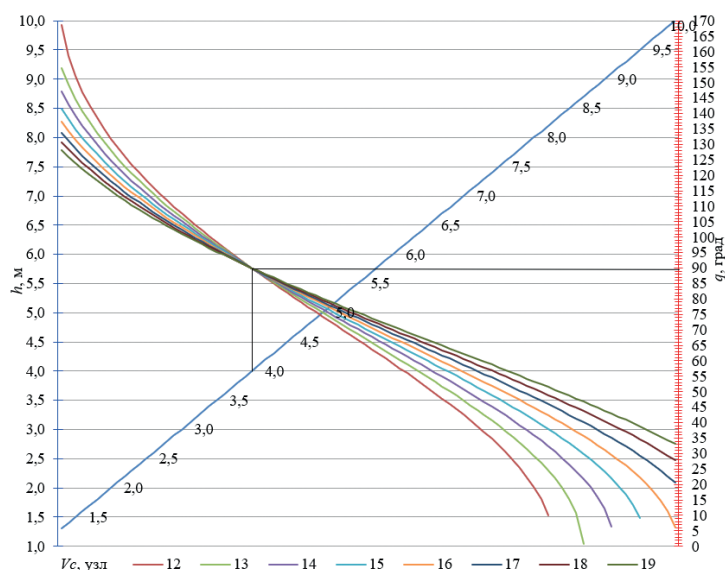


Рис. 3. Номограмма зависимости курсовых углов набегания волн от МЦВ и скорости судна для условий $T_E = 1/2T_0$ и $\lambda = 130$ м

Для дополнительного резонанса по бортовой качке ($T_E = T_0$) были получены результаты, выдержки из которых представлены в табл. 2.

Таблица 2

Угол набегания волн на судно при $T_E = T_0$

h	$V_c, \text{уз}$							
	12	13	14	15	16	17	18	19
1,3	—	—	—	—	—	—	—	—
1,4	—	—	—	—	—	—	—	—
1,5	—	—	—	—	—	—	—	178
1,6	—	—	—	—	—	—	—	170
1,7	—	—	—	—	—	—	—	166
1,8	—	—	—	—	—	—	—	163
1,9	—	—	—	—	—	—	175	161
2,0	—	—	—	—	—	—	169	159
2,1	—	—	—	—	—	—	166	157
2,2	—	—	—	—	—	—	163	155
2,3	—	—	—	—	—	178	161	153
2,4	—	—	—	—	—	170	159	152
2,5	—	—	—	—	—	167	157	151
2,6	—	—	—	—	—	164	155	149
2,7	—	—	—	—	—	161	154	148
2,8	—	—	—	—	174	159	152	147
2,9	—	—	—	—	169	158	151	146
3,0	—	—	—	—	166	156	150	145
3,1	—	—	—	—	163	154	148	144
3,2	—	—	—	—	161	153	147	143
3,3	—	—	—	175	159	151	146	142
3,4	—	—	—	169	157	150	145	141
3,5	—	—	—	166	156	149	144	140
3,6	—	—	—	163	154	148	143	139
3,7	—	—	—	161	153	147	142	138
3,8	—	—	—	159	151	146	141	138
3,9	—	—	172	157	150	145	140	137
4,0	—	—	168	156	149	144	139	136
4,1	—	—	165	154	148	143	139	135
4,2	—	—	162	153	146	142	138	135
4,3	—	—	160	151	145	141	137	134
4,4	—	—	158	150	144	140	136	133
4,5	—	171	157	149	143	139	136	133
4,6	—	167	155	148	142	138	135	132
4,7	—	165	154	147	142	137	134	131
4,8	—	162	152	146	141	137	133	131
4,9	—	160	151	145	140	136	133	130
5,0	—	158	150	144	139	135	132	129
5,5	161	151	144	139	135	132	129	127
6,0	152	145	139	135	132	129	126	124
6,5	146	140	135	131	128	126	123	121
7,0	141	135	131	128	125	123	121	119
7,5	136	132	128	125	123	120	119	117
8,0	132	128	125	122	120	118	116	115
8,5	128	125	122	120	118	116	114	113
9,0	125	122	119	117	115	114	112	111
9,5	122	119	117	115	113	112	110	109
10,0	119	116	114	112	111	110	109	108

Полученные результаты в графическом виде показаны на рис. 4.

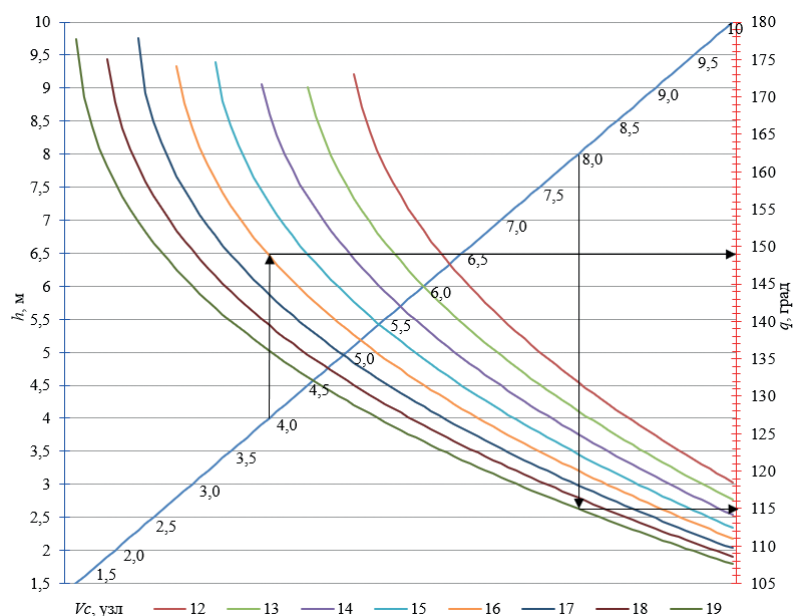


Рис. 4. Номограмма зависимости курсовых углов набегания волн от МЦВ и скорости судна для условий $T_E = T_\theta$ и $\lambda = 130$ м

Основные результаты

1. Данные табл. 1 и номограмма на рис. 3 для условий $T_E = 1/2 T_\theta$ показывают следующее:

- параметрический резонанс по бортовой качке может возникнуть при любом значении МЦВ в рассматриваемом диапазоне;

- во избежание резонанса при $V_c = 12$ уз МЦВ должна быть не менее 8,3 м; при $V_c = 19$ уз — не менее 11,5 м, т. е. за пределами рассматриваемого диапазона;

- при наиболее вероятных сочетаниях V_c и МЦВ курсовой угол набегания волн, способствующий возникновению параметрического резонанса по бортовой качке, может находиться в широком диапазоне: 1–169°;

- при равной скорости судна увеличение МЦВ приводит к уменьшению угла набегания волн и наоборот. Это уменьшение составляет 4–30°, в среднем — 7° на 50 см увеличения МЦВ. Причем чем меньше скорость, тем больше такое изменение;

- до значений МЦВ = 3,9 м, с увеличением скорости судна, угол набегания волн уменьшается, переходя от кормы к носу. Чем выше значение МЦВ, тем меньше изменение угла набегания волн при увеличении скорости судна, пока оно не достигнет нуля при МЦВ = 4,0 м.

- при значениях МЦВ $\geq 4,1$ м наблюдается обратная тенденция, когда с увеличением скорости судна угол набегания волн начинает увеличиваться, переходя от носа к корме. Чем выше значение МЦВ, тем больше изменение угла набегания волн при увеличении скорости судна;

- особенности, отмеченные в пп. е) и д) наглядно показаны на рис. 3: линии графика сходятся в одной точке, соответствующей углу набегания волн 90° при МЦВ = 4,0 м, а затем расходятся тем больше, чем больше удаляется значение МЦВ от этой отметки.

2. Данные табл. 2 и номограмма на рис. 4 для условий $T_E = T_\theta$ показывают следующее:

- параметрический резонанс по бортовой качке не наступает при $h \leq 1,4$ м для всего диапазона скоростей. Однако поскольку минимальная МЦВ, установленная судовладельцев для контейнеровоза такого типа, составляет 1,3 м, то этот диапазон минимален;

- при $V_c = 12$ уз МЦВ должна быть не более 5 м, а при $V_c = 19$ уз МЦВ может быть 1,4 м и менее;

- при наиболее вероятных сочетаниях V_c и МЦВ курсовой угол набегания волн, способствующий возникновению параметрического резонанса по бортовой качке, может находиться в диапазоне 108–178°;

– при равной скорости судна увеличение МЦВ приводит к уменьшению угла набегания волн. Это изменение составляет 2–19° (в среднем 4° на 50 см изменения МЦВ);

– в рассматриваемом диапазоне МЦВ с увеличением скорости судна угол набегания волн уменьшается, переходя от кормы к носу. Чем выше значение МЦВ, тем меньше изменение угла набегания волн при увеличении скорости судна, пока оно не достигнет нуля при МЦВ = 15,9 м;

– особенности, описанные в пп. г) и д) наглядно показаны на рис. 4: линии графика не сходятся в одной точке, соответствующей углу набегания волн 90°, поскольку относящиеся к ним значения угла набегания волн и МЦВ находятся за пределами рассматриваемого диапазона.

При рассмотрении других длин волн в указанном ранее диапазоне были получены результаты, позволяющие сделать следующие выводы:

1. Для условий основного резонанса по бортовой качке ($T_E = 1/2T_0$):

– чем меньше длина волны, тем больше диапазон условий, способствующих возникновению параметрической бортовой качки (например, при длине волны 60 м, никакое практически достижимое и / или допустимое значение МЦВ не позволит обеспечить условия, исключающие возникновение параметрического резонанса);

– для любой длины волны чем больше скорость судна, тем больший диапазон МЦВ может привести к возникновению параметрической бортовой качки;

– для любой длины волны чем меньше МЦВ, тем больший диапазон скоростей может привести к возникновению параметрической бортовой качки. При этом, очевидно, что МЦВ должна находиться в диапазоне значений, когда параметрический резонанс не наступает или наступает при любой скорости;

– с учетом всех рассматриваемых значений МЦВ и скорости судна диапазон углов набегания волн на судно, при котором может возникнуть параметрическая бортовая качка, будет меняться в зависимости от длины волны, сначала увеличиваясь с увеличением длины волны, а потом, достигнув максимума, уменьшаясь. Наиболее широкий диапазон углов набегания волн соответствует длине волны 130 м: $1^\circ \leq q \leq 169^\circ$. Наименьший диапазон углов набегания волн соответствует длине волны 60 м: $83^\circ \leq q \leq 162^\circ$.

2. Для условий дополнительного резонанса по бортовой качке ($T_E = T_0$):

– при изменении длины волны не наблюдается однозначного изменения значений МЦВ и скорости судна, способствующих возникновению параметрической бортовой качки;

– при уменьшении длины волны до некоторого значения ($\lambda = 160$ м) диапазон условий, способствующих возникновению параметрической бортовой качки, уменьшается, а при дальнейшем уменьшении длины волны, начинает увеличиваться;

– при увеличении длины волны минимальное значение угла набегания волн уменьшается (от 136° до 81°), а максимальное почти не изменяется и составляет 175–179°, т. е. сектор курсовых углов параметрической бортовой качки в основном расположен позади траверза и на траверзе;

– с учетом всех рассматриваемых значений МЦВ и скорости судна диапазон углов набегания волн на судно, при котором может возникнуть параметрическая бортовая качка, будет тем шире, чем больше длина волны: при $\lambda = 230$ м $81^\circ \leq q \leq 178^\circ$; при $\lambda = 60$ м $136^\circ \leq q \leq 179^\circ$.

Обсуждение (Discussion)

На рис. 3 видна характерная точка пересечения линий графиков, соответствующая значению МЦВ, равному 4 м, когда для всего диапазона скоростей угол набегания волн, соответствующий параметрическому резонансу по бортовой качке, будет равен 90°. Это обусловлено тем, что $\cos 90^\circ = 0$, и, соответственно, $V_c \cos q = 0$, поэтому величина МЦВ будет одинакова для всего диапазона скоростей судна, поскольку в этом случае

$$h = \frac{1,57(CB)^2}{\lambda}. \quad (6)$$

На рис. 4 показан пример использования номограммы: для $h = 4$ м и $V_c = 16$ уз, когда угол набегания волн, при котором может возникнуть параметрический резонанс по бортовой качке, со-

ставляет 149° , для $h = 8$ м и $V_c = 19$ уз угол набегания волн составляет 115° . В рассматриваемом диапазоне МЦВ (1,3–10 м) линии графиков на номограмме не пересекаются.

В работе [8] получено, что МЦВ контейнеровоза может изменяться в диапазоне 7–79 см только из-за изменения аппликаты ЦТ контейнеров, а в работе [9] диапазон изменений МЦВ составил 6–64 см. Поэтому вполне уместно рассматривать возможное изменение МЦВ контейнеровоза на 50 см с учетом фактических аппликаций ЦТ контейнеров.

Анализ полученных результатов позволяет утверждать, что изменение МЦВ оказывает влияние на исследуемые параметры формирования параметрического резонанса по бортовой качке. Поэтому можно сделать следующие выводы:

1. Для условий основного резонанса по бортовой качке ($T_E = 1/2T_\theta$):

– чем ниже скорость судна, тем больше возможностей для выхода из параметрического резонанса за счет увеличения МЦВ;

– для выхода из параметрического резонанса необходимо уменьшать скорость и / или увеличивать МЦВ. При этом необходимо учитывать, что возможности увеличения МЦВ могут быть ограничены требованиями безопасности и техническими возможностями.

2. Для условий дополнительного резонанса по бортовой качке ($T_E = T_\theta$):

– чем ниже скорость судна, тем больше возможностей выхода из параметрического резонанса за счет уменьшения МЦВ;

– для выхода из параметрического резонанса необходимо уменьшать скорость и / или МЦВ.

При этом важно учитывать, что возможности увеличения МЦВ могут быть ограничены требованиями безопасности и техническими возможностями.

Выводы (Summary)

На основании проведенного исследования можно сделать следующие выводы:

1. Результаты расчетов подтвердили влияние МЦВ на формирование условий, способствующих возникновению параметрического резонанса по бортовой качке. Это дает возможность утверждать, что учет фактической МЦВ важен для прогнозирования параметрического резонанса и его избегания.

2. На практике параметры качки судна определяются непосредственным измерением ее периодов, периода волнения и глазомерной оценкой длины волн. Без применения каких-либо специальных средств и способов фактическую МЦВ можно определить только по периоду бортовой качки во время плавания судна в море. Однако понимание того, каким образом изменения МЦВ влияют на параметры качки, представляется очень важным для общего понимания управления судном в штормовых условиях и обеспечения его безопасной эксплуатации еще на этапе планирования рейса. Определение МЦВ судна, учитывая фактические аппликации ЦТ контейнеров, дает возможность заблаговременного определения потенциально опасных условий плавания судна в предстоящем рейсе.

3. Понимание того, как изменения МЦВ и скорости судна влияют на условия возникновения параметрического резонанса по бортовой качке, позволяет их корректировать для достижения наиболее благоприятных условий плавания. Очевидно, что изменение МЦВ путем манипуляций с балластом должно выполняться с особой осторожностью, чтобы не подвергнуть судно опасности. В частности, всегда должно выполняться требование по минимальному значению МЦВ, а при увеличении МЦВ необходимо учитывать возможные негативные последствия из-за увеличения интенсивности бортовой качки.

4. Для того, чтобы фактические данные о массе и аппликации ЦТ контейнеров могли использоваться при планировании загрузки судна, они должны быть получены на этапе подготовки контейнера к транспортировке и доводиться до сведения всех участников перевозки, включая экипаж судна. Этот обмен данными может быть выполнен в рамках системы оперативного контроля грузовых операций контейнеровоза (СОКГОК), описанной в работе [10].

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Uzonoglu C. E. Numerical and Experimental Study of Parametric Rolling of a Container Ship in Waves: Thesis for obtaining the degree of Master of Science / C. E. Uzonoglu. — Universidade Técnica de Lisboa, 2011. — 98 p.
2. Van Laarhoven B. J. H. Stability Analysis of Parametric Roll Resonance: Traineeship report / B. J. H Van Laarhoven. — Eindhoven: Eindhoven University of Technology, 2009. — 37 p.
3. Míguez González M. A study of ship parametric roll resonance for the evaluation of preventive strategies: Tesis Doctoral / M. Míguez Gonzalez. — Universidade Da Coruna, 2012. — 343 p.
4. France W. N. An Investigation of Head-Sea Parametric Rolling and its Influence on Container Lashing Systems / W. N. France, M. Levadou, T. W. Treackle, J. R. Paulling, R. K. Michel, C. Moore // *Marine Technology and SNAME news*. — 2003. — Vol. 40. — Is. 01. DOI: 10.5957/mtl.2003.40.1.1.
5. Ершов А. А. Практический способ определения резонанса по бортовой качке судна / А. А. Ершов, А. В. Теренчук // *Вестник Государственного университета морского и речного флота имени адмирала С. О. Макарова*. — 2015. — № 5 (33). — С. 18–25. DOI: 10.21821/2309-5180-2015-7-5-18-25.
6. Ершов А. А. Диаграмма для определения опасных областей при движении судна в штормовом море / А. А. Ершов, С. В. Сольнов, А. М. Бояринов // *Вестник Астраханского государственного технического университета. Серия: Морская техника и технология*. — 2018. — № 2. — С. 22–27. DOI: 10.24143/2073-1574-2018-2-22-27.
7. Семенова В. Ю. Определение амплитуд параметрической бортовой качки судна при различных вариантах нагрузки / В. Ю. Семенова, Д. А. Альбаев // *Морские интеллектуальные технологии*. — 2018. — № 3–1 (41). — С. 34–44.
8. Царик Р. С. Оценка влияния положения центра тяжести контейнера на метацентрическую высоту контейнеровоза / Р. С. Царик, Д. А. Акмайкин // *Вестник Государственного университета морского и речного флота имени адмирала С. О. Макарова*. — 2016. — № 6 (40). — С. 58–70. DOI: 10.21821/2309-5180-2016-8-6-58-70.
9. Царик Р. С. Оценка влияния стандартного и фактического центров тяжести контейнера с типовым размещением груза на метацентрическую высоту контейнеровоза / Р. С. Царик // *Вестник Государственного университета морского и речного флота имени адмирала С. О. Макарова*. — 2021. — Т. 13. — № 1. — С. 17–28. DOI: 10.21821/2309-5180-2021-13-1-17-28.
10. Царик Р. С. Система оперативного контроля грузовых операций контейнеровоза (СОКГОК) / Р. С. Царик, Д. А. Акмайкин // *Эксплуатация морского транспорта*. — 2015. — № 2 (75). — С. 16–23.

REFERENCES

1. Uzonoglu, Cihan Emre. Numerical and Experimental Study of Parametric Rolling of a Container Ship in Waves. Thesis for obtaining the degree of Master of Science. Universidade Técnica de Lisboa, 2011.
2. Van Laarhoven B. J.H. Stability Analysis of Parametric Roll Resonance. Traineeship report. Eindhoven: Eindhoven University of Technology, 2009.
3. Míguez González, Marcos. A study of ship parametric roll resonance for the evaluation of preventive strategies. Tesis Doctoral. Universidade Da Coruna, 2012.
4. France, William N., Marc Levadou, Thomas W. Treackle, J. Randolph Paulling, R. Keith Michel, and Colin Moore. “An Investigation of Head-Sea Parametric Rolling and its Influence on Container Lashing Systems.” *Marine Technology and SNAME news* 40.1 (2003). DOI: 10.5957/mtl.2003.40.1.1.
5. Ershov, Andrey Alexandrovich, and Alexander Vladimirovich Terenchuk. “Practical method for determining the parametric resonance of rolling of the vessel.” *Vestnik Gosudarstvennogo universiteta morskogo i rechnogo flota imeni admiral S. O. Makarova* 5(33) (2015): 18–25. DOI: 10.21821/2309-5180-2015-7-5-18-25.
6. Ershov, Andrey Aleksndrovich, Sergei Veniaminovich Solnov, and Alexander Michailovich Boyarinov. “Diagram for determining dangerous zones when sailing in heavy weather.” *Vestnik of Astrakhan State Technical University. Series: Marine engineering and technologies* 2 (2018): 22–27. DOI: 10.24143/2073-1574-2018-2-22-27.
7. Semenova, Viktoriya Yu., and Danil A. Al’baev. “The determination of the amplitudes of the parametric rolling of ship in various loading.” *Marine intelligent technologies* 3–1(41) (2018): 34–44.
8. Tsarik, Ruslan Stanislavovich, and Denis Aleksandrovich Akmaykin. “Evaluation of influence of container’s center of gravity position on container ship’s metacentric height.” *Vestnik gosudarstvennogo universiteta*

morskogo i rechnogo flota imeni admiral S. O. Makarova 6(40) (2016): 58–70. DOI: 10.21821/2309-5180-2016-8-6-58-70.

9. Tsarik, Ruslan Stanislavovich. “Evaluating the influence of the standard and actual centers of gravity of the typically loaded container on the metacentric height of a container ship.” *Vestnik Gosudarstvennogo universiteta morskogo i rechnogo flota imeni admirala S. O. Makarova* 13.1 (2021): 17–28. DOI: 10.21821/2309-5180-2021-13-1-17-28.

10. Tsarik, R.S., and D. A. Akmaykin. “Operational control system of container ship’s cargo operations (OCSCCO).” *Ekspluatatsiya morskogo transporta* 2(75) (2015): 16–23.

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРЕ

Царик Руслан Станиславович —
капитан, инструктор-преподаватель ДВМТЦ
ФГБОУ ВО «МГУ им. адм. Г. И. Невельского»
690003, Российская Федерация,
Владивосток,
ул. Верхнепортовая, д. 50а
e-mail: rex-infinity@yandex.ru

INFORMATION ABOUT THE AUTHOR

Tsarik, Ruslan Stanislavovich —
Master mariner, instructor-trainer
Maritime State University named after
admiral G. I. Nevelskoi
50a Verkhneportovaya Str., Vladivostok, 690003,
Russian Federation
e-mail: rex-infinity@yandex.ru

*Статья поступила в редакцию 25 апреля 2021 г.
Received: April 25, 2021.*

EVALUATING LEAD-TIME IN COMPLEX SUPPLY CHAINS BY SIMULATION TECHNIQUE

A. L. Kuznetsov¹, A. V. Kirichenko¹, A. D. Semenov²

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

² — Yanino Logistics Park LLC, Leningrad Region, Russian Federation

The structure of the modern system of container transportation routes consisted of several interacting sub-systems whose operations are not synchronized and could not be synchronized is studied in the paper. Accordingly, the cargo transported and thus handling over between these trunk and feeder lines inevitably has to be stored at the ports of transshipment. As the consequence, the processes of cargo storage and accumulation could be regarded as a rational and efficient tool for bufferization of the flows with different parties and rhythmicity. It is stated in the paper that the modelling of interacting asynchronous shipping lines should consider coordination of the trunk and feeder routes in the transshipment ports. The model allows you to change the ships number used on a route in the consideration of the whole cargo flow system organization in order to define the necessary technological and technical characteristics of the ports. The manual experiments with the model would allow you to form the prior schedules of the trunk and feeder ships routes for the certain container flows or for the shipping lines working on the same routes or even for the certain ships. It is concluded that this approach can be used to define fair schedules, which would satisfy the participants of container shipping.

A graph model of interacting trunk-feeder routes that enables to conduct the computer simulation experiments aimed at the predicting the lead-time of container shipments in the complex asynchronously functioning system of linear routes is presented in the paper. There are the results of experiments based on the actual container lines structure that prove the possibility of practical usage of the model as a tool in everyday activity of container line operators, freight forwarders, terminal operators and clients. Simultaneously a new direction of scientific researches, i. e. computer simulation of synchro-modal systems, is announced.

Keywords: container line routes, trunk routes, feeder routes, routes conjunction, container storage, lead time.

For citation:

Kuznetsov, Aleksandr L., Aleksandr V. Kirichenko, and Anton D. Semenov. "Evaluating lead-time in complex supply chains by simulation technique." *Vestnik Gosudarstvennogo universiteta morskogo i rechnogo flota imeni admirala S. O. Makarova* 13.3 (2021): 372–383. DOI: 10.21821/2309-5180-2021-13-3-372-383.

УДК 656.614

ОЦЕНКА ВРЕМЕНИ ДОСТАВКИ В СЛОЖНЫХ ЦЕПЯХ ПОСТАВКИ С ПОМОЩЬЮ МОДЕЛИРОВАНИЯ

А. Л. Кузнецов¹, А. В. Кириченко¹, А. Д. Семенов²

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

² — ООО «Логистический Парк «Янино», Ленинградская область, Российская Федерация

Проведенное исследование показало, что современная структура маршрутов морских контейнерных линий представляет собой совокупность взаимодействующих подсистем, работа которых не является и, видимо, не может являться полностью синхронизованной. В этой связи перевозимые и вследствие этого передаваемые с фидерных маршрутов на магистральные и обратно контейнеры неизбежно должны складываться в портах транзитного назначения (хабах). Таким образом, процесс хранения и накопления рассматривается как целесообразный инструмент демпфирования грузопотоков, отличающихся по порционности и ритмичности. Отмечается, что моделирование взаимодействующих асинхронных линий предусматривает учет статистики «стыков» обрабатываемых магистральных и фидерных судов в портах транзитного назначения с учетом статистической продолжительности их терминальной обработки. Подоб-

ная модель позволяет варьировать, в соответствии с требуемыми показателями всей грузопроводящей системы и технологическими возможностями хабов, необходимое либо минимально достаточное количество судов, обращающихся по взаимодействующим маршрутам, определять рациональные варианты технологического оснащения терминалов. «Ручные» эксперименты с подобной моделью могут позволить формировать приоритетные стыковые расписания движения магистральных и фидерных судов для выделенных категорий контейнеров (например, рефрижераторных) либо для отдельных линий при их совместной работе на направлениях, либо для отдельных судов (например, арендованных линейными компаниями с истекающими сроками аренды). Сделан вывод о том, что иной подход может построить равноценные расписания для всех участников взаимодействующих подсистем.

В работе представлена разработанная графическая модель взаимодействующих магистральных и фидерных линий, позволяющая проводить вычислительные имитационные эксперименты, целью которых является прогноз объективно складывающегося времени доставки контейнеров, находящихся в сложной асинхронно функционирующей системе линейных маршрутов. Приведены результаты эксперимента, проведенного на базе действующих контейнерных линий, что подтверждает возможность использования предложенной имитационной модели в практической деятельности операторов контейнерных линий, экспедиторов и транспортной клиентуры. Одновременно анонсируется такое новое направление прикладных исследований в транспортной логистике, как моделирование «синхромодалых сетей».

Ключевые слова: маршруты контейнерных линий, магистральные маршруты, фидерные маршруты, сопряжение маршрутов, хранение контейнеров, время доставки.

Для цитирования:

Кузнецов А. Л. Оценка времени доставки в сложных цепях поставки с помощью моделирования / А. Л. Кузнецов, А. В. Кириченко, А. Д. Семенов // Вестник Государственного университета морского и речного флота имени адмирала С. О. Макарова. — 2021. — Т. 13. — № 3. — С. 372–383. DOI: 10.21821/2309-5180-2021-13-3-372-383.

Введение (Introduction)

Торговое судно, по своей сути, является формой коммерческого предприятия, предназначенного для получения прибыли, извлекаемой путем оказания услуг, которыми являются перевозки грузов клиентам («морское предприятие» — это совокупность судна, груза и фрахта). На начальном этапе развития морских перевозок отношения между клиентами и перевозчиками носили случайный характер, и судно как более мобильный и активный участник отношений перемещалось между портами в поисках грузов. Это движение носило хаотичный характер, поскольку выбор порта назначения определялся направлением перевозки найденного груза, а выбор следующего начального пункта имел случайный характер. Такое «бродяжничество» по морям представляло собой трамповую форму организации перевозок (от англ. *tramp* — бродяга), как показано на рис. 1, а [1]. Постепенно складывающиеся партнерские отношения между грузоотправителями и перевозчиками привели к появлению линейного судоходства, при котором судно в порту гарантированно ожидал груз, а грузоотправитель был уверен в своевременном прибытии судна (рис. 1, б).

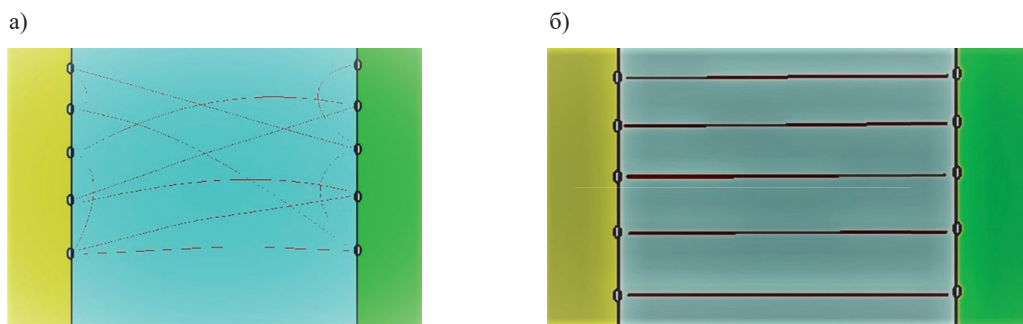


Рис. 1. Трамповое судоходство (а), линейное судоходство (б)

Желание эксплуатировать более вместительные суда при сохранении частоты использования сервиса привели к рационализации маршрутов судоходства по системе грузовых «ступниц», или хабов (от англ. *hub* — ступица), как условно показано на рис. 2, а.

Вскоре обнаружилось, что обработка крупных судов в портах-хабах требует большое количество времени, что отражается на частоте сервиса на маршруте. Как следствие, магистральные маршруты начали трансформироваться из ожидаемых вначале «межконтинентальных» парных комбинаций в более сложные круговые и маятниковые маршруты, вовлекающие несколько портов каждого побережья с частичной погрузкой-разгрузкой (рис. 2, б) [2].

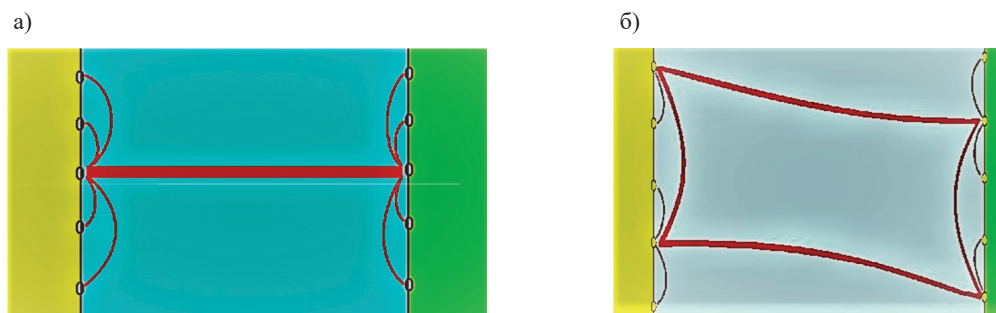


Рис. 2. Формы организации перевозок:
а — система магистральных маршрутов между хабами;
б — круговой магистральный маршрут

Увеличение размеров судов на вспомогательных («подпитывающих», или «фидерных») маршрутах, вызванных действием указанного ранее *эффекта масштабной экономии*, привело к появлению аналогичных «шаблонов» построения маршрутов и в этом сегменте (рис. 3).

Конкретная форма магистральных и фидерных маршрутов не важна (подтверждением служит то, что их называют *круговыми*), что дает возможность представления их в наиболее простой для изучения основных закономерностей форме (рис. 4).

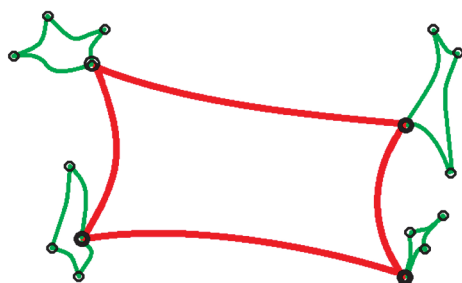


Рис. 3. Существующая система фидерных маршрутов

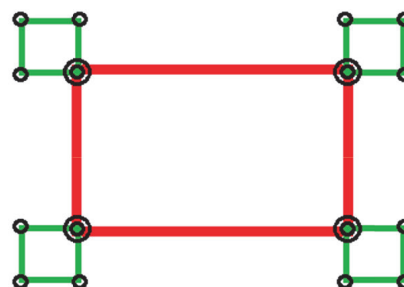


Рис. 4. Модель системы магистральных и фидерных маршрутов

На практике описываемые маршруты контейнерных линий гораздо сложнее, поскольку могут включать разную последовательность судозаходов в множество портов. Кроме того, каждый порт может быть включен во множество магистральных и фидерных маршрутов. Однако общая структура маршрутов, представленная на рис. 4, сохраняется.

Исследования проблем взаимодействия сопряженных транспортных маршрутов в настоящее время становятся актуальными. В научный оборот введен термин «синхромодалная сеть» (*synchromodalnetwork*) как объект исследования [3], подробно рассматривается взаимодействие морских линий с наземным (автомобильным) транспортом [4]–[6]. Также исследованы вопросы сопряжения во времени внутритерминальных технологических операций [7], [8] и рейсовых заданий на отдельных судоходных линиях [9]–[11].

Методы и материалы (Methods and Materials)

Для подтверждения представленной концепции рассмотрим один магистральный маршрут оператора контейнерной линии CMA CGM — Phoenician Express, соединяющий двенадцать морских

портов: Shanghai, Ningbo, Busan, Shekou, Singapore, Malta (freeport), Koper, Trieste, Rijeka, Port Said, Jeddah, Port Klang (рис. 5).

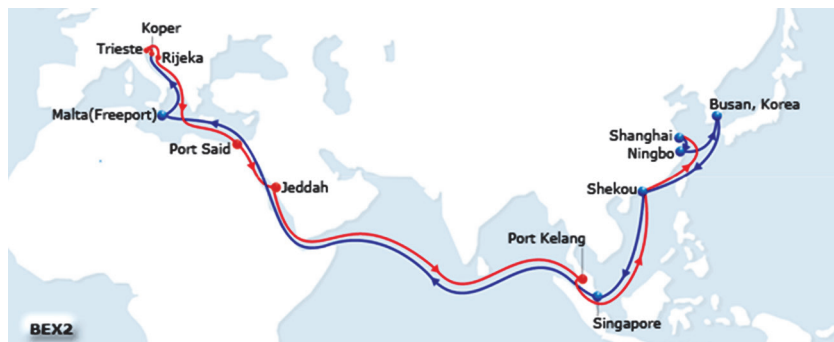
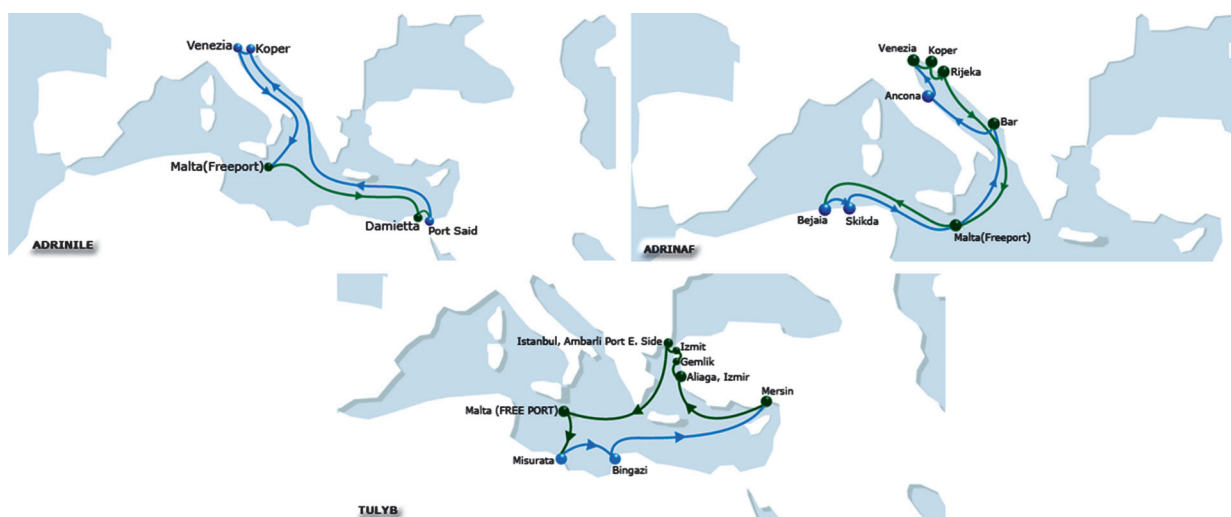


Рис. 5. Магистральный маршрут оператора контейнерной линии

Теперь рассмотрим фидерные маршруты двух портов: Malta и Busan, расположенных на разных концах представленного магистрального маршрута. Часть фидерных маршрутов порта Malta представлена на рис. 6, а.

а)



б)



Рис. 6. Фидерные маршруты порта Malta (а), фидерные маршруты порта Busan (б)

Фидерные маршруты порта Busan представлены на рис. 6, б, откуда видно, что фидерные маршруты практически идентичны модельным, поскольку прямоугольные маршруты были выбраны лишь для иллюстрации моделей. Модели реальных маршрутов, показанные на рис. 5 и 6, могут включать большее число вершин в циклических маршрутах подобного графического представления (рис. 7).

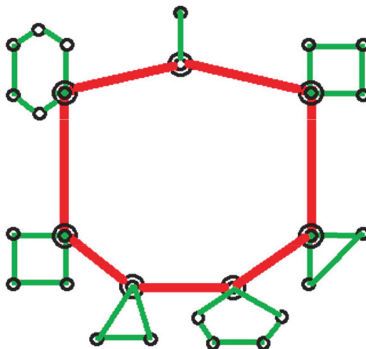


Рис. 7. Пример обобщенной модели сопряжения маршрутов

Назначением представленной в данной работе модели является наглядное и эффективное изучение взаимного влияния направления перевозок, загрузки судна на участках маршрута, а также трудоемкости портовых операций. Данная модель представляет собой удобный способ представления информации обо всех вовлеченных в транспортный процесс ресурсах, позволяющий эффективно использовать графоаналитические методы исследования. Подкрепленная данными о маршрутах операторов контейнерных линий, модель может быть использована не только для теоретических исследований, но и для практических целей прогнозирования и анализа времени перевозки контейнеров между портами, не включенными в один маршрут.

Работа контейнерных терминалов зависит от операторов контейнерных линий, поскольку именно они определяют, в какие порты будут заходить их суда, сколько судов будет использоваться на маршруте, какие суда поставить на линию, с какой вместимостью и с каким количеством груза на борту. От решений, принятых операторами контейнерных линий, будет зависеть необходимое количество причалов, глубина причальной стенки, количество кранов, обрабатывающих судно, количество складских перегружателей и др.

Необходимо помнить, что основной функцией любого современного терминала является не накопление и распределение грузовых партий, а осуществление операций по смене вида транспорта и координации работы транспортных средств, выполняющих перевозки на регулярных маршрутах, что подтверждено на рис. 7: зелеными линиями обозначены фидерные маршруты, осуществляющие перевозки на коротких плечах, однако зелеными линиями без потери общности могут обозначаться и наземные транспортные средства (например, железнодорожные контейнерные поезда, осуществляющие регулярные перевозки между морским портом и железнодорожной станцией).

Целью моделирования является оценка времени перевозки контейнера между портами, связанными между собой сложными маршрутами. При этом необходимо выделить время нахождения груза на борту судна и время его пребывания в порту в ожидании судна. Оценить эти характеристики можно только методами имитационного моделирования [12], [13]. Важно понять, что порты являются необходимым условием организации линейного судоходства. Хранение контейнера в порту является не «злом, с которым надо бороться», а естественными инструментами оптимизации существующей системы контейнерных перевозок.

Время, когда срок доставки определялся делением длины маршрута на скорость судна, осталось в прошлом. Даже если все суда на сопряженных маршрутах движутся с одинаковой скоростью, их относительное положение в соответствующей системе зависит от начальных условий в момент оценки, как показано на рис. 8.

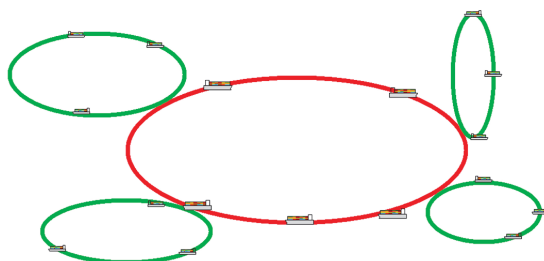


Рис. 8. Взаимное расположение судов в определенный момент времени

В принципе, данные о расписаниях движения на всех маршрутах позволяют точно определить положение каждого судна в любой момент времени и тем самым рассчитать точное время прибытия его в каждый порт маршрута. Практический расчет этого времени вызывает технические сложности даже для простейшей модели, показанной на рис. 4 и 8. Предлагаемая здесь модель отражает простейший вариант, показанный на рис. 4. Соответствующая данной конфигурации экранная форма представлена на рис. 9.

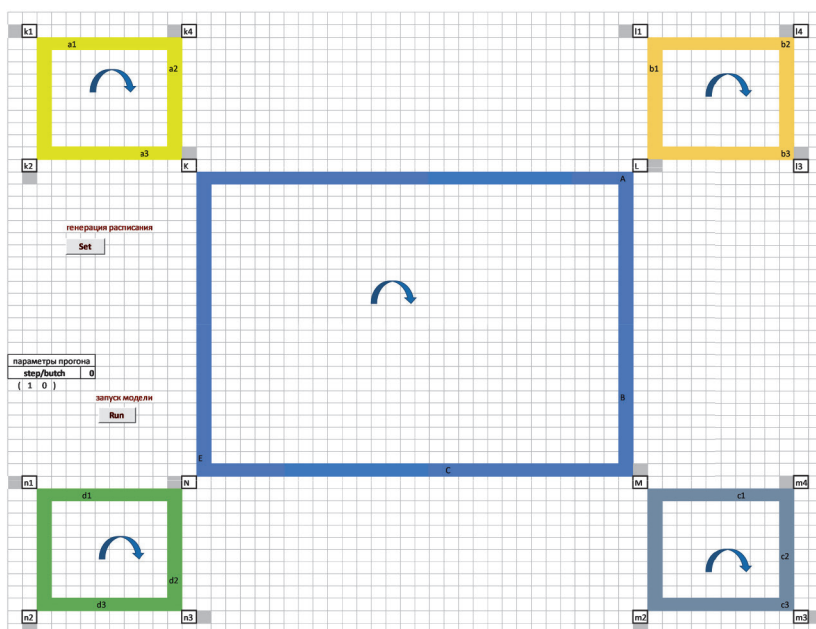


Рис. 9. Экранная форма модели

Вариант задания характеристик маршрутов для данной модели приведен на рис. 10.

Маршрут	Суда	Длина	Инт 0-1	Инт 1-2	Инт 2-3
<i>Trunk</i>	5	114	20	20	20
<i>Route k</i>	3	44	11	11	11
<i>Route l</i>	3	44	5	15	10
<i>Route m</i>	3	44	15	10	5
<i>Route n</i>	3	44	12	15	9

Names	1	2	3	4	5
<i>Trunk</i>	A	B	C	D	E
<i>Route k</i>	a1	a2	a3	a4	
<i>Route l</i>	b1	b2	b3	b4	
<i>Route m</i>	c1	c2	c3	c4	
<i>Route n</i>	d1	d2	d3	d4	

Рис. 10. Пример описания маршрутов судов

Для получения статистически достоверных характеристик исследуемого сочетания маршрутов выполняется многократное повторение отдельных экспериментов. С этой целью каждый раз производится генерация конкретного варианта положения магистральных и фидерных судов-контейнеровозов на маршрутах, заданных в рис. 10. Сочетание маршрутов, т. е. транспортно-логистический процесс перевозки груза в исследуемой инфраструктурной модели, составляется как некоторая программа, содержащая указанную последовательность операторов:

«Завезти» — предписывает завести груз в некоторый порт X ;

«Погрузить» — предписывает в порту X погрузить груз на судно Y . Если имя судна не указано, то груз помещается на первое зашедшее в порт судно линии;

«Выгрузить» — предписывает в порту X выгрузить груз с судна Y . Судно указывается либо явно (в операторе «Погрузить»), либо задается автоматически (при погрузке первого зашедшего в порт судна — в случае отсутствия имени в операторе «Погрузить»);

«Вывезти» — предписывает вывести доставленный груз из порта X .

Пример подобного маршрута с указанием конкретных судов приведен на рис. 11.

№	задание	порт	судно	статус	время
1	Завезти	k1			
2	Погрузить	k1	a1		
3	Выгрузить	K	a1		
4	Погрузить	K	D		
5	Выгрузить	M	D		
6	Погрузить	M	c3		
7	Выгрузить	m3	c3		
8	Вывезти	m3			

Рис. 11. Пример задания маршрута перевозки контейнеров с букировкой судов

Модель выполняется в пошаговом или пакетном режиме, который задается значением соответствующей управляющей переменной. Ход решения задачи отражается на графической модели стыковки магистральных маршрутов с фидерными линиями (рис. 12).

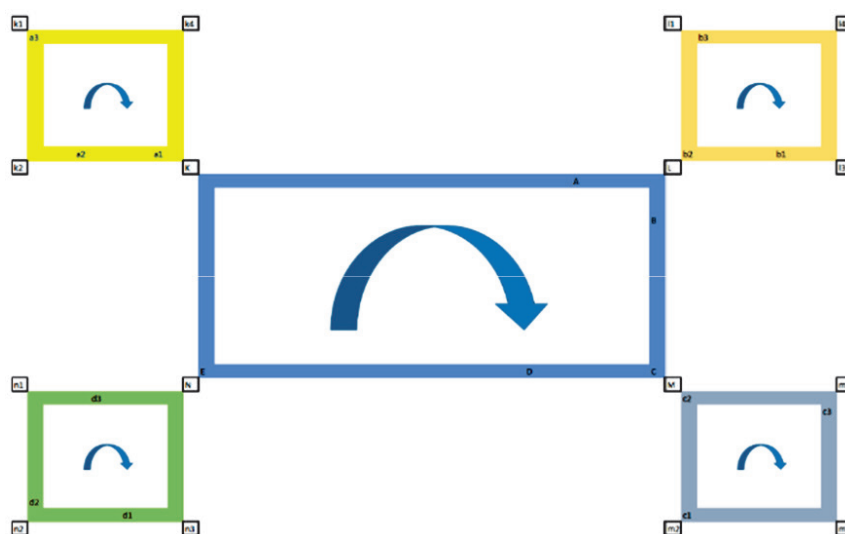


Рис. 12. Ситуационная модель стыковки маршрутов

Ожидание груза в том или ином порту отображается в виде квадрата красного цвета, условно отображающего склад соответствующего порта (рис. 13).

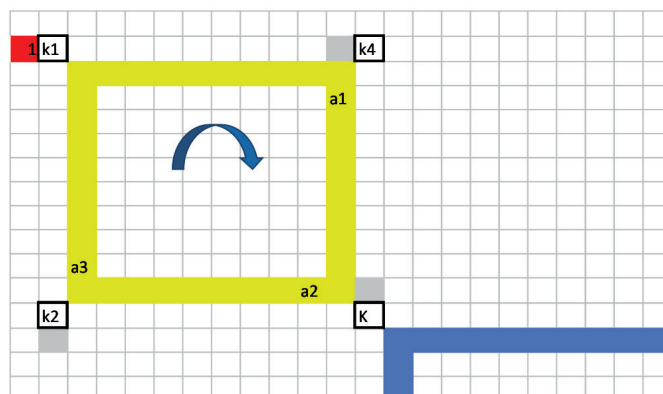


Рис. 13. Отображение хранения груза на складе порта k1

Факт и время выполнения каждого оператора составленной программы фиксируются в соответствующих колонках таблицы, которая принимает по завершению моделирования вид, приведенный на рис. 14.

№	задание	порт	судно	статус	время
1	Завезти	k1		done	1
2	Погрузить	k1	a3	done	10
3	Выгрузить	K	a3	done	32
4	Погрузить	K	E	done	33
5	Выгрузить	M	E	done	90
6	Погрузить	M	c3	done	101
7	Выгрузить	m3	c3	done	123
8	Вывезти	m3		done	124

Рис. 14. Отчет о выполнении программы

Результаты моделирования сводятся в таблицу, позволяющую судить о задержках груза во время ожидания судов в портах в ходе отдельного эксперимента (рис. 15).

Сводное время		
в порту	на борту	
9		
	22	
1		
	57	
11		
	22	
1		
Всего:	Всего:	Итого:
23	101	124

Рис. 15. Отчет о транспортном процессе

Представленная модель может быть использована для оценки распределения времени перевозки контейнеров между портами, находящимися на разных круговых маршрутах.

Результаты (Results)

Рассмотрим три маршрута линии СМА-CGM: два фидерных и один магистральный (рис. 16).

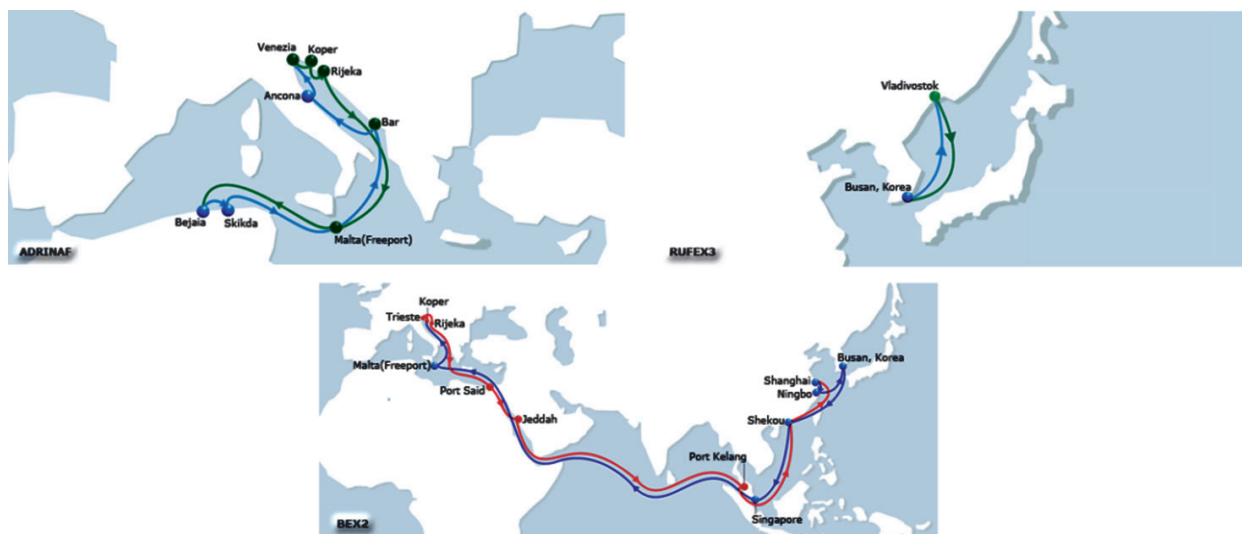


Рис. 16. Магистральные и фидерные маршруты

На каждом из них работает разное количество судов. Время рейса также различно. Основные данные по маршрутам приведены в следующей таблице:

Данные по морским рейсам

Название маршрута	Количество судов	Время рейса, сут	Интервалы между судами, сут
PhoenicianExpress	10	70	7
SSLMED AdrinafService	3	21	7
RussianFarEastExpress 3	1	7	7

Пусть из одного порта фидерного маршрута отправляются регулярные контейнерные отправки в порт другого фидерного маршрута. Поступление контейнеров равномерное. Попробуем оценить время рейса. В лучшем случае, общее время перевозки составит $70 + 21 + 7 = 98$ сут, однако расписание движения судов может значительно изменить это значение.

Оценим теперь распределение времени перевозки контейнеров с помощью предложенной в работе модели (рис. 17). Как видно из рисунка, время перевозки между двумя портами, находящимися на разных круговых маршрутах линии, может значительно отличаться от расчетного значения.



Рис. 17. Распределение времени перевозки при случайном характере длительности рейсов

Обсуждение (Discussion)

Программы, составленные в условных операторах для различных комбинаций портов и соединяющих порт маршрутов, с учетом букирования индивидуальных судов или произвольных судов линий, позволяют быстро планировать и проводить серии экспериментов с различными характеристиками движения судов.

Статистически достоверное количество экспериментов позволяет получить полное представление о характеристиках целевой случайной величины — времени перевозки по выбранному совокупному маршруту — в виде интегральной функции или плотности распределения (см. рис. 17). Таким образом, предлагаемый инструмент моделирования может использоваться как для анализа отдельных экземпляров транспортных процессов, так и для оценки эффективности всей действующей системы транспортировки, основанной на сопряжении морских и интермодальных маршрутов любой сложности.

Выводы (Summary)

На основании проведенного исследования можно сделать следующие выводы:

1. Проведенное исследование показало, что современная структура маршрутов морских контейнерных линий представляет собой совокупность взаимодействующих подсистем, работа которых не является и, видимо, не может быть полностью синхронизированной.
2. Определена графическая модель взаимодействующих магистральных и фидерных линий, позволяющая проводить вычислительные имитационные эксперименты, целью которых является прогноз объективно складывающегося достоверного времени доставки контейнеров, находящихся в сложной асинхронно функционирующей системе линейных маршрутов.
3. Результаты проведенного эксперимента позволяют предполагать целесообразность использования приведенной имитационной модели в практической деятельности операторов контейнерных линий, экспедиторов и транспортной клиентуры.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Кузнецов А. Л. Морские контейнерные перевозки: моногр. / А. Л. Кузнецов [и др.]. — М.: Моркнига, 2019. — 412 с.
2. Кузнецов А. Л. Портоориентированная логистика: моногр. / А. Л. Кузнецов [и др.]. — М.: Моркнига, 2021. — 247 с.
3. Larsen R. B. Model predictive control for simultaneous planning of container and vehicle routes / R. B. Larsen, B. Atasoy, R. R. Negenborn // European Journal of Control. — 2021. — Vol. 57. — Pp. 273–283. DOI: 10.1016/j.ejcon.2020.06.003.
4. Santos T. A. The impact of container terminal relocation on hinterland geography / T. A. Santos, P. Martins, C. G. Soares // Journal of Transport Geography. — 2021. — Vol. 92. — Pp. 103014. DOI: 10.1016/j.jtrangeo.2021.103014.
5. Костылев И. И. Совершенствование контейнерной транспортной инфраструктуры на этапе инновационного развития России / И. И. Костылев, Э. К. Блинов // Транспорт Российской Федерации. — 2008. — № 5 (18). — С. 46–49.
6. Wong E. Y. C. Container drayage modelling with graph theory-based road connectivity assessment for sustainable freight transportation in new development area / E. Y. C. Wong, A. H. Tai, S. So // Computers & Industrial Engineering. — 2020. — Vol. 149. — Pp. 106810. DOI: 10.1016/j.cie.2020.106810.
7. Mühlbauer F. A parallelised large neighbourhood search heuristic for the asymmetric two-echelon vehicle routing problem with swap containers for cargo-bicycles / F. Mühlbauer, P. Fontaine // European Journal of Operational Research. — 2021. — Vol. 289. — Is. 2. — Pp. 742–757. DOI: 10.1016/j.ejor.2020.07.034.
8. Yang X. Combined strip and discharge delivery of containers in heterogeneous fleets with time windows / X. Yang, H. A. Daham, A. Salhi // Computers & Operations Research. — 2021. — Vol. 127. — Pp. 105141. DOI: 10.1016/j.cor.2020.105141.
9. Тумова Т. С. Организация транспортно-складских систем железнодорожного транспорта / Т. С. Тумова, О. Д. Покровская // Известия Петербургского университета путей сообщения. — 2018. — Т. 15. — № 3. — С. 327–343.

10. Alfandari L. Tighter MIP models for barge container ship routing / L. Alfandari, T. Davidović, F. Furini, I. Ljubić, V. Maraš, S. Martin // *Omega*. — 2019. — Vol. 82. — Pp. 38–54. DOI: 10.1016/j.omega.2017.12.002.
11. Maraš V. Routing of barge container ships by mixed-integer programming heuristics / V. Maraš, J. Lazić, T. Davidović, N. Mladenović // *Applied Soft Computing*. — 2013. — Vol. 13. — Is. 8. — Pp. 3515–3528. DOI: 10.1016/j.asoc.2013.03.003.
12. Kuznetsov A. L. Planning Simulation Experiments in the Tasks of Studying the Operational Strategies of Container Terminals / A. L. Kuznetsov, A. V. Kirichenko, A. D. Semenov, H. Oja // *TransNav, the International Journal on Marine Navigation and Safety of Sea Transportation*. — 2020. — Vol. 14. — No. 4. — Pp. 845–849. DOI: 10.12716/1001.14.04.08.
13. Kuznetsov A. L. Analytical Assessment of Stochastic Spread of Demand for the Port Storage Capacity / A. L. Kuznetsov, H. Oja, A. D. Semenov // *TransNav, the International Journal on Marine Navigation and Safety of Sea Transportation*. — 2020. — Vol. 14. — No. 4. — Pp. 841–844. DOI: 10.12716/1001.14.04.07.

REFERENCES

1. Kuznetsov, A. L., A. V. Kirichenko, O. V. Solyakov, and A. D. Semenov. *Morskie konteinerne perevozki: monografiya*. M.: MORKNIGA, 2019.
2. Kuznetsov, A. L., A. V. Kirichenko, O. V. Solyakov, and A. D. Semenov. *Portoorientirovannaya logistika: monografiya*. M.: MORKNIGA, 2021.
3. Larsen, Rie B., Bilge Atasoy, and Rudy R. Negenborn. “Model predictive control for simultaneous planning of container and vehicle routes.” *European Journal of Control* 57 (2021): 273–283. DOI: 10.1016/j.ejcon.2020.06.003.
4. Santos, Tiago A., P. Martins, and C. Guedes Soares. “The impact of container terminal relocation on hinterland geography.” *Journal of Transport Geography* 92 (2021): 103014. DOI: 10.1016/j.jtrangeo.2021.103014.
5. Kostylev, I. I., and E. K. Blinov. “Sovershenstvovanie konteinernoi transportnoi infrastruktury na etape innovatsionnogo razvitiya Rossii.” *Transport Rossiiskoi Federatsii* 5(18) (2008): 46–49.
6. Wong, Eugene Yin Cheung, Allen H. Tai, and Stuart So. “Container drayage modelling with graph theory-based road connectivity assessment for sustainable freight transportation in new development area.” *Computers & Industrial Engineering* 149 (2020): 106810. DOI: 10.1016/j.cie.2020.106810.
7. Mühlbauer, Ferdinand, and Pirmin Fontaine. “A parallelised large neighbourhood search heuristic for the asymmetric two-echelon vehicle routing problem with swap containers for cargo-bicycles.” *European Journal of Operational Research* 289.2 (2021): 742–757. DOI: 10.1016/j.ejor.2020.07.034.
8. Yang, Xinan, Hajem A. Daham, and Abdellah Salhi. “Combined strip and discharge delivery of containers in heterogeneous fleets with time windows.” *Computers & Operations Research* 127 (2021): 105141. DOI: 10.1016/j.cor.2020.105141.
9. Titova, Tamila S., and Oksana D. Pokrovskaya. “Organization of railroad storage-retrieval systems.” *Proceedings of Petersburg Transport University* 15.3 (2018): 327–343.
10. Alfandari, Laurent, Tatjana Davidović, Fabio Furini, Ivana Ljubić, Vladislav Maraš, and Sébastien Martin. “Tighter MIP models for barge container ship routing.” *Omega* 82 (2019): 38–54. DOI: 10.1016/j.omega.2017.12.002.
11. Maraš, Vladislav, Jasmina Lazić, Tatjana Davidović, and Nenad Mladenović. “Routing of barge container ships by mixed-integer programming heuristics.” *Applied Soft Computing* 13.8 (2013): 3515–3528. DOI: 10.1016/j.asoc.2013.03.003.
12. Kuznetsov, A. L., A. V. Kirichenko, A. D. Semenov, and H. Oja. “Planning Simulation Experiments in the Tasks of Studying the Operational Strategies of Container Terminals.” *TransNav, the International Journal on Marine Navigation and Safety of Sea Transportation* 14.4 (2020): 845–849. DOI: 10.12716/1001.14.04.08.
13. Kuznetsov, A. L., H. Oja, and A. D. Semenov. “Analytical Assessment of Stochastic Spread of Demand for the Port Storage Capacity.” *TransNav, the International Journal on Marine Navigation and Safety of Sea Transportation* 14.4 (2020): 841–844. DOI: 10.12716/1001.14.04.07.

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

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

Кириченко Александр Викторович —

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

Семенов Антон Денисович —

диспетчер
ООО «Логистический парк «Янино»
Российская Федерация, Ленинградская область,
Всеволожский район, д. Янино-1,
Торгово-логистическая зона «Янино-1», № 1
e-mail: asemyonov054@gmail.com

Kirichenko, Aleksandr V. —

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: KirichenkoAV@gumrf.ru

Semenov, Anton D. —

Dispatcher
Yanino Logistics Park LLC
Vsevolozhsky District, Yanino-1 village,
Trade and logistics zone Yanino-1, No. 1,
Leningrad Region, Russian Federation
e-mail: asemyonov054@gmail.com

Статья поступила в редакцию 11 мая 2021 г.

Received: May 11, 2021.

ВОДНЫЕ ПУТИ СООБЩЕНИЯ И ГИДРОГРАФИЯ

DOI: 10.21821/2309-5180-2021-13-3-384-398

VARIATIONS IN SEA-ICE CONCENTRATION OF THE LONG STRAIT DURING THE SUMMER-FALL NAVIGATION SEASONS IN 1993–2018

A. V. Kholoptsev^{1,2}, S. A. Podporin¹

¹ — Sevastopol State University, Sevastopol, Russian Federation

² — Sevastopol branch of FSBI “N. N. Zubov’s State Oceanographic Institute”, Sevastopol, Russian Federation

As global climate warming progresses, the arctic ice declines thus bringing new possibilities for arctic shipping. The new transport strategy of Russia dictates rapid growth of cargo transportation along the Northern Sea Route within the next two decades, which requires constant monitoring and assessment of sea ice dynamics in the Russian Arctic. Extensive research has been done for its western part (the Kara Sea and the Barents Sea), however scarce data is available for its eastern parts including the Laptev and East-Siberian seas. The issues of safe navigation along the Northern Sea Route are considered in the paper. An emphasis is made on one of its key seaways — the Long Strait, which connects the East-Siberian and the Chukchi seas. The aim of the research is to study variations in sea-ice concentration during the summer-fall navigation seasons in 1993–2018 and identify ice hazards for vessels transiting the strait. Sea ice dynamics is studied for both 1993–2018 and 2015–2018 periods. As source data, satellite monitoring and global ocean reanalysis databases are used. GLORYS12.v1 is preferred as the main reanalysis database since it contains the most extensive data on the Arctic waters. Its results were tested prior to the research and found adequate for the task. A consistent trend for the sea ice concentration decline has been revealed throughout the strait in the summer-fall months of 1993–2018 periods. Risks of encountering sea ice with unacceptable characteristics (as per ship ice class limitations) tend to decrease everywhere. It has been shown that August, September, and October remain ice-free, hence no ice breaking assistance is needed for ships transiting the strait during this period. Situation is somewhat different in July and November. Risks of encountering dangerous ice tend to rise when navigation in westerly direction. In July, the most favorable conditions for shipping exist along the coast of the Chukchi Peninsula. This is not the case for November, when it is safer to navigate along the southern coast of the Vrangeli Island. Temporal worsening of the ice situation has been revealed in the strait in 1998–2001 and 2010–2013. During these periods ice risks increase by up to 20 % for both July and November causing minor hazards for navigation therein. No such trends have been found in the most recent analyzed period — 2015–2018. The situation, however, requires to be further monitored to predict potential ice-related hazards in the future.

Keywords: Long Strait, Northern Sea Route, probability, ice concentration, trend, hazard, reanalysis.

For citation:

Kholoptsev, Aleksandr V., and Sergey A. Podporin. “Variations in sea-ice concentration of the Long strait during the summer-fall navigation seasons in 1993–2018.” *Vestnik Gosudarstvennogo universiteta morskogo i rechnogo flota imeni admirala S. O. Makarova* 13.3 (2021): 384–398. DOI: 10.21821/2309-5180-2021-13-3-384-398.

УДК 656.61.052: 551.583

ИЗМЕНЕНИЯ СПЛОЧЕННОСТИ ЛЕДЯНОГО ПОКРОВА ПРОЛИВА ЛОНГА В ЛЕТНЕ-ОСЕННИЕ МЕСЯЦЫ 1993–2018 гг.

А. В. Холопцев^{1,2}, С. А. Подпорин¹

¹ — ФГАОУ ВО «Севастопольский государственный университет», Севастополь, Российская Федерация

² — Севастопольское отделение ФГБУ «Государственный океанографический институт имени Н. Н. Зубова», Севастополь, Российская Федерация

Исследована пространственная и межгодовая изменчивость сплоченности ледяного покрова пролива Лонга в летне-осенний навигационный период 1993–2018 гг. Для всех месяцев указанного периода оце-

ны вероятности образования льда с характеристиками, превышающими ограничения по ледовому классу, представлены их распределения и тенденции изменения. Отдельно рассмотрены особенности изменений сплоченности ледяного покрова в 2015–2018 гг. Для исследования использованы результаты спутникового мониторинга состояния ледяного покрова и данные реанализа GLORYS12.v1. Сравнение результатов фактических измерений с данными реанализа показало приемлемую точность последнего и возможность его дальнейшего применения для оценки динамики изменений ледяного покрова в проливе Лонга. В период 1993–2018 гг. выявлена устойчивая тенденция к сокращению сплоченности ледяного покрова в летне-осенний навигационный период. Показано, что риски для судоходства, связанные с возможностью появления льда, с характеристиками, превышающими допустимые по ледовому классу, снижаются по всей акватории пролива. Доступный период безледокольной навигации с августа по октябрь постепенно увеличивается. Установлено, что в июле и ноябре вероятность встретить опасный лед в проливе уменьшается по мере продвижения с востока на запад. Отмечается, что в июле наблюдаются наиболее благоприятные условия для судоходства на маршруте вдоль побережья полуострова Чукотка, а в ноябре безопаснее всего выполнять переходы вдоль южного берега острова Врангеля. В 1998–2001 гг. и 2010–2013 гг. в ноябре и июле в проливе зафиксированы временные ухудшения ледовой обстановки и увеличение ледовых рисков (до 20 %), которые не оказали существенного влияния на условия навигации. В современном периоде (2015–2018 гг.) тенденций к ухудшению ледовой обстановки выявлено не было.

Ключевые слова: пролив Лонга, Северный Морской путь, вероятность, сплоченность ледяного покрова, тенденция, риск, реанализ.

Для цитирования:

Холопцев А. В. Изменения сплоченности ледяного покрова пролива Лонга в летне-осенние месяцы 1993–2018 гг. / А. В. Холопцев, С. А. Подпорин // Вестник Государственного университета морского и речного флота имени адмирала С. О. Макарова. — 2021. — Т. 13. — № 3. — С. 384–398. DOI: 10.21821/2309-5180-2021-13-3-384-398.

Введение (Introduction)

Развитие судоходства по Северному морскому пути (СМП) является важнейшим приоритетом транспортной стратегии Российской Федерации в Арктике. Согласно Указу Президента «О национальных целях и стратегических задачах развития Российской Федерации на период до 2024 года» от 7 мая 2018 г., общий грузооборот по СМП должен к 2024 г. вырасти до 80 млн т¹. Для достижения этого показателя необходим комплекс мер, направленных в первую очередь на ввод в эксплуатацию нового ледокольного флота, стимулирование транзитного судоходства, развитие инфраструктуры арктических портов, усовершенствование навигационно-гидрографического обеспечения трасс СМП. Вместе с тем сложная ледовая обстановка является основным препятствием для обеспечения бесперебойного судоходства.

Изменения глобального климата, вызывающие сокращение ледяного покрова Арктики в последние три десятилетия, являются благоприятными для арктического судоходства [1]. Ряд авторов дают смелые прогнозы по вопросу открытия высокоширотных, в том числе трансполярных, маршрутов для транзитных судов уже к середине XXI в. [2]–[4]. Вместе с тем в работе [4] отмечается существенная неопределенность подобных оценок из-за сложности полноценного учета всех климатических факторов. Как показано в работе [5], в настоящее время наибольшая плотность транспортных потоков в летне-осенний навигационный период по-прежнему наблюдается вдоль прибрежных трасс СМП, проходящих через проливы Вилькицкого, Санникова или Дмитрия Лаптева и Лонга. Часть судов (в основном крупнотоннажных с высоким ледовым классом) предпочитают частично использовать высокоширотные участки с обходом Новосибирских островов с севера, минуя пролив Санникова, что, как показано в работах [6], [7], вполне обоснованно. Тем не менее прохождение транзитными судами проливов Вилькицкого и Лонга пока остается практически безальтернативным.

В настоящей работе исследуется участок трассы СМП, проходящий по проливу Лонга, который соединяет Восточно-Сибирское и Чукотское моря и отделяет остров Врангеля от материковой части России. Его длина составляет 128 км, а наименьшая ширина — 146 км. Условия для судоходства

¹ Указ «О национальных целях и стратегических задачах развития Российской Федерации на период до 2024 года». [Электронный ресурс]. Режим доступа: <http://www.kremlin.ru/events/president/news/57425> (дата обращения: 01.03.2021).

в проливе во многом определяются ледовой обстановкой. Акватория пролива обычно доступна для навигации с июля по ноябрь, когда суммарная площадь ледяного покрова достигает наименьших уровней [1]. В результате современного потепления климата Арктики на участках акватории пролива, расположенных вдоль побережья полуострова Чукотка, все чаще возникают ледовые условия, при которых возможна безледокольная навигация.

Публикации, описывающие актуальное состояние пролива Лонга в свете происходящих климатических изменений, немногочисленны. Вопросы доступности района для судоходства в различные сезоны рассмотрены в работах [8], [9]. Отмечается, что основную сложность представляют образующиеся в непосредственной близости от острова Врангеля Айонский и Врангелевский ледяные массивы. В зимне-весенний период они практически непроходимы для коммерческих судов. В летне-осенние месяцы их объем и площадь значительно сокращаются, однако на участках судоходных трасс могут встречаться нарастающие ледяные поля и отдельные льдины, представляющие опасность для судоходства. В этой связи в работе [1] отмечается, что несмотря на существенное уменьшение сплоченности ледяного покрова в летне-осенний период в течение последних двух десятилетий, дисперсия этого показателя возросла, что, в свою очередь, затрудняет выработку средне- и долгосрочных прогнозов по доступности пролива для беспрепятственного транзита.

В работе [10] исследуются изменения сроков устойчивого ледообразования по трассам СМП в начале XXI в. по сравнению со второй половиной XX в. В районах, прилегающих к проливу Лонга, в современном периоде отмечаются сдвиг указанных сроков вперед в среднем на две-три декады и увеличение вследствие этого навигационного периода. Однако, как и в случае со сплоченностью, авторы обращают внимание на возрастающую неопределенность (аномалии) дат начала ледообразования и, как следствие, на сложность их прогнозирования.

Анализ научных публикаций показывает, что закономерности пространственной и временной изменчивости характеристик ледяного покрова в различные месяцы в проливе Лонга изучены недостаточно. Поэтому их адекватный учет при планировании судоходства в данном районе проблематичен. Согласно действующим правилам плавания по СМП¹, на его акваторию допускаются суда, имеющие соответствующие классы ледовых усилений. Последние определяют допустимые характеристики преодолеваемого льда: толщину и сплоченность. В этой связи практический интерес представляет определение вероятностей встречи судов определенных ледовых классов со льдом, превышающим допустимые характеристики при прохождении конкретного участка трассы СМП.

Целью настоящей статьи является оценка характеристик пространственной и временной изменчивости сплоченности ледяного покрова пролива Лонга в летне-осенние месяцы и определение на этой основе вероятностей образования льда с характеристиками, превышающими ограничения по ледовому классу. Для достижения указанной цели рассмотрены следующие задачи:

- 1) определение вероятностей появления на различных участках акватории пролива Лонга льда, сплоченность которого превышает ограничения по ледовому классу для каждого месяца летне-осеннего навигационного периода;
- 2) оценка средних скоростей изменения указанных вероятностей за период 1993–2018 гг. по всей акватории пролива, а также выявление наиболее мощных короткопериодных составляющих их энергетического спектра;
- 3) выявление особенностей распределения найденных вероятностей по акватории пролива Лонга за период 2015–2018 гг. и определение средних значений меридиональной и зональной составляющих их градиента.

Методы и материалы (Methods and Materials)

В настоящем исследовании в качестве фактического материала использованы результаты мониторинга сплоченности ледяного покрова (далее — СЛП) в проливе Лонга. Наблюдения за из-

¹ Правила плавания в акватории Северного морского пути (утверждены постановлением Правительства Российской Федерации от 18 сентября 2020 г. № 1487). [Электронный ресурс]. Режим доступа: http://www.nsra.ru/ru/ofitsialnaya_informatsiya/pravila_plavaniya.html (дата обращения: 01.03.2021).

менениями этого показателя в период 1934–1995 гг. велись на полярной станции Мыс Шмидта (68,9° с. ш., 179,5° з. д.), которая в настоящее время ликвидирована. В современном периоде наблюдения выполняются с судов, следующих по проливу, а также полярной авиацией. Начиная с 1987 г. основным методом наблюдений является спутниковый мониторинг [11], [12]. Погрешность спутниковых измерений, по данным [13]–[15], достигает 10 %. В июле (при таянии ледяного покрова) и октябре–ноябре (при его формировании) эта погрешность может достигать 50 % [13], [15]–[18]. На прибрежных участках акваторий погрешности также возрастают.

Невысокая изначальная точность спутниковой информации требует дополнительной ее обработки с помощью специализированных алгоритмов (например, NASA Team (NT), NASA Team 2 (NT2), Bootstrap и др.) [19]. Получаемые в итоге оценки значений СЛП имеют дискретность семь суток [20]. Наиболее полный архив таких оценок по Северному Ледовитому океану сформирован в рамках проекта Всемирной метеорологической организации «Глобальный банк цифровых данных по морскому льду» (ГБЦДМЛ). Основу архива образуют ледовые карты отдельных акваторий Арктики, предоставляемые национальными ледовыми службами России (ранее СССР), Дании, Канады и США. При построении карт применяются форматы SIGRID¹, в которых данные представлены по узлам координатной сетки 0,25° × 0,25°.

Периодичность обновления указанной информации не позволяет использовать ее для непосредственной оценки вероятностей появления льдов с характеристиками СЛП, превышающими допустимые по ледовому классу пределы (для краткости указанные вероятности далее обозначены ВЛ). Единственным методом, позволяющим оценивать СЛП на любых участках арктических акваторий для каждого суток (в том числе минувших), является *математическое моделирование*. Для суток, в которые велись фактические измерения, указанный метод способен обеспечить оптимальную интерполяцию их результатов в любых пунктах изучаемой акватории. Для суток, когда измерения не проводились, метод позволяет осуществить оптимальное восполнение пропусков.

Результаты математического моделирования СЛП в любых районах Мирового океана применяются для их *ретроспективного анализа* (реанализа). Для верификации соответствующих математических моделей могут применяться результаты фактических измерений СЛП из баз ГБЦДМЛ, используемые также для оценки погрешностей реанализа. Одним из наиболее точных реанализов по СЛП Арктики является GLORYS12.v1 (Global Ocean Physics Reanalysis), основанный на океанических моделях семейства NEMO [21] и поддерживаемый сервисом Copernicus². Данные по льду в нем доступны с 01.01.1993 г. с разрешением по времени 1 сут, по координатам 5 угл. мин (шаг по меридиану составляет приблизительно 8 км). Для уменьшения дисперсии ошибок моделирования в реанализе использован *фильтр Калмана*.

Реанализ GLORYS12.v1 использован в настоящей работе в качестве основного источника данных о среднесуточных значениях СЛП в проливе Лонга. Предварительная проверка достоверности его результатов путем сравнения их с информацией из архива ГБЦДМЛ показала удовлетворительное соответствие для всех пунктов изучаемого района. Из реанализа были взяты данные по акватории пролива между параллелями 71,00–68,25° с. ш. и меридианами 177,83 в. д.–176,25 з. д. Всего в исследуемый участок вошло 34 параллели (на каждой по 72 пункта) с шагом 0,08333°. Данные реанализа доступны на каждые сутки любого месяца, что позволило использовать их при расчете ВЛ для всех участков акватории пролива и любых значений СЛП.

Оценка средних значений ВЛ при решении первой задачи проводилась для всех месяцев с июля по ноябрь периода 1993–2018 гг. и всех пунктов изучаемого района, расположенных в узлах координатной сетки GLORYS12.v1. Исследование выполнялось для значений сплоченности из ряда 0,3; 0,4 ... 0,9, что примерно соответствует уровням СЛП, используемым при описании ледовых классов судов. По результатам, полученным для всех пунктов акватории, месяцев и значений СЛП, сформированы временные ряды ВЛ, состоящие из 26 членов.

¹ AARI WDC Sea Ice file server. [Электронный ресурс]. Режим доступа: <http://wdc.aari.ru/wmo/docs/sigrid/> (дата обращения: 01.03.2021).

² Global Ocean Physics Reanalysis. [Электронный ресурс]. Режим доступа: https://resources.marine.copernicus.eu/?option=com_csw&view=details&product_id=GLOBAL_REANALYSIS_PHY_001_030 (дата обращения: 03.03.2021).

При решении второй задачи использовалась методика, представленная в работе [22]. Для каждого полученного ряда вычислялись амплитуды гармоник его энергетического спектра. Выявлено, что наиболее мощная гармоника для всех рядов составляет период 2–4 года. Поэтому сглаживание временных рядов осуществлялось в скользящем окне длиной 4 года. Полученные при этом сглаженные ряды для каждого месяца, уровня СЛП и пункта акватории пролива использовались для вычисления средней скорости изменения ВЛ (далее — ССВЛ). Распределения ССВЛ по акватории пролива отображались на контурных картах с использованием триангуляции Делоне.

При решении третьей задачи для каждого месяца периода 2015–2018 гг. и уровня СЛП вычислялись средние значения ВЛ для всей акватории пролива. Полученные результаты отображались на контурной карте и использовались для нахождения средних значений меридиональных и зональных проекций градиентов ВЛ, представленных в табличной форме.

Результаты (Results)

В рамках решения первой задачи получены ряды, отражающие изменения ВЛ по всем пунктам акватории пролива Лонга в период 1993–2018 гг. В качестве примера на рис. 1 приведены изменения ВЛ, соответствующие СЛП = 0,6 для одного из пунктов изучаемой акватории с июля по ноябрь.

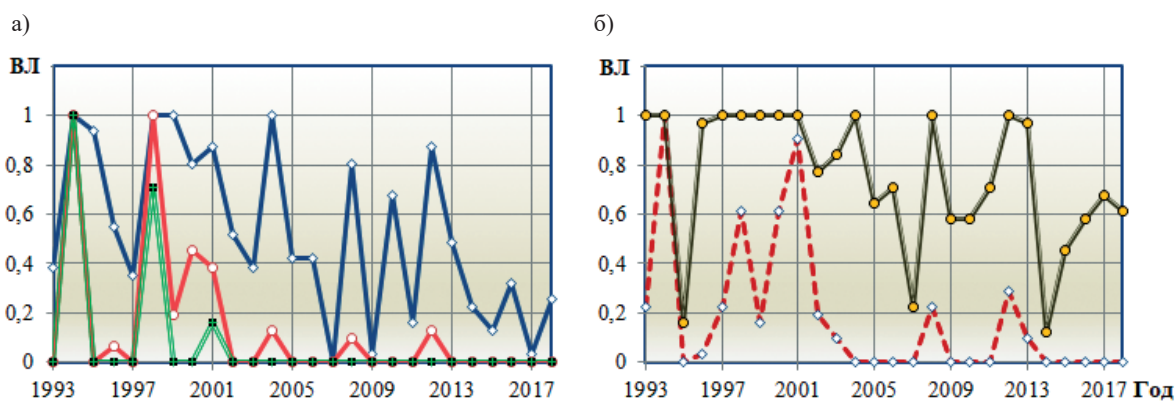


Рис. 1. Изменения ВЛ в точке с координатами $70^{\circ}10'$ с. ш. $178^{\circ}03'$ в. д. в 1993–2018 гг. для сплоченности 0,6: а — лето; б — осень

Условные обозначения:

— июль; — август; — сентябрь; — октябрь; — ноябрь

Из рис. 1 следует, что многолетние изменения ВЛ представляют собой сложные колебания, в которых присутствует мощная короткопериодная составляющая с периодом 2–4 года. Аналогичные особенности выявлены и для остальных участков пролива при различных СЛП. После сглаживания в скользящем окне длиной четыре года были получены временные ряды ВЛ, представленные на рис. 2 для той же точки пролива, что свидетельствует об убывающем тренде для всех месяцев.

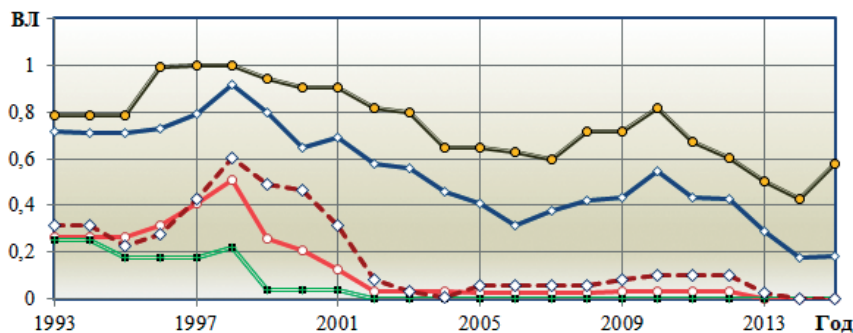


Рис. 2. Изменения ВЛ в точке с координатами $70^{\circ}10'$ с. ш. $178^{\circ}03'$ в. д. в 1993–2018 гг., сглаженные в скользящем четырехлетнем окне

Условные обозначения:

— июль; — август; — сентябрь; — октябрь; — ноябрь

Видно также, что зависимости, соответствующие июлю, октябрю и ноябрю, не являются монотонными, в них присутствуют максимумы, соответствующие временным отрезкам 1998–2001 гг. и 2010–2013 гг. Данная особенность проявляется в зависимостях, полученных как для любых иных значений СЛП, так и для других участков акватории пролива. Из рис. 1 и 2 следует также, что в 2015–2018 гг. значения ВЛ при СЛП = 0,6 отличны от нуля лишь в июле и ноябре. Такие же выводы справедливы и для иных СЛП в интервале 0,3–0,9. Адекватность полученных результатов проверялась по картам-схемам фактической ледовой обстановки в Чукотском море, построенным по данным мониторинга¹. В качестве примера на рис. 3 приведены карты-схемы для следующих временных периодов: 2–3.11.2015 г., 16–17.11.2015 г., 2–3.12.2015 г. и 30–31.08.2016 г.

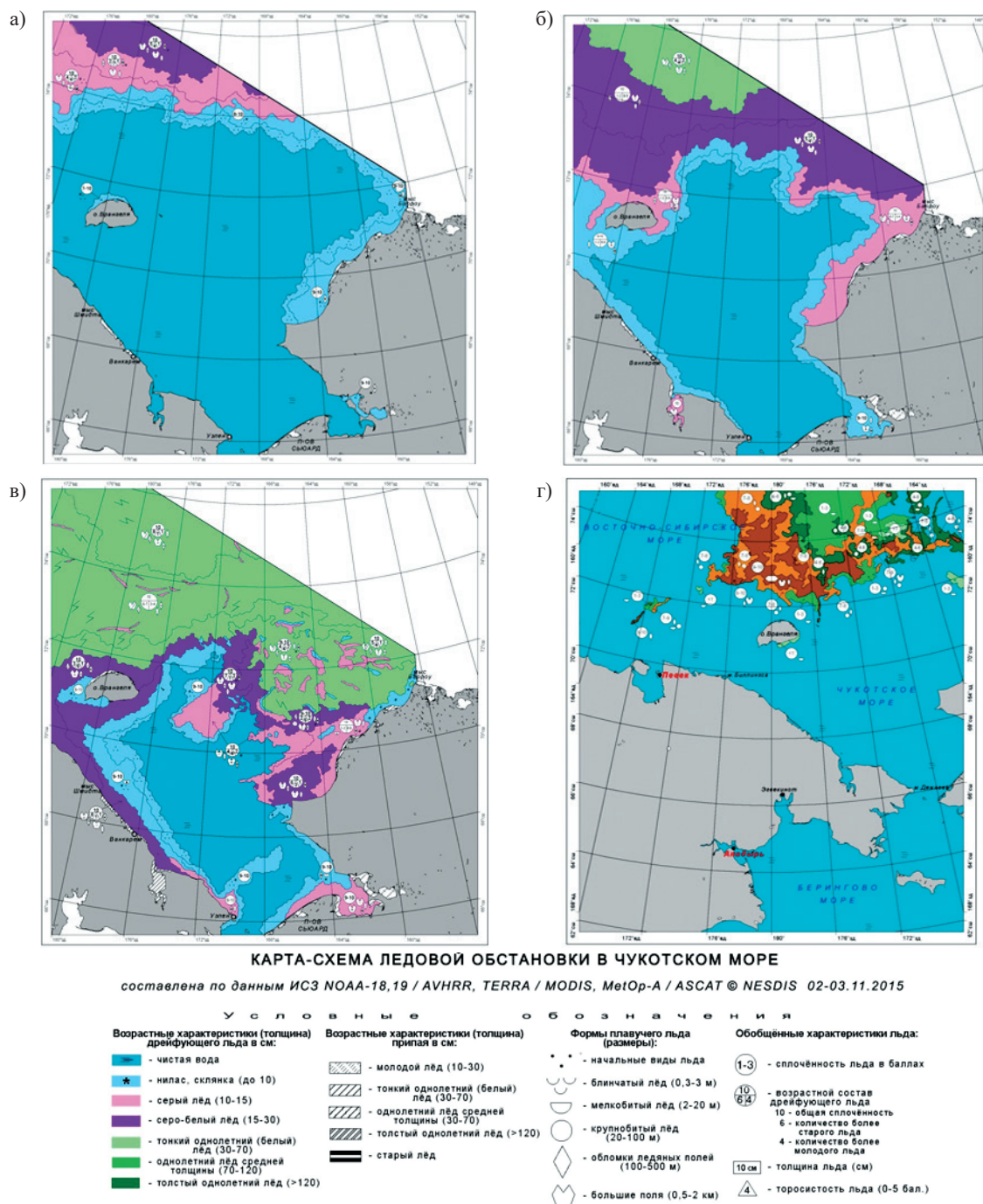


Рис. 3. Карта-схема ледовой обстановки в Чукотском море для временных периодов
а — 2–3.11.2015; б — 16–17.11.2015; в — 2–3.12.2015; г — 30–31.08.2016

¹ Карты-схемы ледовой обстановки в Чукотском море [Электронный ресурс]. Режим доступа: <http://planeta.infospace.ru/prod-cgi/last.pl?product=120> (дата обращения: 03.03.2021).

Из рис. 3, а следует, что 2–3 ноября 2015 г. вся акватория пролива Лонга и районов Арктики, по которым проходит высокоширотный маршрут СМП, была полностью свободна от ледяного покрова. На рис. 3, б показано, что 16–17 ноября в западной части акватории пролива ледяной покров наблюдался в форме ниласа и склянки толщиной до 10 см. Ледяной покров районов Восточно-Сибирского и Чукотского морей, по которым проходит высокоширотный маршрут СМП, состоял из серого льда толщиной до 15 см и серо-белого льда толщиной до 30 см. Из рис. 3, в следует, что 2–3 декабря 2015 г. весь вход в пролив Лонга со стороны Восточно-Сибирского моря уже был перекрыт серо-белым льдом толщиной до 30 см, однако в восточной части его акватории преобладали нилас и склянка. Необходимо отметить, что в западной части акватории пролива, расположенной вдоль южного берега острова Врангеля, ледяной покров был также образован ниласом и склянкой. Сравнение рис. 3, а и 3, в позволяет сделать вывод о том, что процесс образования льда в проливе Лонга в 2015 г. происходил в течение ноября. Аналогичная картина имела место и в последующие годы. Рис. 3, г свидетельствует о том, что 30–31 августа 2016 г. ледяной покров в изучаемом районе отсутствовал, как в сентябре и октябре. Подобная картина наблюдалась и в 2015, 2017 и 2018 гг. Таким образом, данные, представленные на рис. 3, могут служить подтверждением адекватности информации базы данных GLORYS12.v1.

При решении второй задачи оценивались средние скорости изменений ВЛ. В качестве примера на рис. 4 показаны распределения ССВЛ в июле и ноябре при СЛП 0,3 и 0,6.

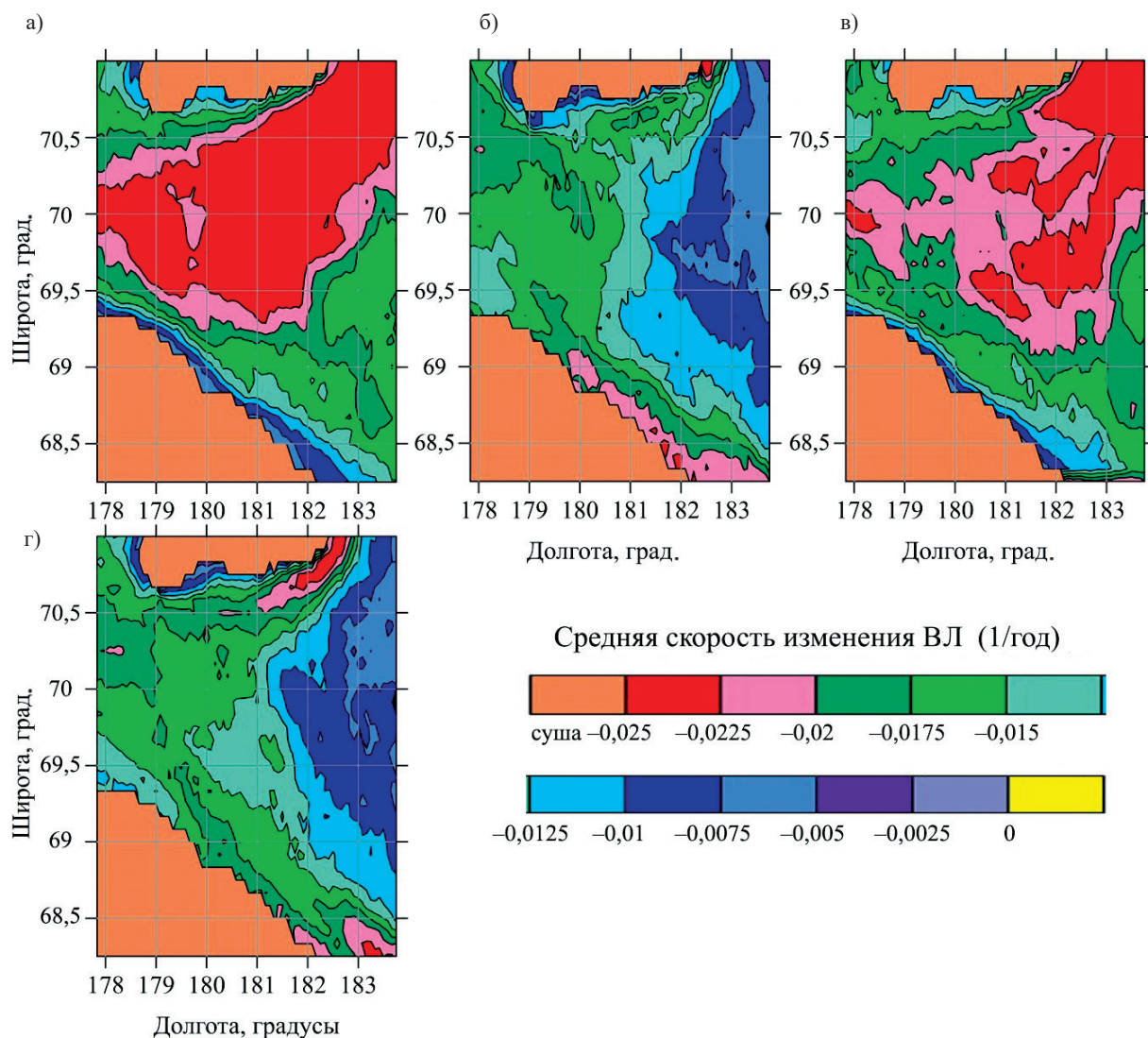


Рис. 4. Распределения средних скоростей изменения ВЛ в проливе Лонга в 1993–2018 гг.: а — июль, СЛП = 0,6; б — ноябрь, СЛП = 0,6; в — июль, СЛП = 0,3; г — ноябрь, СЛП = 0,3

Из рис. 4 следует, что в ноябре и в июле везде преобладала тенденция к снижению ВЛ. Распределения ССВЛ для каждого месяца при иных значениях СЛП были схожими. Из рис. 4, *а* и *в*, видно, что ВЛ для ледяного покрова любой сплоченности в июле в северной части пролива уменьшались быстрее, чем в южной. При этом в Чукотском море они уменьшались быстрее, чем в Восточно-Сибирском. Максимальные ССВЛ в июле (более $0,03 \text{ год}^{-1}$) в пределах изучаемого района соответствовали участкам акватории Чукотского моря с координатами $71^\circ \text{ с. ш.}, 177,17^\circ \text{ з. д.}$ (для СЛП = 0,6) и $70,75^\circ \text{ с. ш.}, 177,17^\circ \text{ з. д.}$ (для СЛП = 0,3). В то же время на рис. 4, *б* и *г* видно, что при любом значении СЛП значения ВЛ для ноября в северной части пролива снижались медленнее, чем в южной. В Чукотском море (так же, как и в июле) этот процесс происходил быстрее, чем в Восточно-Сибирском. Максимальные ССВЛ для ноября достигали тех же уровней, что и в июле, но на участках акватории, расположенных непосредственно у материкового побережья Чукотского моря.

В рамках решения третьей задачи для всех участков акватории пролива Лонга за 2015–2018 гг. были вычислены средние значения ВЛ, соответствующие каждому месяцу летне-осеннего навигационного периода и разным значениям СЛП. На рис. 5 представлены распределения ВЛ в июле и ноябре.

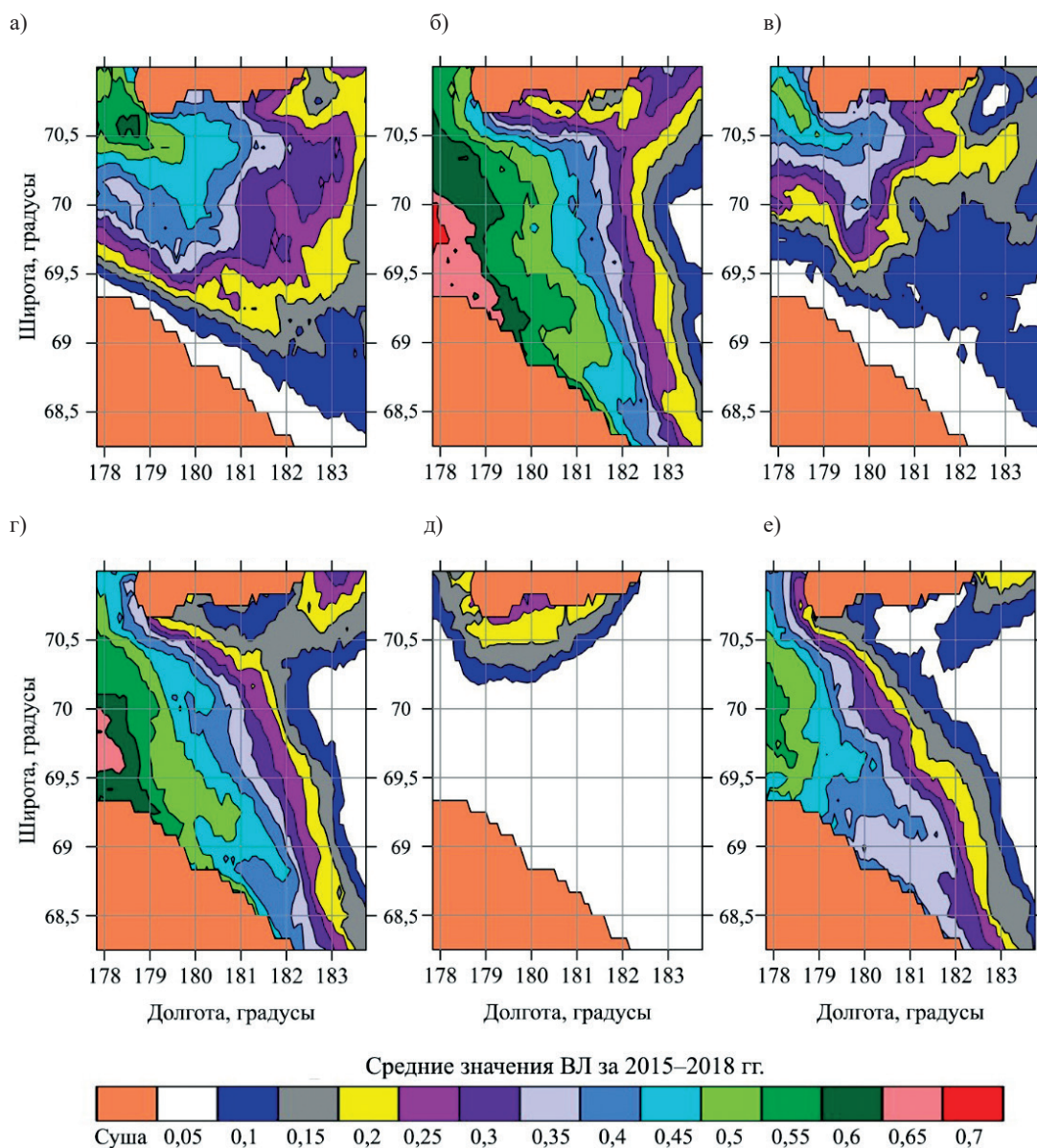


Рис. 5. Распределения средних скоростей изменения ВЛ в проливе Лонга в 2015–2018 гг.:

а — июль, СЛП = 0,4; *б* — ноябрь, СЛП = 0,4; *в* — июль, СЛП = 0,6;

г — ноябрь, СЛП = 0,6; *д* — июль, СЛП = 0,8; *е* — ноябрь, СЛП = 0,8

Как видно из рис. 5, а, в и д, выполненная оценка за 2015–2018 гг. июльских значений средних ВЛ для различных участков акватории пролива позволяет сделать следующие выводы:

- значения убывали по мере уменьшения широты и изменения долготы в западном направлении;
- значения ВЛ на участках Восточно-Сибирского моря у входа в пролив при любых СЛП были заметно больше, чем на участках Чукотского моря, расположенных на той же широте;
- значения данных показателей всюду монотонно убывали по мере увеличения СЛП.
- на участках акватории пролива, расположенных непосредственно вдоль арктического побережья Чукотки, значения ВЛ не превышали 0,016, 0,01 и 0 для СЛП, равных 0,4, 0,6 и 0,8 соответственно (последнее позволяет сделать вывод о том, что в современном периоде июльский ледяной покров в прибрежной части пролива Лонга отсутствует полностью или значительно разрежен).

Из рис. 5, б, г и е следует, что выполненная оценка за 2015–2018 гг. средних значений ВЛ для ноября на различных участках акватории пролива позволяет сделать вывод о том, что при любых значениях СЛП убывали по мере увеличения широты и изменения долготы в западном направлении. Вместе с тем на участках акватории Восточно-Сибирского моря у входа в пролив при любых значениях СЛП значения ВЛ были заметно больше, чем для участков акватории Чукотского моря, расположенных на тех же параллелях. На участках, расположенных непосредственно вдоль арктического побережья Чукотки, значения ВЛ для ноября превышали 0,516, 0,42 и 0,35 при значениях СЛП 0,4, 0,6 и 0,8 соответственно. В то же время на участках, расположенных вдоль южного берега острова Врангеля, ноябрьские значения ВЛ не превышали 0,2, 0,1 и 0,05 при тех же значениях СЛП. Выполненные оценки свидетельствуют о том, что на маршруте, проходящем вдоль южного берега острова Врангеля в 2015–2018 гг., сплоченные льды в ноябре встречались значительно реже, чем у северного побережья Чукотки.

Оценки средних по акватории пролива Лонга значений меридиональной и зональной проекций градиента ВЛ для июля и ноября 2015–2018 гг. представлены в таблице.

**Меридиональные и зональные проекции градиента ВЛ
для июля и ноября 2015–2018 гг.**

Сплоченность льда	Меридиональные проекции		Зональные проекции	
	Июль	Ноябрь	Июль	Ноябрь
0,3	0,01622	–0,00811	–0,00281	–0,00811
0,4	0,01531	–0,00819	–0,00275	–0,00815
0,5	0,01429	–0,00932	–0,00254	–0,00819
0,6	0,01327	–0,01046	–0,00232	–0,00823
0,7	0,00921	–0,01023	–0,00155	–0,00786
0,8	0,00515	–0,00999	–0,00078	–0,00749
0,9	0,00313	–0,00953	–0,00023	–0,00713

На основании табличных данных можно сделать вывод о том, что средние значения за 2015–2018 гг. ВЛ в проливе Лонга для июля возрастали по мере увеличения широты. Скорость этого процесса была тем больше, чем меньше СЛП. Из таблицы также видно, что средние за 2015–2018 гг. значения ВЛ для ноября, по мере увеличения широты, возрастали. Скорость этого процесса максимальна при СЛП более 0,6, что соответствует представлениям о закономерностях происходящего в ноябре ледообразования [23]. В июле ледяной покров Чукотского моря разрушался быстрее, а в ноябре ледообразование происходило менее интенсивно, чем аналогичные процессы в Восточно-Сибирском море.

Обсуждение (Discussion)

Результаты решения первой задачи в целом подтверждают существующие представления о влиянии глобального потепления климата на изменения ледяного покрова Арктики. Наличие убывающих трендов в изменениях СЛП любых ее районов описаны в работах многих авторов [1], [10], [23].

Не является неожиданным также присутствие в межгодовых изменениях ВЛ составляющей с периодом 2–4 года, характерной для изменения поверхностных температур многих регионов Мирового океана. Тем не менее упоминаний о существенном увеличении ВЛ в проливе Лонга в июле, октябре и ноябре, имевшем место в 1998–2001 и 2010–2013 гг., в литературе нет.

Результаты, полученные в рамках решения второй задачи, позволяют предположить, что если в будущем современные тенденции изменения ледяного покрова сохранятся, то в июле наиболее быстрое снижение СЛП будет происходить в северо-восточной части пролива и прилегающих к нему районах Чукотского моря. В августе–октябре льда в проливе не будет, а в ноябре ССВЛ максимально быстро будут уменьшаться у северного и южного побережий пролива. Ледяной покров на прилегающих к проливу акваториях Чукотского моря в июле будет разрушаться быстрее, а в ноябре формироваться позже, чем на аналогичных акваториях Восточно-Сибирского моря.

Результаты решения третьей задачи также являются вполне прогнозируемыми. Представленное в табличной форме распределение градиентов ВЛ в июле можно объяснить тем, что таяние ледяного покрова происходит в основном за счет тепла, получаемого от воды. При прочих равных условиях чем меньше СЛП, тем больше тепла приходится на единицу объема ледяного покрова и тем выше интенсивность таяния.

В рамках обсуждения следует обратить внимание на имеющиеся для судоходства риски. Они, очевидно, будут повышаться там, где наблюдается тенденция к повышению ВЛ. Из полученных результатов следует, что подобная ситуация имела место в 1998–2001 гг. и 2010–2013 гг. Оценим далее их динамику и степень влияния на судоходство.

Для каждого участка изучаемого района оценим значения показателей Δ_1 и Δ_2 , определяемых соотношениями:

$$\Delta_1 = \text{ВЛ}(1998\text{--}2001) - \text{ВСЛ}(1997\text{--}2000);$$

$$\Delta_2 = \text{ВЛ}(2010\text{--}2013) - \text{ВСЛ}(2009\text{--}2012),$$

где $\text{ВЛ}(X - Y)$ — среднее значение ВЛ для определенного месяца, рассчитанное за период времени $X - Y$ гг.

Очевидно, что если для некоторого участка акватории значения ВЛ для периодов времени 1998–2001 и 2010–2013 гг. являются повышенными, то соответствующие ему значения Δ_1 и Δ_2 положительны. Распределения Δ_1 и Δ_2 по акватории пролива для июля, октября и ноября для наглядности были представлены на контурных картах с применением триангуляции Делоне. В качестве примера на рис. 6 приводятся распределения, соответствующие ноябрю и СЛП = 0,6.

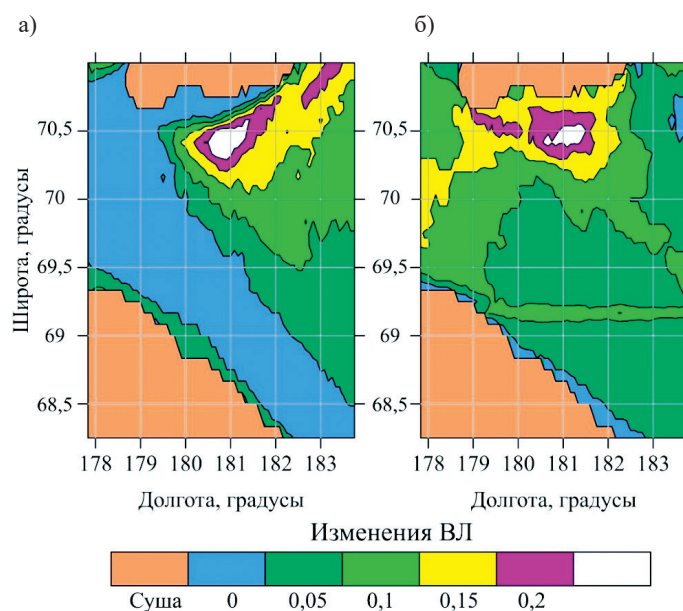


Рис. 6. Соответствующие ноябрю и СЛП = 0,6 распределения значений по акватории пролива Лонга: а — Δ_1 ; б — Δ_2

Из рис. 6 видно, что в периоды, соответствующие обоим максимумам ВЛ, повышение значений этих показателей происходило в основном на участках, расположенных в проливе Лонга и на подходах к нему. Доли участков, где в ноябре 1998–2001 и 2010–2013 гг. наблюдались повышения ВЛ, составили, соответственно, 52 % и 96 %. Участки акватории с максимальным повышением рисков для судоходства в ноябре были расположены в северной части пролива Лонга, у южного берега острова Врангеля на траверзе бухт Красина и Сомнительная (несколько восточнее линии перемены дат). В этом районе проходит один из рекомендованных маршрутов движения транзитных судов в данный сезон.

Следует отметить, что в период 2015–2018 гг. значения ВЛ, а следовательно, и риски для судоходства в ноябре на этих участках были минимальными. Аналогичный вывод справедлив и для октября. Для этого месяца доли участков, где в 1998–2001 гг. и 2010–2013 гг. наблюдались повышения ВЛ, составили, соответственно, 63 % и 88 %. Таким образом, в ноябре риски для судоходства возросли примерно на 33 % по сравнению с октябрем. Аналогичные распределения Δ_1 и Δ_2 для июля приведены на рис. 7.

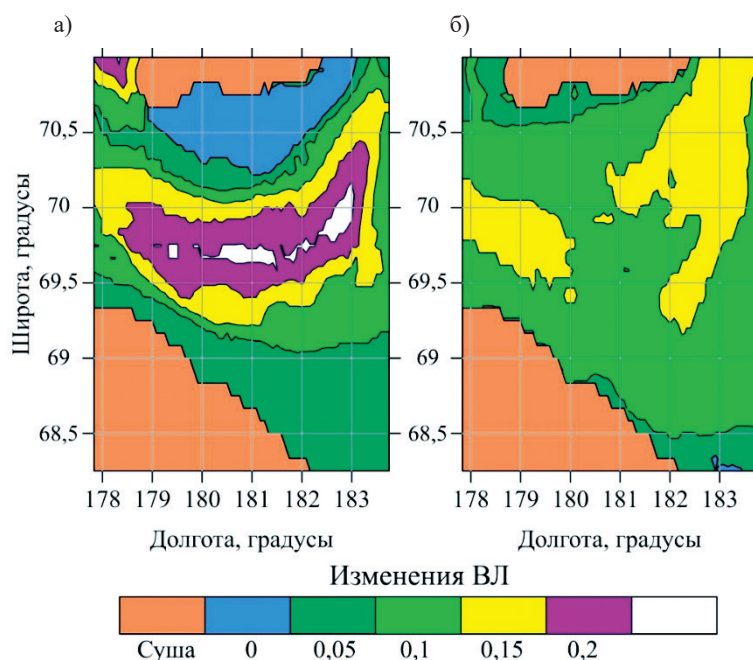


Рис. 7. Соответствующие июлю и СЛП = 0,6
распределения значений по акватории пролива Лонга: а — Δ_1 ; б — Δ_2

Данные рис. 7 свидетельствуют о том, что в обоих периодах, соответствующих максимумам многолетних изменений ВЛ в июле, повышение значений этих показателей по сравнению с предыдущими периодами произошло в основном в центральной зоне изучаемого района. При этом участки акватории, соответствующие наибольшим значениям Δ_1 и Δ_2 , располагались непосредственно в проливе, а также на прилегающих к нему акваториях Чукотского и Восточно-Сибирского морей. Доли участков акватории, где в 1998–2001 гг. и 2010–2013 гг. наблюдались повышения ВЛ, составили, соответственно, 72 % и 98 %. При этом в оба периода, когда значения ВЛ в июле достигали максимумов, существенного увеличения этих показателей на рекомендованном маршруте движения судов (вдоль арктического берега полуострова Чукотка) не наблюдалось. Поэтому происходившее в 1998–2001 гг. и 2010–2013 гг. осложнение ледовых условий в проливе Лонга на безопасность судоходства практически не повлияло.

Эффект повышения ВЛ в проливе Лонга возникал синхронно на большей части его акватории, а расположения участков, на которых он проявлялся в наибольшей степени, в 1998–2001 гг. и 2010–2013 гг. совпадали. При этом доли общего количества участков акватории, на которых эффект проявлялся, в 2010–2013 гг. заметно увеличились.

Выводы (Conclusion)

На основании проведенного исследования можно сделать следующие выводы:

1. В проливе Лонга за период 1993–2018 гг. наблюдается устойчивая тенденция к сокращению сплоченности ледяного покрова в летне-осенний навигационный период. Риски для судоходства, связанные с возможностью встретить лед с характеристиками, превышающими допустимые по ледовому классу, снижаются по всей акватории пролива. Доступный с августа по октябрь период безледокольной навигации постепенно увеличивается.
2. В июле и ноябре вероятность встретить опасный лед в проливе уменьшается по мере продвижения с востока на запад. В июле она уменьшается также по мере уменьшения широты (наиболее благоприятные условия существуют на рекомендованном пути вдоль побережья полуострова Чукотка). В ноябре ледовые риски для судов в проливе по мере уменьшения широты, наоборот, возрастают. Наиболее благоприятные условия для судоходства в этом месяце существуют у южного берега острова Врангеля.
3. В 1998–2001 гг. и 2010–2013 гг. зафиксированы временные ухудшения ледовой обстановки. Наибольшее увеличение ледовых рисков (до 20 %) имело место в ноябре у южного берега острова Врангеля (на траверзе бухты Сомнительная), а в июле — в зоне, расположенной в центральной части пролива к северу от рекомендованного маршрута, однако на условия навигации они не оказали существенного влияния.
4. Реанализ GLORYS12.v1 вполне адекватно описывает состояние ледяного покрова в проливе Лонга и может в дальнейшем использоваться при оценке тенденций его изменений.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Shibata H. Sea-ice coverage variability on the Northern Sea Routes, 1980–2011 / H. Shibata, K. Izumiya, K. Tateyama, H. Enomoto, S. Takahashi // *Annals of Glaciology*. — 2013. — Vol. 54. — Is. 62. — Pp. 139–148. DOI: 10.3189/2013AoS62A123.
2. Aksenov Y. On the Future Navigability of Arctic Sea Routes: High-resolution Projections of the Arctic Ocean and Sea Ice / Y. Aksenov, E. E. Popova, A. Yool, A. G. Nurser, T. D. Williams, L. Bertino, J. Bergh // *Marine Policy*. — 2017. — Vol. 75. — Pp. 300–317. DOI: 10.1016/j.marpol.2015.12.027.
3. Melia N. Future of the Sea: Implications from Opening Arctic Sea Routes / N. Melia, K. Haines, E. Hawkins. — Foresight, Government Office for Science, 2017. — 39 p.
4. Stephenson S. R. Marine accessibility along Russia's Northern Sea route / S. R. Stephenson, L. W. Brigham, L. C. Smith // *Polar Geography*. — 2014. — Vol. 37. — Is. 2. — Pp. 111–133. DOI: 10.1080/1088937X.2013.845859.
5. Ольховик Е. О. Исследование плотности транспортных потоков 2018 года в акватории Северного морского пути / Е. О. Ольховик // *Вестник Государственного университета морского и речного флота имени адмирала С. О. Макарова*. — 2018. — Т. 10. — № 5. — С. 975–982. DOI: 10.21821/2309-5180-2018-10-5-975-982.
6. Холопцев А. В. Перспективы безледокольной навигации транзитных судов в районе Новосибирских островов / А. В. Холопцев, С. А. Подпорин // *Вестник Государственного университета морского и речного флота имени адмирала С. О. Макарова*. — 2019. — Т. 11. — № 4. — С. 683–695. DOI: 10.21821/2309-5180-2019-11-4-683-695.
7. Холопцев А. В. Перспективы безледокольной навигации судов класса Arc7 в районе Новосибирских островов в зимний период / А. В. Холопцев, С. А. Подпорин // *Вестник Государственного университета морского и речного флота имени адмирала С. О. Макарова*. — 2019. — Т. 11. — № 5. — С. 867–879. DOI: 10.21821/2309-5180-2019-11-5-867-879.
8. Шаронов А. Ю. Задачи гидрометеорологического обеспечения круглогодичной навигации в Восточно-Сибирском море / А. Ю. Шаронов, В. А. Шматов // *Вестник Государственного университета морского и речного флота имени адмирала С. О. Макарова*. — 2018. — Т. 10. — № 1. — С. 170–182. DOI: 10.21821/2309-5180-2018-10-1-170-182.
9. Юлин А. В. Сезонная и межгодовая изменчивость ледяных массивов Восточно-Сибирского моря / А. В. Юлин, М. В. Шаратунова, Е. А. Павлова, В. В. Иванов // *Проблемы Арктики и Антарктики*. — 2018. — Т. 64. — № 3 (117). — С. 229–240. DOI: 10.30758/0555-2648-2018-64-3-229-240.

10. Егоров А. Г. Изменение сроков устойчивого ледообразования в восточных арктических морях России в начале XXI в. / А. Г. Егоров, Е. А. Павлова // Проблемы Арктики и Антарктики. — 2019. — Т. 65. — № 4. — С. 389–404. DOI: 10.30758/0555-2648-2019-65-4-389-404.
11. Спутниковые методы определения характеристик ледяного покрова морей / Под редакцией В. Г. Смирнова. — СПб.: ААНИИ, 2011. — 240 с.
12. Teleti P. R. Sea Ice Observations in Polar Regions: Evolution of Technologies in Remote Sensing / P. R. Teleti, A. J. Luis // International Journal of Geosciences. — 2013. — Vol. 4. — No. 7. — Pp. 1031–1050. DOI: 10.4236/ijg.2013.47097.
13. Andersen S. Intercomparison of passive microwave sea ice concentration retrievals over the high-concentration Arctic sea ice / S. Andersen, R. Tonboe, L. Kaleschke, G. Heygster, L. T. Pedersen // Journal of Geophysical Research: Oceans. — 2007. — Vol. 112. — Is. C8. DOI: 10.1029/2006JC003543.
14. Meier W. N. Comparison of passive microwave ice concentration algorithm retrievals with AVHRR imagery in Arctic Peripheral Seas // IEEE Transactions on geoscience and remote sensing. — 2005. — Vol. 43. — Is. 6. — Pp. 1324–1337. DOI: 10.1109/TGRS.2005.846151.
15. Spreen G. Sea ice remote sensing using AMSR-E 89-GHz channels / G. Spreen, L. Kaleschke, G. Heygster // Journal of Geophysical Research: Oceans. — 2008. — Vol. 113. — Is. C2. DOI: 10.1029/2005JC003384.
16. Agnew T. The use of operational ice charts for evaluating passive microwave ice concentration data / T. Agnew, S. Howell // Atmosphere–Ocean. — 2003. — Vol. 41. — Is. 4. — Pp. 317–331. DOI: 10.3137/ao.410405.
17. Ivanova N. Retrieval of Arctic Sea Ice Parameters by Satellite Passive Microwave Sensors: A Comparison of Eleven Sea Ice Concentration Algorithms / N. Ivanova, O. M. Johannessen, L. T. Pedersen, R. T. Tonboe // IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing. — 2014. — Vol. 52. — Is. 11. — Pp. 7233–7246. DOI: 10.1109/TGRS.2014.2310136.
18. Knuth M. A. Summer and early-fall sea-ice concentration in the Ross Sea: comparison of in situ ASPeCt observations and satellite passive microwave estimates / M. A. Knuth, S. F. Ackley // Annals of Glaciology. — 2006. — Vol. 44. — Pp. 303–309. DOI: 10.3189/172756406781811466.
19. Ivanova N. Satellite passive microwave measurements of sea ice concentration: an optimal algorithm and challenges / N. Ivanova, L. T. Pedersen, R. T. Tonboe, S. Kern, G. Heygster, T. Laverigne, A. Sørensen, R. Saldo, G. Dybkjaer, L. Brucker, M. Shokr // The Cryosphere Discussions. — 2015. — Vol. 9. — Pp. 1269–1313. DOI: 10.5194/tcd-9-1269-2015.
20. Тихонов В. В. Мониторинг морского льда полярных регионов с использованием спутниковой микроволновой радиометрии / В. В. Тихонов [и др.] // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. — 2015. — Т. 12. — № 5. — С. 150–169.
21. Vichi M. Coupling BFM with Ocean models: the NEMO model (Nucleus for the European Modelling of the Ocean). BFM report series. No. 2. Release 1.0. / M. Vichi, T. Lovato, E. Gutierrez Mlot, W. McKiver. — The BFM System Team, 2015. — 31 p.
22. Бокс Дж. Анализ временных рядов, прогноз и управление / пер. с англ. / Дж. Бокс, Г. Дженкинс; под ред. В. Ф. Писаренко. — М.: Мир, 1974. — Кн. 1. — 406 с.
23. Думанская И. О. Ледовые условия морей азиатской части России / И. О. Думанская. — М.; Обнинск: ИГ–СОЦИН, 2017. — 640 с.

REFERENCES

1. Shibata, Hiroki, Koh Izumiyama, Kazutaka Tateyama, Hiroyuki Enomoto, and Shuhei Takahashi. “Sea-ice coverage variability on the Northern Sea Routes, 1980–2011.” *Annals of Glaciology* 54.62 (2013): 139–148. DOI: 10.3189/2013AoG62A123.
2. Aksenov, Yevgeny, E. E. Popova, A. Yool. A. J. G. Nurser, Timothy D. Williams, Laurent Bertino, and Jon Berg. “On the Future Navigability of Arctic Sea Routes: High-resolution Projections of the Arctic Ocean and Sea Ice.” *Marine Policy* 75 (2017): 300–317. DOI: 10.1016/j.marpol.2015.12.027.
3. Melia, Nathanael, Keith Haines, and Ed Hawkins. *Future of the Sea: Implications from Opening Arctic Sea Routes*. Foresight, Government Office for Science, 2017.
4. Stephenson, Scott R., Lawson W. Brigham, and Laurence C. Smith. “Marine accessibility along Russia’s Northern Sea route.” *Polar Geography* 37.2 (2014): 111–133. DOI: 10.1080/1088937X.2013.845859.

5. Ol'khovik, Evgeniy O. "Research of the density of transports flows on the Northern Sea Route in 2018 year." *Vestnik Gosudarstvennogo universiteta morskogo i rechnogo flota imeni admirala S. O. Makarova* 10.5 (2018): 975-982. DOI: 10.21821/2309-5180-2018-10-5-975-982.
6. Kholoptsev, Aleksandr V., and Sergey A. Podporin. "Prospects for unescorted navigation of transit vessels in the region of the New Siberian islands." *Vestnik Gosudarstvennogo universiteta morskogo i rechnogo flota imeni admirala S. O. Makarova* 11.4 (2019): 683-695. DOI: 10.21821/2309-5180-2019-11-4-683-695.
7. Kholoptsev, Aleksandr V., and Sergey A. Podporin. "Prospects for unescorted navigation of arc7 ice-class vessels in the region of the new siberian islands during the winter period." *Vestnik Gosudarstvennogo universiteta morskogo i rechnogo flota imeni admirala S. O. Makarova* 11.5 (2019): 867-879. DOI: 10.21821/2309-5180-2019-11-5-867-879.
8. Sharonov, Andrei Yu., and Vladimir A. Shmatkov. "The problem of hydrometeorological maintenance of year-round navigation in the East Siberian Sea." *Vestnik Gosudarstvennogo universiteta morskogo i rechnogo flota imeni admirala S. O. Makarova* 10.1 (2018): 170-182. DOI: 10.21821/2309-5180-2018-10-1-170-182.
9. Yulin, A.V., M. V. Sharatunova, E. A. Pavlova, and V. V. Ivanov. "Sezonnaya i mezhgodovaya izmenchivost' ledyanykh massivov Vostochno-Sibirskogo moray." *Arctic and Antarctic Research* 64.3(117) (2018): 229-240. DOI: 10.30758/0555-2648-2018-64-3-229-240.
10. Egorov, A. G., and E. A. Pavlova. "Change in the time of stable ice formation in the Russian Eastern Arctic seas at the beginning of 21st century." *Arctic and Antarctic Research* 65.4 (2019): 389-404. DOI: 10.30758/0555-2648-2019-65-4-389-404.
11. *Sputnikovyie metody opredeleniya harakteristik ledyanogo pokrova morej*. Smirnov, V.G., ed. SPb.: AANII, 2011.
12. Teleti, Praveen Rao, and Alvarinho J. Luis. "Sea Ice Observations in Polar Regions: Evolution of Technologies in Remote Sensing." *International Journal of Geosciences* 4.7 (2013): 1031-1050. DOI: 10.4236/ijg.2013.47097.
13. Andersen, Soren, Rasmus Tonboe, Lars Kaleschke, Georg Heygster, and Leif Toudal Pedersen. "Inter-comparison of passive microwave sea ice concentration retrievals over the high-concentration Arctic sea ice." *Journal of Geophysical Research: Oceans* 112.C8 (2007). DOI: 10.1029/2006JC003543.
14. Meier, Walter N. "Comparison of passive microwave ice concentration algorithm retrievals with AVHRR imagery in Arctic Peripheral Seas." *IEEE Transactions on geoscience and remote sensing* 43.6 (2005): 1324-1337. DOI: 10.1109/TGRS.2005.846151.
15. Spreen, Gunnar, Lars Kaleschke, and Georg Heygster. "Sea ice remote sensing using AMSR-E 89-GHz channels." *Journal of Geophysical Research: Oceans* 113.C2 (2008). DOI:10.1029/2005JC003384.
16. Agnew, Tom, and Stephen Howell. "The use of operational ice charts for evaluating passive microwave ice concentration data." *Atmosphere-Ocean* 41.4 (2003): 317-331. DOI: 10.3137/ao.410405.
17. Ivanova, Natalia, Ola M. Johannessen, Leif Toudal Pedersen, and Rasmus T. Tonboe. "Retrieval of Arctic Sea Ice Parameters by Satellite Passive Microwave Sensors: A Comparison of Eleven Sea Ice Concentration Algorithms." *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing* 52.11 (2014): 7233-7246. DOI: 10.1109/TGRS.2014.2310136.
18. Knuth, Margaret A., and Stephen F. Ackley. "Summer and early-fall sea-ice concentration in the Ross Sea: comparison of in situ ASPeCt observations and satellite passive microwave estimates." *Annals of Glaciology* 44 (2006): 303-309. DOI: 10.3189/172756406781811466.
19. Ivanova, N., L. T. Pedersen, R. T. Tonboe, S. Kern, G. Heygster, T. Laverigne, A. Sørensen, R. Saldo, G. Dybkjaer, L. Brucker, and M. Shokr. "Satellite passive microwave measurements of sea ice concentration: an optimal algorithm and challenges." *The Cryosphere Discussions* 9 (2015): 1269-1313. DOI: 10.5194/tcd-9-1269-2015.
20. Tikhonov, V. V., M. D. Raev, E. A. Sharkov, D. A. Boyarskii, I. A. Repina, and N. Yu. Komarova. "Polar sea ice monitoring using satellite microwave radiometer data." *Current problems in remote sensing of the Earth from space* 12.5 (2015): 150-169.
21. Vichi, M., T. Lovato, E. Gutierrez Mlot, and W. McKiver. *Coupling BFM with Ocean models: the NEMO model (Nucleus for the European Modelling of the Ocean)*. BFM report series. No. 2. Release 1.0. The BFM System Team, 2015.
22. Box, George E. P., Gwilym M. Jenkins, Gregory C. Reinsel, and Greta M. Ljung. *Time Series Analysis: Forecasting and Control*. 5th Edition. John Wiley and Sons Inc., 2015.
23. Dumanskaya, I. O. *Ledovye usloviya morei aziatskoi chasti Rossii*. M.; Obninsk: IG-SOTsIN, 2017.

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

Холопцев Александр Вадимович —
доктор географических наук, профессор
Севастопольское отделение ФГБУ
«Государственный океанографический институт
имени Н. Н. Зубова»
299011, Российская Федерация, г. Севастополь,
ул. Советская, 61
ФГАОУ ВО «Севастопольский государственный
университет»
299053, Российская Федерация, г. Севастополь,
ул. Университетская, 33
e-mail: kholoptsev@mail.ru

Подпорин Сергей Анатольевич —
кандидат технических наук, доцент
ФГАОУ ВО «Севастопольский государственный
университет»
299053, Российская Федерация, г. Севастополь,
ул. Университетская, 33
e-mail: s.a.podporin@gmail.com

INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Kholoptsev, Aleksandr V. —
Dr. of Geographical Sciences, professor
Sevastopol branch of FSBI
“N. N. Zubov’s State Oceanographic
Institute”
61 Sovetskaya Str., Sevastopol, 299011,
Russian Federation
Sevastopol State University
33 Universitetskaya Str.,
Sevastopol, 299053,
Russian Federation
e-mail: kholoptsev@mail.ru

Podporin, Sergey A. —
PhD, associate professor
Sevastopol State University
33 Universitetskaya Str.,
Sevastopol, 299053,
Russian Federation
e-mail: s.a.podporin@gmail.com

*Статья поступила в редакцию 21 марта 2021 г.
Received: March 21 2021.*

DOI: 10.21821/2309-5180-2021-13-3-399-408

MULTI-CRITERIA APPROACH TO THE PROBLEM OF CHOOSING THE OPTIMAL ROUTES IN THE WATERS OF THE NORTHERN SEA ROUTE

E. V. Andreeva

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

The process of choosing the optimal routes for large-capacity transport vessels in the water area of the Northern Sea Route is studied in the paper. The topic relevance is related to the requirements for the implementation of the "Comprehensive plan for the development of the Northern Sea Route until 2030" and "Strategy for the development of the Arctic zone of Russia until 2035". An assessment of the current state of the Arctic transport system and changes that have affected the composition and structure of the transport fleet is given, the issues of the construction of new Arctic ports and cargo terminals are touched upon, and the growth in the sea freight volume is given. The duration of the navigation period is analyzed, and the characteristics of the navigation-hydrographic and hydrometeorological and ice support of navigation are given. The performed analytical review of the known methods for finding the optimal routes of sea vessels has showed that all of them, as a rule, are based on the solution of two-criterion problems and relate mainly to one specific type of vessel, which does not allow using the obtained solution for vessels of different types, differing in draft and ice cross-country ability. To overcome this drawback, a multicriteria approach is proposed that takes into account the length of the route, the transition time, as well as the safety criteria associated with the possible vessel grounding or receiving ice damage. In addition, the method provides taking into account the influence of insufficient hydrographic knowledge of the bottom relief on the accident rate of ships associated with touching dangerous local seabed uplifts that are not indicated on the nautical navigational charts. The formulas for calculating particular indicators of route optimality have been obtained. As an optimal route, it is proposed to use a solution that satisfies the Pareto principle. The method is tested when choosing the optimal routes in the water area of the Northern Sea Route for ships with the ice category Arc7, the results of which confirmed the effectiveness of the method.

Keywords: Northern Sea Route, shipping routes, year-round navigation, multi-criteria approach, optimization criteria, ice conditions, depths, tightness, hydrographic knowledge, Pareto principle.

For citation:

Andreeva, Ekaterina V. "Multi-criteria approach to the problem of choosing the optimal routes in the waters of the Northern Sea Route." *Vestnik Gosudarstvennogo universiteta morskogo i rechnogo flota imeni admirala S. O. Makarova* 13.3 (2021): 399–408. DOI: 10.21821/2309-5180-2021-13-3-399-408.

УДК 528.47

МНОГОКРИТЕРИАЛЬНЫЙ ПОДХОД В ЗАДАЧЕ ВЫБОРА ОПТИМАЛЬНЫХ МАРШРУТОВ В АКВАТОРИИ СЕВЕРНОГО МОРСКОГО ПУТИ

Е. В. Андреева

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

В работе исследован процесс выбора оптимальных маршрутов крупнотоннажных транспортных судов в акватории Северного морского пути. Актуальность темы связана с требованиями выполнения «Комплексного плана развития Северного морского пути до 2030 г.» и «Стратегии развития арктической зоны России до 2035 г.». Дана оценка современного состояния Арктической транспортной системы и изменений, отразившихся на составе и структуре транспортного флота, затронуты вопросы строительства новых арктических портов и грузовых терминалов, показан рост объемов морских грузоперевозок. Проанализирована продолжительность навигационного периода, а также дана характеристика навигационно-гидрографического, гидрометеорологического и ледового обеспечения судоходства. Выполненный аналитический обзор известных методов поиска оптимальных маршрутов морских судов показал,

что все они, как правило, основаны на решении двухкритериальных задач и относятся преимущественно к одному конкретному типу судов, что не позволяет использовать полученное решение для судов разных типов, отличающихся осадкой и ледовой проходимостью. Для преодоления этого недостатка предложен многокритериальный подход, учитывающий протяженность маршрута, время перехода, а также критерии безопасности, связанные с возможной посадкой судна на мель или получением им ледовых повреждений. Кроме того, метод предусматривает учет влияния недостаточной гидрографической изученности рельефа дна на аварийность судов, связанную с касанием опасных локальных поднятий дна, не обозначенных на морских навигационных картах. Получены расчетные формулы для вычисления частных показателей оптимальности маршрутов. В качестве оптимального маршрута предложено использовать решение, удовлетворяющее принципу Парето. Методика прошла проверку при выборе оптимальных маршрутов в акватории Северного морского пути для судов с ледовой категорией Arc7, результаты которой подтвердили эффективность метода.

Ключевые слова: Северный морской путь, судоходные маршруты, круглогодичная навигация, многокритериальный подход, критерии оптимизации, ледовые условия, глубины, стесненность, гидрографическая изученность, принцип Парето.

Для цитирования:

Андреева Е. В. Многокритериальный подход в задаче выбора оптимальных маршрутов в акватории Северного морского пути / Е. В. Андреева // Вестник Государственного университета морского и речного флота имени адмирала С. О. Макарова. — 2021. — Т. 13. — № 3. — С. 399–408. DOI: 10.21821/2309-5180-2021-13-3-399-408.

Введение (Introduction)

Северный морской путь (СМП) в навигационном отношении представляет собой одну из самых сложных морских транспортных коммуникаций, отличающихся тяжелыми ледовыми условиями, наличием обширных мелководных участков, недостаточной гидрографической изученностью рельефа дна, а также большой протяженностью судоходных маршрутов. В связи с недостаточной гидрографической изученностью рельефа дна арктических морей в акватории СМП движение судов организовано по рекомендованным маршрутам. В акватории СМП действует разрешительный режим плавания [1].

СМП относится к активно развивающейся морской транспортной системе, в которой отмечаются существенные структурные и количественные изменения. В частности, наблюдается увеличение доли крупнотоннажных транспортных судов, осадка которых достигает 12 м, длина — 300 м, ширина — 50 м, а также судов с категорией ледовых усилений Arc7, расширяется сеть судоходных маршрутов, увеличивается площадь акватории, на которой осуществляется круглогодичная навигация, активно ведется строительство новых портов и реконструкция существующей портовой инфраструктуры, на отдельных участках ведутся дноуглубительные работы, выполняется широкомасштабное плановое обследование рельефа дна на мелководных участках судоходных трасс. В акватории СМП отмечается существенное увеличение интенсивности судоходства. Так, в 2020 г. объем грузоперевозок по акватории увеличился до 33 млн т, что на 4,7 % превышает показатель 2019 г. [2].

Распоряжением Правительства Российской Федерации от 21 декабря 2019 года № 3120-р был утвержден «План развития инфраструктуры СМП на период до 2035 г.» [3], который содержит три этапа [4]. На первом этапе, который завершается в 2024 г., объем морских грузоперевозок должен составить 80 млн т. На втором этапе предусматривается к 2030 г. организация круглогодичных транзитных перевозок по приполюсным трассам. На третьем этапе СМП к 2035 г. должен стать полноценной международной магистралью и национальным транспортным коридором, входом в который послужит Мурманская область, выходом — Петропавловск-Камчатский.

Предполагается построить большое количество принадлежащих государству судов, которые будут обеспечивать круглогодичное судоходство в арктических морях. В 2022–2024 гг. планируется введение в эксплуатацию шестнадцати спасательных и тринадцати гидрографических судов. К концу 2026 г. должно быть завершено строительство и введены в эксплуатацию четыре атомных ледокола проекта 2220 «Арктика». В декабре 2027 г. планируется спуск на воду головного ледокола

проекта «Лидер», способного прокладывать путь во льдах толщиной до 4 м. В 2030–2032 гг. предстоит построить еще два таких атомохода. В настоящее время круглогодичное движение судов осуществляется только в Карском море.

В работах [5] и [6] исследована сезонная изменчивость параметров движения крупнотоннажных судов. При отсутствии льда траектории движения судов, как правило, совпадали с рекомендованными маршрутами, имеющими вид прямых линий. Отклонение судна от рекомендованного маршрута вело к увеличению времени перехода. При увеличении толщины льда на маршруте наблюдалось снижение скорости судна. Отклонение от прямолинейного маршрута в область, свободную ото льда или область с малой толщиной льда, позволяло уменьшить падение скорости, но вело к увеличению длины пути. В результате исследований были зафиксированы значительные боковые отклонения судов от рекомендованных курсов и падение их скорости. Суда, отклоняясь от рекомендованных маршрутов, попадали в некоторых случаях в область с недостаточной гидрографической изученностью, где вынуждены были снижать скорость во избежание негативных последствий возможной аварии при касании грунта на мелководных участках, не обозначенных на морских навигационных картах, а также ледовых повреждений.

Экспериментально было подтверждено, что при наличии льда время перехода по прямой линии между двумя фиксированными точками в ряде случаев не было наименьшим — по мере отклонения от прямой линии время перехода уменьшалось, а затем увеличивалось. В работе ставится вопрос о поиске оптимального маршрута. Под оптимальным понимается такой маршрут, на котором соблюдаются требования навигационной безопасности, а также требования, накладываемые на время перехода судна по маршруту. Поиск оптимального маршрута в условиях малых глубин и труднопреодолимых льдов имеет важное практическое значение.

Решению задачи выбора оптимальных маршрутов судов посвящены многочисленные научные труды и исследования. К ним относятся работы, в которых при выборе оптимального маршрута отдельно учитывались глубины [7]–[9], гидрографическая изученность [10]–[12], гидрометеорологические условия [13], [14], а также протяженность маршрутов [15]. Обзор методов поиска оптимальных маршрутов морских судов показал, что все они, как правило, основаны на решении двухкритериальных задач и относятся преимущественно к одному конкретному типу судов, что не позволяет использовать полученное решение для судов разных типов, отличающихся осадкой и ледовой проходимостью.

Целью настоящей работы является разработка метода поиска оптимальных маршрутов, в котором учитываются не только протяженность маршрута и время перехода, но и критерии минимизации аварий, связанных с посадкой судов на мель или получением им ледовых повреждений.

Методы и материалы (Methods and Materials)

При выборе маршрутов судов в акватории СМП учитывается фактор времени перехода, а также фактор безопасности перехода. Фактор безопасности перехода связан с глубинами и гидрографической изученностью рельефа дна на маршруте, а также с ледовыми условиями и стесненностью фарватера. При этом влияние факторов безопасности зависит от ледового класса, осадки, размеров судов и их маневренных характеристик. Таким образом, поиск оптимального маршрута предлагается выполнять на основе решения многокритериальной задачи.

К оптимальным маршрутам в настоящей работе отнесены маршруты, на которых плавание судов, во-первых, будет принципиально возможным, во-вторых, безопасным, а кроме того, будет занимать мало времени. Опыт арктического судоходства показывает, что максимально короткий путь в арктических водах не всегда является самым быстрым. В общем виде время перехода по маршруту определяется выражением

$$T = \frac{l}{V}, \quad (1)$$

где T — время перехода;

l — протяженность маршрута;

V — скорость судна.

Скорость судна V представим в виде произведения

$$V = FV_0, \quad (2)$$

где $F = F(f_1, f_2, f_3)$ — общий фактор навигационной безопасности;

V_0 — скорость судна при $F = 1$;

f_1 — показатель влияния глубины на потерю скорости;

f_2 — показатель влияния льда на потерю скорости;

f_3 — показатель влияния стесненности фарватера на потерю скорости.

В формуле (2) условие $F = 1$ выполняется, когда влияние малых глубин, льда и стесненности на скорость судна отсутствует. Из выражения (2) следует, что при $F = 1$ скорость судна принимает максимальное значение $V = V_0 \rightarrow \max$, а время перехода (1) по маршруту протяженностью l соответствует минимальному времени перехода $T \rightarrow \min$.

Условие $F = 0$ выполняется также, когда хотя бы один из показателей: f_1, f_2, f_3 , принимает нулевое значение. В этом случае маршрут для плавания судов становится непригодным, судно полностью теряет ход: $V \rightarrow 0$, время перехода по маршруту стремится к бесконечности: $T \rightarrow \infty$. Таким образом, скорость судна может служить индикатором влияния внешних факторов на его безопасность.

Возможны случаи, когда на самых коротких маршрутах отмечается самая большая потеря скорости, а на более длинных маршрутах потеря скорости может иметь минимальное значение или вообще отсутствовать. При таких условиях переход по более длинному маршруту может оказаться менее опасным, чем по короткому. Из множества маршрутов, характеризующихся одинаковыми значениями показателя $F \neq 0$, оптимальным маршрутом считается тот, по которому затрачивается минимальное время. Это условие в общем случае достигается особым соотношением длины маршрута и скорости судна на нем.

Влияние глубины Z на возможную потерю скорости судна, имеющего осадку d , в общем виде описывается соотношением

$$f_1 = f\left(\frac{d}{Z}\right), \quad (3)$$

где $f_1 \in [0; 1]$.

На больших глубинах, когда $Z \gg d$, влияние фактора f_1 на падение скорости судна отсутствует. При таких условиях значение функции (3) должно стремиться к единице. На малых глубинах, когда $Z \leq d$, влияние фактора f_1 на падение скорости судна оказывается максимальным. В таких случаях значение функции (3) должно принимать нулевое значение. Из выражения (3) следует, что на одном и том же маршруте влияние глубин на падение скорости зависит от осадки судна d . Для судов с малой осадкой глубины оказывают меньшее влияние по сравнению с судами, имеющими большую осадку.

Отдельные участки акватории СМП могут характеризоваться недостаточной гидрографической изученностью рельефа дна. Вследствие этого в промежутках между глубинами на навигационных картах могут находиться локальные поднятия дна, которые не были обнаружены в ходе выполнения промерных работ. Для учета гидрографической изученности в работе [13] предложено глубины на маршруте исправлять поправкой Δ_L , величина которой зависит от подробности выполненного промера и морфометрических характеристик рельефа дна. С учетом поправки Δ_L формула (3) примет вид

$$f_1 = f\left(\frac{d}{Z - \Delta_L}\right). \quad (4)$$

В тех районах, где промерные работы не проводились и сведения о глубинах отсутствуют, принимается, что значение поправки Δ_L равно глубине Z . При таком допущении функция (4) должна иметь такой вид, чтобы показатель f_1 принимает нулевое значение. Последнее означает, что маршрут,

проложенный по необследованной акватории, будет опасным для любых судов. В обследованных районах величина поправки рассчитывается по формуле

$$\Delta_L = kL, \quad (5)$$

где k — показатель вертикальной расчлененности рельефа дна на уровне 95 % обеспеченности;
 L — показатель подробности промера.

Поправка Δ_L принимает нулевое значение в случае, когда рельеф дна обследован с использованием многолучевых эхолотов или других средств, гарантирующих достоверное обнаружение и обследование всех опасных глубин.

Проведенные исследования [16] показали, что для акватории СМП максимальное значение показателя вертикальной расчлененности на уровне 95 % обеспеченности составляет 0,006. С учетом этого поправка за гидрографическую изученность, соответствующая междугалсовому расстоянию, равному 500 м, составит 1,5 м; поправка, соответствующая междугалсовому расстоянию 2000 м, составит 6 м и т. д.

Влияние льда на возможную потерю скорости судна с ледопроходимостью $h_{\text{пр}}$ в общем виде описывается соотношением

$$f_2 = f \left(\frac{h_{\text{ф}}}{h_{\text{пр}}} \right), \quad (6)$$

где $f_2 \in [0; 1]$;

$h_{\text{ф}}$ — фактическая толщина льда на маршруте.

Для тонкого льда, когда выполняется условие $h_{\text{пр}} > h_{\text{ф}}$ (показатель влияния льда f_2 находится в пределах $0 < f_2 < 1$), движение судна по маршруту возможно. Для толстого льда, когда $h_{\text{пр}} \leq h_{\text{ф}}$, $f_2 = 0$, проход судна невозможен. Суда, работающие в акватории СМП, имеют разные категории ледовых усилений и разную ледовую проходимость. По этой причине показатель f_2 для судов с разной ледовой проходимостью может иметь разные значения:

– если для судов группы i и j показатели ледовой проходимости устанавливаются неравенством $h_{\text{пр}i} > h_{\text{пр}j}$, то соответствующие им показатели влияния льда определяются неравенством $f_{2i} < f_{2j}$;

– если для судов группы i и j показатели ледовой проходимости устанавливаются неравенством $h_{\text{пр}i} < h_{\text{пр}j}$, то соответствующие им показатели влияния льда определяются неравенством $f_{2i} > f_{2j}$.

Ледовые классы судов и значение их ледопроходимости установлены в Правилах Российского морского регистра судоходства [17]. Влияние фактора стесненности на возможную потерю скорости судна учитывается с использованием показателя f_3 :

$$f_3 = f \left(\frac{B_{\text{ф}}}{B_0} \right), \quad (7)$$

где $f_3 \in [0; 1]$;

$B_{\text{ф}}$ — ширина полосы безопасного движения судна;

B_0 — ширина фарватера.

Под районами со стесненными условиями обычно понимают акватории, где судно ограничено в возможности маневрирования из-за близости берегов и других навигационных опасностей. Акватория СМП практически вся может быть отнесена к стесненным водам. Большинство маршрутов СМП проходят по мелководным участкам в окружении многочисленных отмелей и банок [18], а также опасных ледовых образований в виде ледяных полей, торосов, стамух и даже айсбергов [19]. В зависимости от соотношения ширины полосы безопасного движения судна и ширины фарватера могут выполняться условия:

– если $B_0 > B_{\text{ф}}$, то показатель влияния стесненности на скорость судна находится в пределах $0 < f_3 < 1$, движение судна по маршруту возможно;

– если $B_0 < B_{\text{ф}}$, то показатель стесненности маршрута равен нулю, то проход судна невозможен.

С учетом совместного влияния внешних факторов на скорость судна показатель фактора безопасности F в общем виде может быть представлен в виде произведения трех функций:

$$F = f_1\left(\frac{d}{Z - \Delta_L}\right) f_2\left(\frac{h_\Phi}{h_{\text{пр}}}\right) f_3\left(\frac{B_\Phi}{B_0}\right), \quad (8)$$

Фактор F в выражении (8) оказывает влияние на величину фактической скорости судна V в формуле (2). Если $F = 1$, то $V = V_0$. В этом случае влияние фактора на скорость отсутствует, что характеризуется совместным выполнением следующих условий: $B_\Phi = B_0$; $h_\Phi = 0$; $Z \gg d$ и $L \rightarrow 0$. Если $F = 0$, то $V = 0$. В этом случае судно на маршруте прекращает движение в случае влияния хотя бы одного из следующих условий: $h_\Phi \geq h_{\text{пр}}$, или $d \geq Z - \Delta_L$, или $L \rightarrow \infty$, или $B_\Phi \rightarrow 0$.

Функции f_1 , f_2 и f_3 в выражении (8) могут быть представлены в явном виде:

$$F = \left(1 - \frac{d}{Z - \Delta_L}\right) \left(1 - \frac{h_\Phi}{h_{\text{пр}}}\right) \left(1 - \left[1 - \frac{B_\Phi}{B_0}\right]\right). \quad (9)$$

Формула (9) может быть использована для вычисления частных показателей влияния глубины, гидрографической изученности дна, льда и стесненности фарватера на скорость судна, а также общего показателя F .

С учетом выражений (1) и (9) оптимальный маршрут должен удовлетворять условиям:

$$\left. \begin{aligned} T_{\text{опт}} &= \min \{T\}; \\ F_{\text{опт}} &= \max \{F\}; \\ F &\neq 0. \end{aligned} \right\} \quad (10)$$

В случае, когда величина параметра F для разных маршрутов имеет одинаковое значение, за оптимальный маршрут принимается тот, для которого время перехода имеет наименьшее значение, что соответствует принципу Парето [20]. В случае, когда время прохождения для нескольких маршрутов имеет одинаковое наименьшее значение по сравнению с другими маршрутами, за оптимальный принимается маршрут, показатель безопасности которого имеет наибольшее значение.

Результаты (Results)

Для иллюстрации метода выбора оптимального маршрута рассмотрен пример поиска оптимального маршрута для судов с ледовой категорией Arc7, имеющих осадку 12 м и ледопроездимость 1,7 м. Скорость судна по чистой воде V_0 при отсутствии влияния мелководья принята равной 12 уз. Схема расположения маршрутов показана на рисунке.

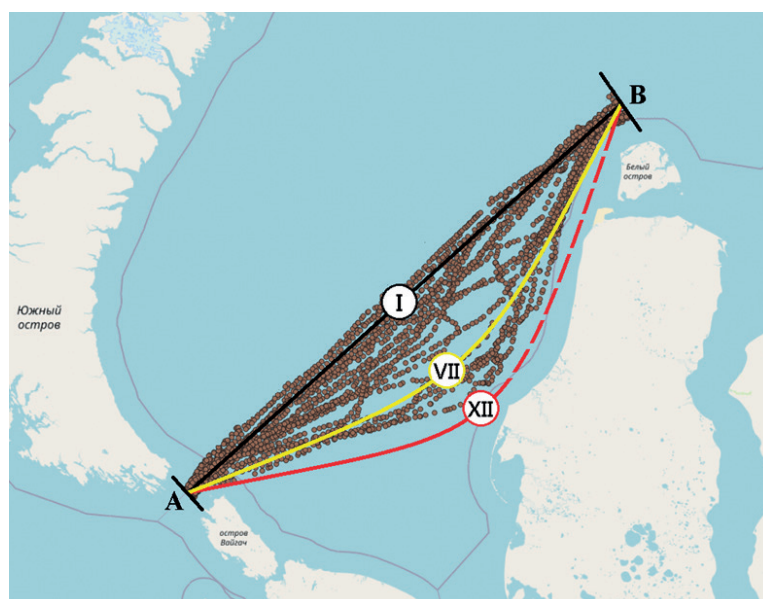


Схема маршрутов: AB — границы, между которыми расположены маршруты; I — маршрут, имеющий наименьшую протяженность; VII — оптимальный маршрут; XII — маршрут, запрещенный для плавания судов принятого типа

Маршруты расположены между границами A и B , расстояние между которыми по прямой линии равно 200 миль. Глубины на прямой линии AB составили около 50 м. По мере удаления в юго-восточном направлении глубины уменьшались. Подводный рельеф изучен с подробностью 500 м. Толщина льда по прямой линии, соединяющей точки A и B , составляла 1,3 м. По мере удаления от этой линии в юго-восточном направлении толщина льда уменьшалась до 0,4 м.

Между точками A и B были выбраны двенадцать маршрутов. Для каждого маршрута определялись параметры, значения которых приведены в таблице.

Параметры маршрутов

Номер маршрута i	l , мили	Z , м	h , м	f_1	f_2	F	V	T
I	200	50	1,30	0,76	0,23	0,17	2,0	100
II	210	50	1,30	0,76	0,23	0,17	2,0	105
III	220	40	1,20	0,70	0,29	0,20	2,4	92
IV	230	30	1,10	0,60	0,35	0,21	2,5	92
V	240	30	1,00	0,60	0,41	0,25	3,0	80
VI	250	30	0,90	0,60	0,47	0,28	3,4	74
VII	260	30	0,80	0,60	0,53	0,32	3,8	68
VIII	270	24	0,60	0,50	0,64	0,32	3,8	71
IX	280	22	0,50	0,45	0,70	0,32	3,8	74
X	290	20	0,40	0,40	0,76	0,30	3,6	80
XI	300	18	0,40	0,33	0,76	0,25	3,0	100
XII	310	10	0,40	0	0,76	0	0	∞

Примечания: в первой графе (слева направо) указаны номера маршрутов (1–12); во второй — протяженности маршрута, мили; в третьей — глубина Z на маршруте, м; в четвертой — толщина льда h , м; в пятой — показатель f_1 влияния глубины на потерю скорости; в шестой — показатель f_2 влияния льда на потерю скорости; в седьмой — показатель навигационной безопасности маршрута F ; в восьмой — скорость судна на маршруте, уз; в девятой — время перехода по маршруту, ч.

Приведенные в таблице данные позволяют выполнить сравнительную оценку маршрутов. Маршрут I имеет самую небольшую протяженность. На нем отмечается самое значительное влияние льда на снижение скорости. При этом влияние глубин на потерю скорости имеет наименьшее значение. Суммарное воздействие внешних факторов на судно приводит к уменьшению скорости на маршруте до 2,0 уз. Время перехода составляет 100 ч. Маршрут XI имеет протяженность 300 миль, что превышает протяженность маршрута I в три раза. Тем не менее время прохождения обоих маршрутов оказывается одинаковым за счет того, что скорость на маршруте XI, по сравнению с маршрутом I, оказывается на 1 уз выше.

Максимально продолжительное время перехода, равное 105 ч, отмечается на маршруте II, на котором толщина и глубина по своим значениям совпадают с маршрутом I, но протяженность II маршрута на 10 миль превышает протяженность маршрута I. Самая высокая скорость, равная 3,8 уз, отмечается на маршрутах VII, VIII и IX. Наименьшее время перехода 68 ч зафиксировано на маршруте VII. Маршрут XII по ледовым условиям относится к вполне благоприятным, однако по глубинам использоваться для судов с осадкой 12 м не может.

В результате применения многокритериального подхода из двенадцати маршрутов VII маршрут был признан оптимальным по критерию безопасности и времени перехода. На схеме маршрутов он обозначен желтым цветом. Красным цветом обозначен XII маршрут, запрещенный для плавания судов принятого типа.

Обсуждение результатов (Discussion)

Использование многокритериального подхода в задаче выбора оптимальных маршрутов позволяет получить объективную оценку влияния внешних факторов на навигационную безопасность и время перехода судна по заданному маршруту. При расчетах учитывается влияние каждого внешнего фактора на безопасность и эффективность маршрута. При этом ранжирование маршрутов

по каждому фактору может давать противоречивые результаты и оценки. В таких условиях из множества ранжированных по разным критериям маршрутов выбрать оптимальный представляется неразрешимой задачей, связанной с необходимостью поиска одного оптимального маршрута из множества, удовлетворяющих частным критериям данного показателя. Выход из затруднительной ситуации возможен с использованием принципа Парето, согласно которому многокритериальная задача должна быть сведена к двухкритериальной. С этой целью к частным показателям влияния внешних факторов на выбор маршрутов применяется операция их «свертки». В разрабатываемом методе операция «свертки» проводится в форме перемножения частных показателей. Метод может быть применен к судам, имеющим разную осадку, ледовую проходимость, максимальную скорость по чистой воде, маневренные и другие характеристики. Очевидно, что для судов разных типов положение оптимальных маршрутов будет различаться в зависимости от навигационно-гидрографической, ледовой и гидрометеорологической обстановки.

При использовании многокритериального метода необходимо иметь источники объективной информации о навигационной обстановке района. В качестве основных источников должны быть использованы морские навигационные карты, схемы гидрографической изученности рельефа дна, ледовые карты, карты ледовых прогнозов, а также сведения о параметрах движения судов, полученных с использованием специализированных геоинформационных систем.

Выводы (Summary)

На основании проведенного исследования можно сделать следующие выводы:

1. Предложенный метод позволяет решать задачу поиска оптимальных маршрутов судов разных типов в условиях сложной навигационно-гидрографической и ледовой обстановки. Точность и эффективность решения задачи выбора оптимальных маршрутов зависит от полноты и достоверности исходной информации,
2. Практическое значение разработанного метода состоит в том, что он может использоваться при проектировании сети рекомендованных маршрутов в акватории Северного морского пути, а также при проработке перехода.
3. Дальнейшие исследования будут направлены на уточнение частных критериев оценки безопасности маршрута, в том числе с учетом критерия стесненности акватории.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Официальный сайт Администрации Северного морского пути [Электронный ресурс]. — Режим доступа: <http://www.nsra.ru/> (дата обращения: 15.01.2021).
2. Официальный сайт Министерства транспорта Российской Федерации [Электронный ресурс]. — Режим доступа: <https://mintrans.gov.ru/> (дата обращения: 20.01.2021).
3. Распоряжение Правительства Российской Федерации от 21 декабря 2019 года № 3120-р. «План развития инфраструктуры Северного морского пути на период до 2035 года» [Электронный ресурс]. — Режим доступа: <http://government.ru/docs/38714/> (дата обращения: 20.01.2021).
4. Официальный сайт ИА Neftegaz.RU [Электронный ресурс]. — Режим доступа: <https://neftgaz.ru/> (дата обращения: 24.01.2021).
5. Ольховик Е. О. Исследование плотности транспортных потоков 2018 года в акватории Северного морского пути / Е. О. Ольховик // Вестник Государственного университета морского и речного флота имени адмирала С. О. Макарова. — 2018. — Т. 10. — № 5. — С. 975–982. DOI: 10.21821/2309-5180-2018-10-5-975-982.
6. Ольховик Е. О. Анализ скоростных режимов СПГ-танкеров в акватории Северного морского пути в период зимней навигации 2017–2018 гг. / Е. О. Ольховик // Вестник Государственного университета морского и речного флота имени адмирала С. О. Макарова. — 2018. — Т. 10. — № 2. — С. 300–308. DOI: 10.21821/2309-5180-2018-10-2-300-308.
7. Сорокин А. И. Гидрографические исследования Мирового океана / А. И. Сорокин. — Л.: Гидрометеоиздат, 1980. — 287 с.
8. Васьков А. С. Выбор безопасных глубин при плавании судна на мелководье / А. С. Васьков // Морской транспорт. Серия: Безопасность мореплавания. — 1983. — № 2 (152). — С. 18–22.

9. Неронов Н. Н. Особенности проводки крупнотоннажных судов по фарватерам Восточной части Финского залива / Н. Н. Неронов // Навигация и гидрография. — 2001. — № 12. — С. 107–112.
10. Решетняк С. В. Ранжирование трасс Севморпути по критерию гидрографической обеспеченности / С. В. Решетняк, А. Б. Афонин, А. Л. Тезиков // Эксплуатация морского транспорта. — 2008. — № 3 (53). — С. 55–57.
11. Афонин А. Б. Концепция развития судоходных трасс акватории Северного морского пути / А. Б. Афонин, А. Л. Тезиков // Вестник Государственного университета морского и речного флота имени адмирала С. О. Макарова. — 2017. — Т. 9. — № 1. — С. 81–87. DOI: 10.21821/2309-5180-2017-9-1-81-87.
12. Афонин А. Б. Исследование влияния подробности гидрографической съемки на оценку проходных глубин / А. Б. Афонин, И. Ю. Королев, А. Л. Тезиков // Вестник Государственного университета морского и речного флота имени адмирала С. О. Макарова. — 2017. — Т. 9. — № 5. — С. 1007–1016. DOI: 10.21821/2309-5180-2017-9-5-1007-1016.
13. Веремей Е. И. Алгоритмы оптимизации маршрутов движения с учетом погодных условий / Е. И. Веремей, М. В. Сотникова // International Journal of Open Information Technologies. — 2016. — Т. 4. — № 3. — С. 55–61.
14. Иванов Б. Н. Решение задачи расчета оптимальных маршрутов судов в рамках программного комплекса «ГИС океан» / Б. Н. Иванов // Вологдинские чтения. — 2010. — № 78. — С. 202–206.
15. Акмайкин Д. А. Эвристический поиск оптимального маршрута судна по северному морскому пути / Д. А. Акмайкин, С. Ф. Ключева, П. А. Салюк // Вестник Государственного университета морского и речного флота имени адмирала С. О. Макарова. — 2015. — № 5 (33). — С. 55–62. DOI: 10.21821/2309-5180-2015-7-5-55-62.
16. Афонин А. Б. Разработка методов оценки проходных глубин на трассах Северного морского пути в зависимости от подробности съемки рельефа дна / А. Б. Афонин, Е. О. Ольховик, А. Л. Тезиков // Вестник Государственного университета морского и речного флота имени адмирала С. О. Макарова. — 2016. — № 4 (38). — С. 62–68. DOI: 10.21821/2309-5180-2016-8-4-62-68.
17. Правила классификации и постройки морских судов. Ч. 1. Классификация. НД № 2-020101-104. — СПб: Российский морской регистр судоходства, 2018. — 69 с.
18. Тезиков А. Л. Гидрографическая изученность акватории Северного морского пути / А. Л. Тезиков, А. Б. Афонин, Е. О. Ольховик // Транспорт Российской Федерации. — 2018. — № 2 (75). — С. 19–21.
19. Миронов Е. У. Современные методы ледовых исследований и изысканий на шельфе арктических морей / Е. У. Миронов, Ю. П. Гудосников, В. Н. Смирнов // Проблемы Арктики и Антарктики. — 2015. — № 1 (103). — С. 57–68.
20. Ногин В. Д. Множество и принцип Парето / В. Д. Ногин. — СПб.: Издательско-полиграфическая ассоциация высших учебных заведений, 2020. — 100 с.

REFERENCES

1. Federal State Budgetary Institution “The Northern Sea Route Administration”: Official website. Web. 15 Jan. 2021. <<http://www.nusra.ru/>>.
2. Ministry of Transport of the Russian Federation: Official website. Web. 20 Jan. 2021. <<https://mintrans.gov.ru/>>.
3. Rasporyazhenie Pravitel'stva Rossiiskoi Federatsii ot 21 dekabrya 2019 goda № 3120-r. «Plan razvitiya infrastruktury Severnogo morskogo puti na period do 2035 goda». Web. 20 Jan. 2021. <<http://government.ru/docs/38714/>>.
4. Information agencies Neftegaz.RU: Official website. Web. 24 Jan. 2021. <<https://neftegaz.ru/>>.
5. Ol'khovik, Evgeniy O. “Research of the density of transports flows on the Northern Sea Route in 2018 year.” *Vestnik Gosudarstvennogo universiteta morskogo i rechnogo flota imeni admirala S. O. Makarova* 10.5 (2018): 975–982. DOI: 10.21821/2309-5180-2018-10-5-975-982.
6. Ol'khovik, Evgeniy O. “Analysis of speed regime LNG-tankers in the Northern sea route in period of winter navigation 2017–18.” *Vestnik Gosudarstvennogo universiteta morskogo i rechnogo flota imeni admirala S. O. Makarova* 10.2 (2018): 300–308. DOI: 10.21821/2309-5180-2018-10-2-300-308.
7. Sorokin, A. I. *Gidrograficheskie issledovaniya Mirovogo okeana*. L.: Gidrometeoizdat, 1980.
8. Vas'kov, A.S. “Vybor bezopasnykh glubin pri plavanii sudna na melkovod'e.” *Morskoj transport. Seriya: Bezopasnost' moreplavaniya* 2(152) (1983): 18–22.

9. Neronov, N. N. "Specific Features of Pilotage for Large-displacement Vessels along the Fairways in the Eastern Part of the Gulf of Finland." *Navigation and hydrography* 12 (2001): 107–112.
10. Reshetnyak, S. V., A. B. Afonin, and A. L. Tezikov. "Ranging of routes of Northern Sea Route on the criterion of hydrographical support." *Ekspluatatsiya morskogo transporta* 3(53) (2008): 55–57.
11. Afonin, Andrej B., and Aleksandr L. Tezikov. "The concept of development of shipping routes along the northern sea route." *Vestnik Gosudarstvennogo universiteta morskogo i rechnogo flota imeni admirala S. O. Makarova* 9.1 (2017): 81–87. DOI: 10.21821/2309-5180-2017-9-1-81-87.
12. Afonin, Andrej B., Ivan Yu. Korolev, and Aleksandr L. Tezikov. "Research of influence of the detail of hydrographic surveys on assessment of depths through passage." *Vestnik Gosudarstvennogo universiteta morskogo i rechnogo flota imeni admirala S. O. Makarova* 9.5 (2017): 1007–1016. DOI: 10.21821/2309-5180-2017-9-5-1007-1016.
13. Veremei, E. I., and M. V. Sotnikova. "Optimal routing based on weather forecast." *International Journal of Open Information Technologies* 4.3 (2016): 55–61.
14. Ivanov, B. N. "Reshenie zadachi rascheta optimal'nykh marshrutov sudov v ramkakh programmogo kompleksa «GIS okean»." *Vologdinskie chteniya* 78 (2010): 202–206.
15. Akmaykin, Denis Aleksandrovich, Svetlana Fedorovna Klyueva, and Pavel Anatolievich Salyuk. "Heuristic search for the optimal route ship Northern Sea Route." *Vestnik Gosudarstvennogo universiteta morskogo i rechnogo flota imeni admirala S. O. Makarova* 5(33) (2015): 55–62. DOI: 10.21821/2309-5180-2015-7-5-55-62.
16. Afonin, Andrej Borisovich, Evgenij Olegovich Ol'hovik, and Aleksandr L'vovich Tezikov. "Development of the assessment methods of anadromous depths on the Northern sea route depending on the detail of survey of the bottom relief." *Vestnik Gosudarstvennogo universiteta morskogo i rechnogo flota imeni admirala S. O. Makarova* 4(38) (2016): 62–68. DOI: 10.21821/2309-5180-2016-8-4-62-68.
17. *Rules for the Classification and Construction of Sea-Going Ships, Part I Classification*. ND: 2-020101-138-E. SPb.: Russian Maritime Register of Shipping, 2018.
18. Tezikov, A. L., A. B. Afonin, and Ye. O. Olkhovik. "The state of hydrographic exploration of the Northern Sea Route water area." *Transport of the Russian Federation* 2(75) (2018): 19–21.
19. Mironov, Ye. U., Yu. P. Gudoshnikov, and V. N. Smirnov. "Modern methods of ice studies and surveys at the Arctic seas offshore." *Arctic and Antarctic Research* 1(103) (2015): 57–68.
20. Nogin, V. D. *Mnozhestvo i printsip Pareto*. SPb.: Izdatel'sko-poligraficheskaya assotsiatsiya vysshikh uchebnykh zavedenii, 2020.

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

Андреева Екатерина Валерьевна — ассистент
ФГБОУ ВО «ГУМРФ имени адмирала
С. О. Макарова»
198035, Российская Федерация, Санкт-Петербург,
ул. Двинская, 5/7
e-mail: kaf_gm@gumrf.ru

INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Andreeva, Ekaterina V. — Assistant
Admiral Makarov State University of Maritime
and Inland Shipping
5/7 Dvinskaya Str., St. Petersburg, 198035,
Russian Federation
e-mail: kaf_gm@gumrf.ru

Статья поступила в редакцию 6 февраля 2021 г.

Received: February 6, 2021.

СУДОВЫЕ ЭНЕРГЕТИЧЕСКИЕ УСТАНОВКИ, СИСТЕМЫ И УСТРОЙСТВА

DOI: 10.21821/2309-5180-2021-13-3-409-418

FUEL PHYSICAL PARAMETERS INFLUENCE ON PLUNGER PAIRS WEAR OF HIGH PRESSURE FUEL PUMPS

D. E. Belov, A. V. Ivanovskaya

Kerch State Maritime Technological University, Kerch, Russian Federation

When choosing marine fuel, cost rather than quality is often the priority. This is justified by the presence of a fuel-processing system on the ship. Bunkering with low-quality fuel afterwards negatively affects the condition of the fuel equipment. Such equipment includes a high-pressure fuel pump, which is designed for metering fuel and controlling the loading degree of entire diesel engine. According to the statistics, about 75 % of high-pressure fuel pumps become unusable due to wear of the plunger pairs. Therefore, research of their wear causes when operating on heavy fuel is an urgent task. The research results of plunger pair state for marine diesel engines of the Hyundai Himsem H21 / 32 type, which is a four-stroke engine with gas turbine supercharging, effective power of 1860 kW, and used on ships as a drive for diesel generators, are presented in the paper. The reason for a thorough and detailed study was the inability to start a diesel engine after its continuous operation for 2800 hours at an average load of 45 %, followed by its shutdown. The grade of fuel used during this period is RMK 500 (ISO — 2041F 2010/12). For experimental confirmation of wear, high-pressure fuel pumps with new plunger pairs are installed on a diesel engine in sequence through one cylinder, i. e. the odd-numbered cylinders are fitted with pumps with new plunger pairs, the even ones are left worn out. At the same time, an uneven distribution of the exhaust gases temperature is observed over the even and odd cylinders. In addition, analysis of the fuel has showed the increased value of aluminosilicates and mechanical impurities even after separation. In the work it is shown that the presence of impurities in the fuel is the main reason for the destruction of the plunger pairs.

Keywords: fuel pump, high-pressure pump, plunger pair, wear, abrasive, plunger, fuel, filtration, cleaning, ship industry.

For citation:

Belov, Dmytrii E., and Aleksandra V. Ivanovskaya. "Fuel physical parameters influence on plunger pairs wear of high pressure fuel pumps." *Vestnik Gosudarstvennogo universiteta morskogo i rechnogo flota imeni admirala S. O. Makarova* 13.3 (2021): 409–418. DOI: 10.21821/2309-5180-2021-13-3-409-418.

УДК 621.31

ВЛИЯНИЕ ФИЗИЧЕСКИХ ПОКАЗАТЕЛЕЙ ТОПЛИВА НА ИЗНОС ПЛУНЖЕРНЫХ ПАР НАСОСОВ ВЫСОКОГО ДАВЛЕНИЯ

Д. Е. Белов, А. В. Ивановская

ФГБОУ ВО «Керченский государственный морской технологический университет»,
Керчь, Российская Федерация

В работе приведены доказательства того, что при выборе судового топлива зачастую приоритетным является его стоимость, а не качество, что аргументировано наличием на судне системы топливообработки. Подчеркивается, что бункеровка некачественным топливом впоследствии негативно сказывается на состоянии топливной аппаратуры и топливного насоса высокого давления, отвечающего за дозирование топлива и степень нагрузки дизеля в целом. Как показывает статистика, порядка 75 % топливных насосов высокого давления приходят в негодность из-за износа плунжерных пар. Поэтому исследование причин их износа при работе на тяжелом топливе является актуальной задачей. В статье приведены результаты исследования состояния плунжерной пары судовых дизелей типа Hyundai Himsem H21/32, представляющих собой четырехтактный двигатель с газотурбинным наддувом эффективной мощностью $N_e = 1860$ кВт, используемых на судах в качестве привода дизель-генераторов. Отмечается,

что причиной тщательного и детального исследования является отсутствие возможности запуска дизеля после его непрерывной работы в течение 2800 мото-ч на средней нагрузке, равной 45 %, с последующей его остановкой. В этот период используемая марка топлива — RMK 500 (ISO-2041F 2010/12). Для экспериментального подтверждения износа на дизеле были установлены топливные насосы высокого давления с новыми плунжерными парами в приведенной последовательности: к нечетным цилиндрам установлены насосы с новыми плунжерными парами, а у четных оставлены изношенные. При этом наблюдалось неравномерное распределение температуры выпускных газов по четным и нечетным цилиндрам. Кроме того, анализ топлива показал повышенное значение алюмосиликатов и механических примесей даже после сепарации. В работе показано, что именно наличие примесей в топливе является главной причиной разрушения плунжерных пар.

Ключевые слова: топливный насос, ТНВД, плунжерная пара, износ, абразив, плунжер, топливо, фильтрация, очистка, судовая промышленность.

Для цитирования:

Белов Д. Е. Влияние физических показателей топлива на износ плунжерных пар насосов высокого давления / Д. Е. Белов, А. В. Ивановская // Вестник Государственного университета морского и речного флота имени адмирала С. О. Макарова. — 2021. — Т. 13. — № 3. — С. 409–418. DOI: 10.21821/2309-5180-2021-13-3-409-418.

Введение (Introduction)

Практика эксплуатации судовых энергетических установок показывает, что в среднем 75 % топливных насосов высокого давления (ТНВД) приходят в негодность именно из-за износа плунжерных пар ввиду затрудненного пуска двигателя, неустойчивой работы, потери цилиндровой мощности при повышении нагрузки (характерно для судовых дизель-генераторов) [1]. Поэтому изучение причин износа прецизионных пар на сегодняшний день является актуальной задачей.

В настоящее время существуют методики теоретического прогнозирования состояния плунжерных пар в ТНВД, а также математического моделирования их износа. [2]. Однако для подтверждения таких моделей лучше опираться на данные, полученные опытным и экспериментальным путем, поскольку они всегда помогают производителям любых агрегатов вносить какие-либо изменения в технологию их производства, а также проводить разработку мероприятий по улучшению качества выпускаемого оборудования, в частности ответственных агрегатов для судовой энергетики.

Целью работы является исследование состояния плунжерных пар насосов высокого давления при работе на тяжелом топливе с наличием в его составе химических и механических примесей.

Методы и материалы (Methods and Materials)

На сегодняшний день методы диагностики состояния топливных насосов можно разделить на две группы. К первой группе относятся методы проверки состояния без полной разборки насоса. К наиболее распространенному способу оценки состояния плунжерной пары относится диагностика по параметрам давления в трубке высокого давления (ТВД) от ТНВД до форсунки, по параметрам вибрации ТВД от форсунок. Однако на практике это усложняет диагностику, так как данный метод применим только при износах выше предельно-допустимых значений, когда давление в нагнетательной части насоса не повышается до значений начала впрыска топлива через форсунку в цилиндры двигателя [3].

Существует также возможность математического определения производительности насосов высокого давления, исходя из давления нагнетания топлива. С момента начала открытия распылителя форсунки (начала подъема иглы) и до момента завершения нагнетания (возврат иглы в исходное положение) наблюдается расход топлива, вытекающего через распылительные отверстия площадью F . Применительно к впрыснутому объему топлива dV , вытекающему в течение промежутка времени dt , в этом случае выражение будет иметь следующий вид:

$$dV = \mu F \sqrt{\frac{2}{\rho} (P_{\phi} - P_{\text{и}})} d\tau, \quad (1)$$

где μ — расходный коэффициент; P_{ϕ} — давление смеси в форсунке; $P_{ц}$ — давление топливной смеси в цилиндре двигателя.

При наличии точного значения расходного коэффициента расчетный метод позволяет достаточно точно определить объем топлива на выходе из плунжерной пары ТНВД и сопоставить его со значениями, полученными экспериментальным путем.

Ко второй группе относятся методы, требующие установки ТНВД на специализированный стенд типа КИ-15711, а также полной разборки ТНВД и проведения их полной дефектации. Последний метод дефектации дает подробную картину состояния плунжерной пары и агрегата в целом. Последующие результаты исследования состояния плунжерной проводились для судовых дизелей типа Hyundai Himsem H21/32. Данный дизель представляет собой четырехтактный двигатель с газотурбинным наддувом эффективной мощностью $N_e = 1860$ кВт, используемый на судах в качестве привода дизель-генераторов.

Причиной тщательного и детального исследования является отсутствие возможности запуска дизеля после его непрерывной работы в 2800 мото-ч на средней нагрузке, равной 45 %, с последующей его остановкой. Для более детального анализа рассмотрим состояние некоторых элементов системы топливоподачи и подготовки данного двигателя, а также состав топлива с усредненными физико-химическими показателями, полученными из специализированной лаборатории FOBAS® (табл. 1). Марка используемого топлива в настоящее время RMK 500 (ISO — F 2010/12) [4].

Таблица 1

Физико-химические показатели топлива

Плотность	кг/л	1,0049
Вязкость при 50 °C	сСт	370,1
Сера	%	2,37
Температура вспышки	°C	>70
Зольность	%	0,061
Низшая теплота сгорания	МДж/кг	40,18
Температура помутнения	°C	6
Температура сепарации	°C	96
Температура после подогревателя	°C	134

В табл. 2 приведены показатели механических примесей данного топлива до и после сепарации.

Таблица 2

Показатели примесей топлива

Механические примеси	H ₂ O, %	Al + Si, мг/кг	Wa, мг/кг	Ig, мг/кг	Ni, мг/кг	Ph, мг/кг	Mg, мг/кг
До сепарации	0,18	57	149	26	36	6	2
После сепарации	0,08	17	96	23	29	5	2

Исходя из показателей, представленных в табл. 2, отмечено повышенное среднестатистическое значение алюмосиликатов топлива ($Al + Si > 16$ (мг/кг)), повышенное содержание механических примесей ($> 0,1$ %), а также Ph и $Wa > 40$ (мг/кг) для данных типов дизелей [5]. При непрерывной работе дизеля выполнялся плановый осмотр с промывкой следующих агрегатов. Периодичность указана в табл. 3.

Таблица 3

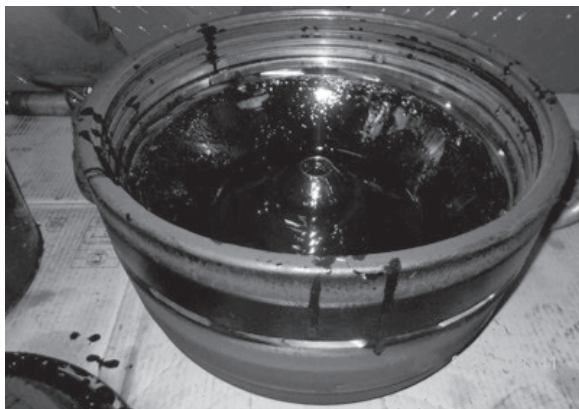
Периодичность плановых осмотров

Осмотр, промывка топливного сепаратора	Каждые 800 мото-ч
Промывка фильтров ТО	240 мото-ч
Промывка фильтров грубой очистки	480 мото-ч
Промывка фильтров ТО на дизеле	168 мото-ч
Проверка вискозиметра	720 мото-ч

Примечание. ТО — тонкая очистка.

Каждые 800 ч производилась остановка и последующая промывка проточной части сепаратора марки Westfalia OSD 0211 — рис. 1. Инспекция показала наличие внутри проточной части вязкой клейкой субстанции и следов парафина даже при соблюдении точной температуры сепарирования во избежание появления воска (96 °С).

а)



б)

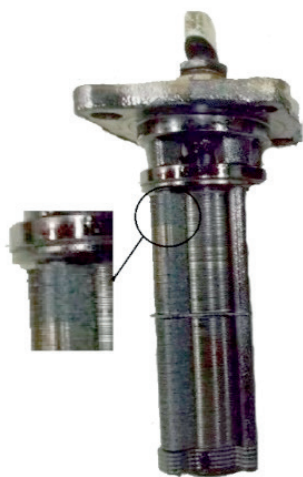


Рис. 1. Проточная часть сепаратора Westfalia OSD 0211:

а — нижняя часть барабана и пакет тарелок с отложениями шлама (асфальтены, парафины, воск);
б — отложения шлама в зазоре между нижней и верхней частями барабана сепаратора

При промывке сепарирующих тарелок и барабана применялись специальные химические агенты, так как промывка дизельным топливом не давала надлежащего эффекта. Следует отметить, что для улучшения качества топлива и повышения эффективности сепараторы были включены на параллельную работу. Однако при этом возникла необходимость вскрыть проточную их часть для чистки раньше планируемого периода из-за значительного снижения производительности (от номинальной, равной 2600 кг/ч, до 1200 кг/ч).

а)



б)

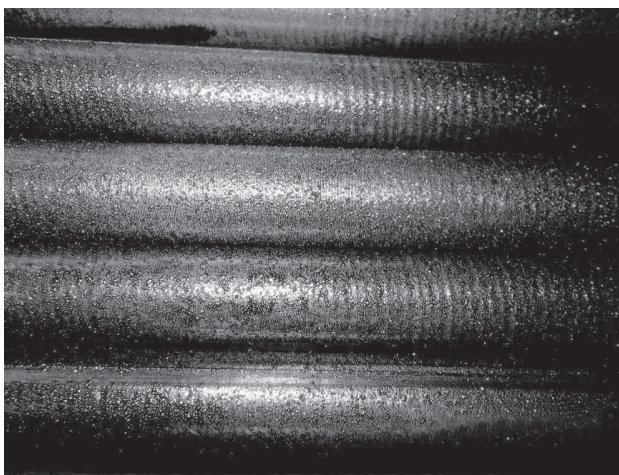


Рис. 2. Состояние фильтров тонкой очистки:

а — фильтр в сборе; б — фильтрующие элементы после 2800 мото-ч работы

Плановая проверка состояния фильтров тонкой очистки (рис. 2) показала наличие мелких твердых абразивных частиц на поверхности фильтров, а также большая часть фильтра была покрыта вязкой клейкой пленкой. Даже при незначительном загрязнении фильтра разность давлений на входе и выходе топлива из фильтра оказывалась значительной для срабатывания сигнализации в МКО (машино-котельном отделении). При вскрытии фильтра было выявлено наличие тонкой

клеякой пленки по составу, близкому к силикону и воску. Нормальное давление на входе составляет $8,9 \text{ кг/см}^2$, на выходе — $7,5 \text{ кг/см}^2$ [6]–[7]. Для дизеля, вращающего генератор переменного тока, значение давления в $5,5 \text{ кг/см}^2$ становится критическим и при большой нагрузке система защиты может отключить некоторые вторичные потребители от сети генератора для недопущения его полной остановки.

Основными причинами затрудненного пуска дизельного двигателя, из-за неполадок в топливной системе, могут быть следующие: пониженная температура и вязкость топлива на входе в двигатель, нарушение герметичности в системе нагнетания, неисправность регулятора частоты вращения, заклинивание плунжерной пары одного из насосов высокого давления, критический износ плунжерной пары и т. д. Схема дефектации и предельные значения износов для ТНВД данного типа приведены на рис. 3.

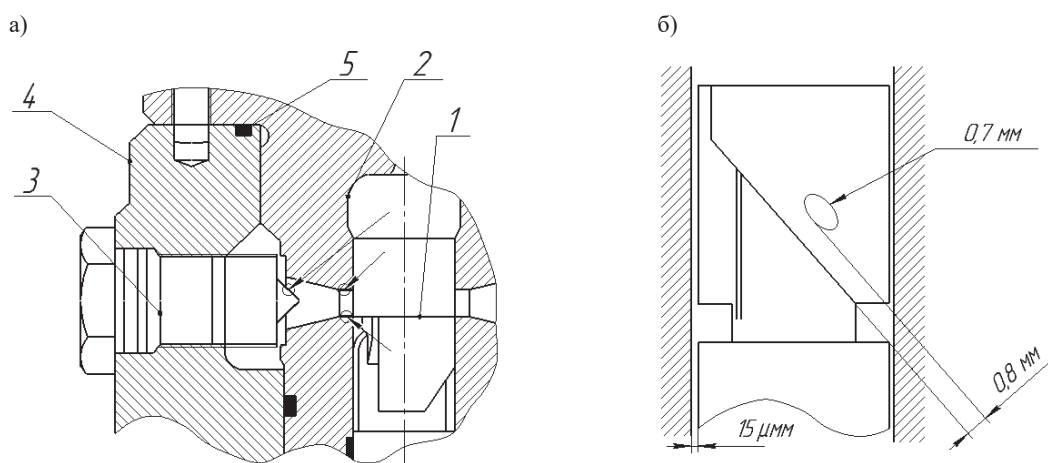


Рис. 3. Схема дефектовки (а) и предельные браковочные размеры (б) плунжерной пары ТНВД:
1 — плунжер насоса; 2 — плунжерная втулка; 3 — дефлектор;
4 — корпус насоса; 5 — уплотнительные кольца

На рис. 3 (слева) стрелками указаны места контроля состояния поверхностей при плановом осмотре ТНВД. Так как насосы высокого давления работают с подпором топлива, на входе в ТНВД всегда образуется повышенное давление рабочей смеси. Поэтому с целью предотвращения эрозионных разрушений всасывающих и отсечных отверстий устанавливают дефлекторы. При осмотре состояния дефлектора следует обратить внимание на состояние его средней части, а также носовой, в месте его примыкания к всасывающему отверстию во втулке. При осмотре дефлектора на нем проверяют наличие мелких задиrow и выбоин. При отсутствии каких-либо дефектов дефлекторы подлежат замене каждые 32000 мото-ч [8], [9].

Состояние плунжеров также проходит проверку. Причем на кромках его нагнетательной части не должно быть каких-либо задиrow и эрозионных «пятен». При наличии явных эрозионных пятен плунжер подвергается замерам, так как диаметр пятна не должен превышать $0,7 \text{ мм}$ [10]–[12]. После тщательного осмотра состояния всех систем дизель-генератора был произведен полный осмотр топливных насосов высокого давления. На рис. 4 приведены результаты проверки состояния плунжерных пар после остановки дизель-генератора. При разборке ТНВД явных дефектов обнаружено не было, заклинивания и следы недостаточной смазки отсутствовали. Однако на нагнетательной части плунжеров (рис. 4) были видны следы эрозионного и химического воздействия топлива и его составляющих на поверхность плунжера. Средний размер диаметра пятна составлял 18 мм , что превышает допустимое отклонение. На поверхности плунжера также были обнаружены задиры, мелкие царапины, а под нагнетательной частью плунжера высветленный металл. В судовых условиях внутреннее состояние втулки ТНВД оценить сложно, однако видно, что она подверглась значительной полировке зеркала (можно определить визуально).

а)



б)



Рис. 4. Состояние плунжерных пар при работе на топливе RMK500 длительностью 2800 мото-ч:
а — общий вид плунжерных пар; б — эрозионные пятна на поверхности плунжера

При исследовании проблемы разрушения плунжерных пар было установлено, что главной причиной их разрушения явилось наличие механических примесей в используемом топливе, а именно наличие алюмосиликатов (Al_2O_3 и SiO), которые попадают в топливо при каталитическом крекинге [13]–[15].

Результаты (Results)

Демонтаж ТНВД не производился, поскольку общая продолжительность работы дизеля составляла 16200 мото-ч и поэтому попадание в проточную часть абразива вследствие промывки или очистки можно исключить. Для математического обоснования вероятности износа плунжерных пар рассмотрим методику, предложенную А. П. Ухановым [3]. Исходя из максимальной пропускной способности автоматического фильтра тонкой очистки, установленного перед двигателем (18 мкм), примем размер абразивной частицы, равным 10 мкм. Предположим, что абразивное зерно кремния будет внедряться в плунжер и втулку плунжерной пары одновременно, закрепляясь на одной из поверхностей и прорезая канавку на другой поверхности при движении (рис. 5). В данном случае появляется возможность определить объем вытесненного материала от внедрения абразивной частицы.

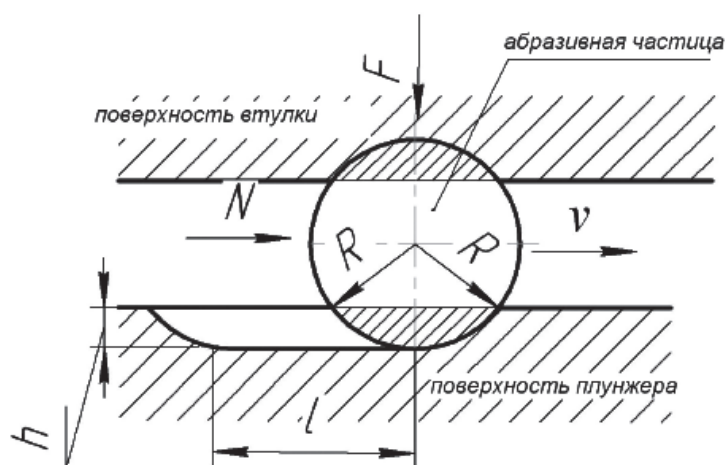


Рис. 5. Схема определения объема вытесненного материала при образовании царапины на поверхности при движении:

h — глубина внедрения частицы кремния; l — ее путь; F — сила, действующая на эту абразивную частицу при сжатии втулки и плунжера; N — сила, действующая на абразивную частицу, возникающая при движении плунжера с определенной скоростью v ;
 R — радиус абразивной частицы

Объем вытесненного материала, м^3 , при образовании царапины на поверхности трения составляет

$$V = Sh_{\text{тр}}, \quad (2)$$

где S — площадь сегмента окружности вытесненного участка частицей, м^2 ; $h_{\text{тр}}$ — путь трения, м .

Площадь сегмента окружности от внедрения частицы

$$S = 2R^2 \sqrt{2 - \sqrt{2 + 2\sqrt{1 - \frac{2Rh - h^2}{R^2}}} - (R - h)\sqrt{2Rh - h^2}}, \quad (3)$$

где R — радиус частицы, м ; h — глубина внедрения частицы, м .

Так как глубина внедрения, м , абразивной частицы будет зависеть от зазора и радиуса попавшей в зазор частицы, можно упростить выражение (3):

$$h = R - \frac{\delta}{2}, \quad (4)$$

где δ — зазор между плунжером и втулкой без учета влияния давления на данную втулку, м .

Подставив в выражение (3) вместо h выражение (4), получим новое выражение площади сегмента окружности S , м^2 , вида

$$S = 2R^2 \sqrt{2 - \sqrt{2 + \frac{\delta}{R}}} - \frac{\delta}{2} \sqrt{R^2 - \frac{\delta^2}{4}}. \quad (5)$$

Диаметр d абразивного зерна, попавшего в зазор, будет зависеть от величины зазора, образовавшегося между плунжером и втулкой δ . При таком вычислении предположительно величина зазора равна 8 мкм (по данным завода-изготовителя). Для расчета выражения (3) примем зазор между втулкой и плунжером постоянной величиной.

Обсуждение (Discussion)

Подставив значения диаметров зерна абразива (в рассматриваемом случае — зерна кремния) получим теоретическую зависимость площади сектора износа от величины зерна, исходя из предположения, что абразивная частица имеет большую твердость, чем у металла, из которого изготовлен плунжер (рис. 6).

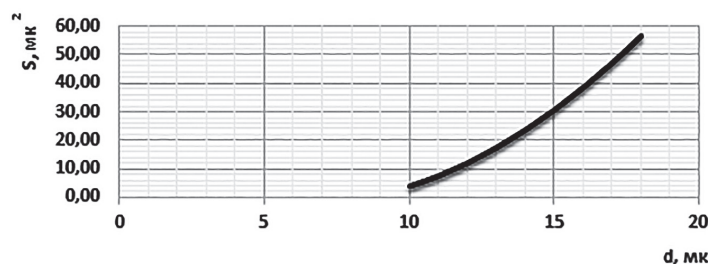


Рис. 6. Зависимость площади износа от диаметра абразивной частицы

Данные результаты расчетов справедливы для износа, вызванной одной абразивной частицей. Следовательно, количество абразивных частиц будет прямо пропорционально площади износа. Чтобы окончательно подтвердить износ плунжерных пар ТНВД, на дизеле были установлены топливные насосы высокого давления с новыми плунжерными парами в последовательности через один цилиндр, т. е. к нечетным цилиндрам установили насосы с новыми плунжерными парами, а у четных цилиндров оставили изношенные плунжерные пары для проверки пуска двигателя и рабочих температур. На рис. 7 приведена соответствующая диаграмма температур выпускных газов в цилиндрах двигателя.

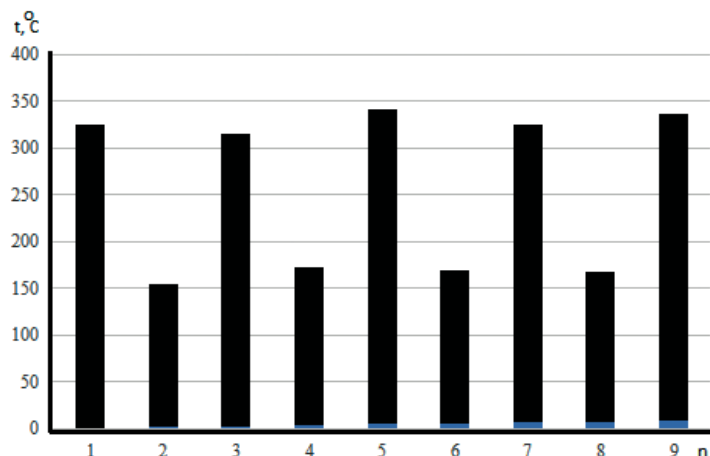


Рис. 7. Распределение температуры выпускных газов по цилиндрам:
 n — порядковый номер цилиндра двигателя;
 t — температура выпускных газов двигателя, °C

Основной причиной отсутствия запуска двигателя является нехватка топлива для его разгона и набора номинальной частоты вращения, так как в плунжерной паре наблюдалось падение давления рабочей смеси при такте нагнетания топлива с уменьшением КПД насоса. [9]. Из рис. 7 видно, что цилиндры с изношенными плунжерными парами в ТНВД значительно отстают по рабочим температурам. С целью предотвращения неравномерного износа подшипников скольжения коленчатого вала дизель-генератор не включался в параллельную работу и не принимал нагрузку от потребителей [9]. Также при проверке цилиндров по давлению сжатия и сгорания отмечалось снижение давления сгорания p_z с нормального, равного 16,2 Па, до $11,3 \cdot 10^6$ Па. При старте двигателя вынужденной мерой являлось физическое воздействие на рейки изношенных насосов путем полного нажатия на них до максимальной отметки, так как положение рейки регулятора частоты вращения не позволяло запустить двигатель с уменьшенной подачей топлива в цилиндры.

Заключение (Summary)

Основным назначением систем топливообработки и фильтрации является сохранение ресурса элементов топливной аппаратуры путем подготовки топлива до требуемых эксплуатационных параметров до того, как оно будет впрыснуто в цилиндр двигателя. Наиболее опасным свойством некачественного топлива является наличие в нем механических примесей, которые очень близки по плотности с нефтепродуктом, что осложняет дальнейшую очистку и сепарацию [10]. Несмотря на наличие большого выбора судовых установок по очистке топлива, нефтепродукты всегда содержат мельчайшие частицы в виде примесей, которые наносят необратимые разрушения и износ топливной аппаратуре.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Костецкий Б. И. Износ плунжерных пар насосов / Б. И. Костецкий [и др.] // Механизация и электрификация социалистического хозяйства. — 1973. — № 12. — С. 21–48.
2. Уханов А. П. Теоретическая оценка влияния дизельного смесового топлива на износ плунжерных пар ТНВД / А. П. Уханов, Д. А. Уханов, Е. Г. Ротанов, Г. А. Окунев // Вестник Ульяновской государственной сельскохозяйственной академии. — 2011. — № 2 (14). — С. 115–119.
3. Пипченко А. Н. Эксплуатация, обслуживание и ремонт двигателей MAN B&W-ME / А. Н. Пипченко. — Одесса: Тренажерный центр, 2014. — 305 с.
4. Орешенков А. В. Трибологические характеристики горюче-смазочных материалов / А. В. Орешенков, Н. Н. Гришин, С. Е. Степанова // Мир нефтепродуктов. Вестник нефтяных компаний. — 2017. — № 2. — С. 23–25.

5. Инструкция по эксплуатации: «Hyundai Himsen H21/32». — Корея, 2014. — 387 с.
6. Возницкий И. В. Аварии судовых двигателей внутреннего сгорания / И. В. Возницкий, Л. А. Иванов. — М.: Морской транспорт, 2015. — 242 с.
7. Калугин В. Н. Характеристики и свойства морских сортов топлива, особенности топливо-использования: учеб. пособие / В. Н. Калугин. — Одесса: ОГМА, 2000. — 51 с.
8. Пахомов Ю. А. Топливо и топливные системы судовых дизелей / Ю. А. Пахомов, Ю. П. Коробков [и др.]. — М.: Консульт, 2004. — 496 с.
9. Ивановская А. В. Контроль смазочных масел в судовых условиях. Проблемы и способы их совершенствования / А. В. Ивановская, С. Г. Неженец, Д. Е. Белов // Вестник Керченского государственного морского технологического университета. — 2018. — № 3. — С. 49–57.
10. Белоусов Е. В. Топливные системы современных судовых дизелей: учеб. пособие / Е. В. Белоусов. — 3-е изд., стер. — СПб.: Издательство «Лань», 2017. — 256 с.
11. Reddy M. S. Effect of straight vegetable oil blends and biodiesel blends on wear of mechanical fuel injection equipment of a constant speed diesel engine / M. S. Reddy, N. Sharma, A. K. Agarwal // Renewable Energy. — 2016. — Vol. 99. — Pp. 1008–1018. DOI: 10.1016/j.renene.2016.07.072.
12. Belagur V. Influence of fuel injection rate on the performance, emission and combustion characteristics of DI diesel engine running on Calophyllum inophyllum Linn oil (Honne Oil)/diesel fuel blend / V. Belagur. — SAE Technical Paper, 2010. — № 2010–01–1961. DOI: <https://doi.org/10.4271/2010-01-1961>.
13. Alahmer A. Influence of using emulsified diesel fuel on the performance and pollutants emitted from diesel engine // Energy Conversion and Management. — 2013. — Vol. 73. — Pp. 361–369. DOI: 10.1016/j.enconman.2013.05.012.
14. Yue P. The fluid–structure–thermal coupled characteristics of the leakage rate of piston couples interface for common-rail injector / P. Yue, J. Zhao, K. Wei, X. Ma // Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part C: Journal of Mechanical Engineering Science. — 2019. — Vol. 233. — Is. 16. — Pp. 5826–5835. DOI: 10.1177/0954406219856032.
15. Osipowicz T. The analysis of technical condition common rail fuel system components / T. Osipowicz, K. F. Abramczak, Z. Matuszak, M. Jaśkiewicz, K. Ludwinek, M. Poliak // 2018 XI International Science-Technical Conference Automotive Safety. — IEEE, 2018. — Pp. 1–8. DOI: 10.1109/AUTOSAFE.2018.8373304.

REFERENCES

1. Kostetskii, B. I. [et al.]. “Iznos plunzhernykh par nasosov.” *Mekhanizatsiya i elektrifikatsiya sotsialisticheskogo khozyaistva* 12 (1973): 21–48.
2. Ukhanov, A. P., D. A. Ukhanov, E. G. Rotanov and G. A. Okunev. “Theoretical assessment of the impact of diesel fuel composition on the wear of plunger injection pump.” *Vestnik of Ulyanovsk state agricultural academy* 2(14) (2011): 115–119.
3. Pipchenko, A. N. *Ekspluatatsiya, obsluzhivanie i remont dvigatelei MAN B&W-ME*. Odessa: Trenazhernyi tsentr, 2014.
4. Oreshenkov, A. V., N. N. Grishin, and S. E. Stepanova. “Tribological characteristics fuels and lubricating materials.” *World of Petroleum Products* 2 (2017): 23–25.
5. *Instruktsiya po ekspluatatsii: «Hyundai Himsen N21/32»*. Koreya, 2014.
6. Voznitskii, I. V., and L. A. Ivanov. *Avarii sudovykh dvigatelei vnutrennego sgoraniya*. M.: Morskoi transport, 2015.
7. Kalugin, V. N. *Kharakteristiki i svoystva morskikh sortov topliva, osobennosti toplivo-ispol'zovaniya: ucheb. posobie*. Odessa: OGMA, 2000.
8. Pakhomov, Yu. A. [et al.]. *Toplivo i toplivnye sistemy sudovykh dizelei*. M.: Konsul't, 2004.
9. Ivanovskaya, A. V., S. G. Nezhenets, and D. E. Belov. “Kontrol' smazochnykh masel v sudovykh usloviyakh. Problemy i sposoby ikh sovershenstvovaniya.” *Vestnik Kerchenskogo gosudarstvennogo morskogo tekhnologicheskogo universiteta* 3 (2018): 49–57.
10. Belousov, E. V. *Toplivnye sistemy sovremennykh sudovykh dizelei: ucheb. posobie*. 3rd ed. SPb.: Izdatel'stvo «Lan'», 2017.
11. Reddy, M. Sarveshwar, Nikhil Sharma, and Avinash Kumar Agarwal. “Effect of straight vegetable oil blends and biodiesel blends on wear of mechanical fuel injection equipment of a constant speed diesel engine.” *Renewable Energy* 99 (2016): 1008–1018. DOI: 10.1016/j.renene.2016.07.072.

12. Belagur, Venkanna. *Influence of fuel injection rate on the performance, emission and combustion characteristics of DI diesel engine running on Calophyllum inophyllum Linn oil (Honne Oil)/diesel fuel blend*. No. 2010–01–1961. SAE Technical Paper, 2010. DOI: 10.4271/2010-01-1961.

13. Alahmer, Ali. “Influence of using emulsified diesel fuel on the performance and pollutants emitted from diesel engine.” *Energy Conversion and Management* 73 (2013): 361–369. DOI: 10.1016/j.enconman.2013.05.012.

14. Yue, Pengfei, Jianhui Zhao, Kebiao Wei, and Xiuzhen Ma. “The fluid–structure–thermal coupled characteristics of the leakage rate of piston couples interface for common-rail injector.” *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part C: Journal of Mechanical Engineering Science* 233.16 (2019): 5826–5835. DOI: 10.1177/0954406219856032.

15. Osipowicz, T., K. F. Abramek, Z. Matuszak, M. Jaśkiewicz, K. Ludwinek, and M. Poliak. “The analysis of technical condition common rail fuel system components.” *2018 XI International Science-Technical Conference Automotive Safety*. IEEE, 2018. DOI: 10.1109/AUTOSAFE.2018.8373304.

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

Белов Дмитрий Евгеньевич — аспирант

Научный руководитель:

Ивановская Александра Витальевна
ФГБОУ ВО «Керченский государственный
морской технологический университет»
298309, Российская Федерация, Керчь,
ул. Орджоникидзе, 82
e-mail: oscarweb.007@gmail.com

Ивановская Александра Витальевна —
кандидат технических наук, доцент
ФГБОУ ВО «Керченский государственный
морской технологический университет»
298309, Российская Федерация, Керчь,
ул. Орджоникидзе, 82
e-mail: invkerch@yandex.ru

INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Belov, Dmytrii E. — Postgraduate

Supervisor:

Ivanovskaya, Aleksandra V.
Kerch State Maritime
Technological University,
298309, Russia, Kerch,
Ordzhonykydze St., 82
e-mail: oscarweb.007@gmail.com

Ivanovskaya, Aleksandra V. —
PhD, associate professor
Kerch State Maritime
Technological University
82 Ordzhonykydze Str., Kerch, 298309,
Russian Federation
e-mail: invkerch@yandex.ru

Статья поступила в редакцию 23 апреля 2021 г.

Received: April 23, 2021.

ЭЛЕКТРОТЕХНИЧЕСКИЕ КОМПЛЕКСЫ И СИСТЕМЫ

DOI: 10.21821/2309-5180-2021-13-3-419-429

ALGORITHM FOR ASYNCHRONOUS ELECTRIC DRIVE VECTOR CONTROL WITH ROTOR RESISTANCE ESTIMATION

V. F. Samosejko¹, V. O. Guskov²

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

² — Electrosila Plant — branch of PJSC “Power machines”,
St. Petersburg, Russian Federation

To implement the vector control by the asynchronous motor, it is necessary to have information about the resistance of the rotor winding, which can be significantly changed during the operation of the engine. The main reason for changing the resistance of the electrical machine windings is their heating. In addition, a priori information about the resistance of the rotor is unreliable. An error in estimating the impedance of the rotor winding leads to a decrease in the quality of control. Reducing the quality of the control consists in changing the value of the electromagnetic moment and reducing the speed control range. To solve this problem, an algorithm for identifying the impedance of rotary winding of the asynchronous motor, which allows to assess it, without resorting to complex algorithms and calculations. The basis for the implementation of the proposed algorithm is a modified vector control that uses special differential equations of the vector control. The presence of discrepancy in stationary vector control equations indicates errors in a priori resistance assessment. The special differential equations of stress residuals, which allow dynamically adjusting a priori information about the rotor resistance, as well as taking into account its temperature fluctuations during operation, are proposed in the paper. To implement this algorithm, it is necessary to obtain information about the currents occurring in the phase windings of the stator and the speed of rotation of the asynchronous motor rotor. A computer modeling, confirming the performance of the algorithm presented is completed in the paper. The rendered algorithm for estimating the rotor resistance is fairly simple in implementation and does not require large computational costs, which highlights it among other well-known algorithms. This algorithm is recommended for use in vector systems of asynchronous engines management, including powerful propulsion motors on the water transport facilities.

Keywords: asynchronous motor, vector control, evaluation of rotor winding resistance.

For citation:

Samosejko, Veniamin F., and Vladimir O. Guskov. “Algorithm for asynchronous electric drive vector control with rotor resistance estimation.” *Vestnik Gosudarstvennogo universiteta morskogo i rechnogo flota imeni admirala S. O. Makarova* 13.3 (2021): 419–429. DOI: 10.21821/2309-5180-2021-13-3-419-429.

УДК 621.3.072.6

АЛГОРИТМ ВЕКТОРНОГО УПРАВЛЕНИЯ АСИНХРОННЫМ ЭЛЕКТРОПРИВОДОМ С ОЦЕНКОЙ СОПРОТИВЛЕНИЯ РОТОРА

В. Ф. Самосейко¹, В. О. Гуськов²

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

² — Завод «Электросила» — филиал АО «Силовые машины»,
Санкт-Петербург, Российская Федерация

В представленной работе отмечается необходимость наличия для реализации векторного управления асинхронным двигателем информации о сопротивлении роторной обмотки, которая может существенно изменяться в процессе его эксплуатации. Подчеркивается, что основной причиной изменения сопротивлений обмоток электрической машины является их нагрев. Обращается внимание на то, что априорная

информация о сопротивлениях ротора, как правило, недостоверна, а также, что ошибка в оценке значения сопротивления роторной обмотки ведет к снижению качества управления, состоящего в изменении значения электромагнитного момента и снижении диапазона регулирования скорости. Для решения данной проблемы в работе рассмотрен алгоритм идентификации сопротивления роторной обмотки асинхронного двигателя, позволяющий выполнять его оценку, не прибегая к сложным алгоритмам и вычислениям. Основой для реализации предлагаемого алгоритма служит модифицированное векторное управление, использующее специальные дифференциальные уравнения векторного управления. Отмечается, что наличие невязок в стационарных уравнениях напряжений векторного управления свидетельствует об ошибках в априорной оценке сопротивления. В работе предложены специальные дифференциальные уравнения невязок напряжений, позволяющие динамически корректировать априорную информацию о сопротивлении ротора, а также учитывать его температурные колебания в процессе эксплуатации. Для реализации данного алгоритма необходимо получать информацию о токах, протекающих в фазных обмотках статора и скорости вращения ротора асинхронного двигателя. В работе выполнено компьютерное моделирование, подтверждающее работоспособность представленного алгоритма. Данный алгоритм оценки сопротивления ротора достаточно прост в реализации и не требует больших вычислительных ресурсов, что выделяет его среди других. Предложенный алгоритм рекомендуется для применения в векторных системах управления асинхронными двигателями, в том числе мощными гребными двигателями на объектах водного транспорта.

Ключевые слова: асинхронный двигатель, векторное управление, оценка сопротивления обмотки ротора.

Для цитирования:

Самосейко В. Ф. Алгоритм векторного управления асинхронным электроприводом с оценкой сопротивления ротора / В. Ф. Самосейко, В. О. Гуськов // Вестник Государственного университета морского и речного флота имени адмирала С. О. Макарова. — 2021. — Т. 13. — № 3. — С. 419–429. DOI: 10.21821/2309-5180-2021-13-3-419-429.

Введение (Introduction)

В настоящее время электродвижение широко применяется на всех видах транспорта, включая водный. Отличительными особенностями применения электродвижения на водном транспорте являются низкая скорость вращения и большая мощность, достигающая десятков мегаватт. Наиболее широкое распространение на судах получили асинхронные электродвигатели с короткозамкнутым ротором (далее АД). Так, мощность гребного АД на ледоколе «Арктика» составляет 20 МВт. Мощность гребного электродвигателя на проектируемых судах достигает 30 МВт и более. Управление такими двигателями осуществляется посредством электрических преобразователей энергии [1] на базе силовой электроники. Данные преобразователи позволяют управлять подводимой к электродвигателю энергией по заданному закону, реализуя различные способы управления. Очевидно, что к управлению мощными АД предъявляются повышенные требования. Частотное регулирование является наиболее совершенным способом управления АД, которое можно подразделить на следующие виды: скалярное, прямое управление моментом и векторное. Ранее указанные способы управления хорошо освещены в отечественной и зарубежной литературе.

Скалярное управление АД [2] достаточно просто реализуется и не требует использования информации о параметрах электродвигателя. Однако такой метод управления не позволяет реализовать качественное управление динамикой электромагнитных процессов. Поэтому он неприемлем для управления АД большой мощности, которые испытывают на себе большие возмущающие воздействия со стороны момента сопротивления гребного винта, работающего в сложных ледовых условиях. Прямое управление моментом [3] встроено в алгоритм векторной ШИМ инвертора преобразователя частоты и основано на выборе одного из базовых векторов управления инвертором. Достоинством этого метода является простота реализации алгоритма управления, недостатком — пульсации электромагнитного момента АД, которые приводят к увеличению энергопотребления и акустического шума. Указанные недостатки препятствуют его применению в процессе управления мощными гребными АД.

Векторное управление [4] существенно повышает качество динамических процессов, позволяя синтезировать статические характеристики АД, которые являются аналогичными для машин

постоянного тока. Поэтому применение векторного управления в мощных гребных асинхронных электроприводах судов представляется наиболее перспективным. Однако для реализации этого метода необходима информация о сопротивлении обмотки ротора и основной индуктивности, которые могут меняться в процессе эксплуатации в широких пределах, что оказывает негативное влияние на качество управления, выражающееся в изменении электромагнитного момента. Для устранения этого недостатка векторного управления АД используются различные методы идентификации параметров ротора.

Данные методы достаточно хорошо освещены в отечественной и зарубежной литературе. Для идентификации сопротивления обмотки ротора применяются адаптивные регуляторы [5], [6], алгоритмы, основанные на введении возмущающих сигналов по току [7], [8], наблюдатели Люенбергера [9] и другие всевозможные наблюдатели состояний [5], [10], а также алгоритмы, в основе которых заложен метод наименьших квадратов [11]. Последние исследования, заслуживающие особого внимания, приведены в источниках [12], [13], более широкий обзор методов идентификации параметров АД дан в работе [14]. Однако все представленные ранее методы требуют больших вычислительных ресурсов и являются сложными в реализации, что отрицательно сказывается на их широком практическом применении. В данной работе предлагается метод идентификации параметров асинхронного электродвигателя, не требующий сложных вычислительных алгоритмов, который основан на информации о токах, протекающих по статорным обмоткам, и скорости вращения ротора, он позволяет эффективно оценивать сопротивление ротора и основную статическую индуктивность асинхронного электродвигателя. Предлагаемый алгоритм идентификации сопротивления ротора встраивается в алгоритм модифицированного векторного управления, изложенный в работах [6] и [15].

Методы и материалы (Methods and materials)

Уравнения напряжений на обмотках асинхронного двигателя. Динамика электромагнитных динамических процессов в АД описывается уравнениями напряжений на обмотках АД, которые могут иметь различные формы записи [16]. В данной работе используются уравнения напряжений на обмотках статора и ротора машины, записанные в осях координат d – q , вращающихся со скоростью магнитного поля [15]:

$$u_d = R_1 \cdot i_d - \omega_1 \cdot L_{01} \cdot i_q + L_{01} \cdot p i_d - \omega_1 \cdot L_0 \cdot j_q + L_0 \cdot p j_d ; \quad (1)$$

$$u_q = R_1 \cdot i_q + \omega_1 \cdot L_{01} \cdot i_d + L_{02} \cdot p i_q + \omega_1 \cdot L_0 \cdot j_d + L_0 \cdot p j_q ;$$

$$0 = R_2 \cdot j_d - \omega_2 \cdot L_{02} \cdot j_q + L_{02} \cdot p j_d - \omega_2 \cdot L_0 \cdot i_q + L_0 \cdot p i_d ; \quad (2)$$

$$0 = R_2 \cdot j_q + \omega_2 \cdot L_{02} \cdot j_d + L_{02} \cdot p j_q + \omega_2 \cdot L_0 \cdot i_d + L_0 \cdot p i_q ,$$

где u_d, u_q — элементы вектора напряжения на обмотке статора; i_d, i_q и j_d, j_q — элементы векторов токов статора и ротора; R_1 и R_2 — электрические сопротивления обмоток статора и ротора; L_{01} и L_{02} — полные (синхронные) индуктивности обмоток статора и ротора; L_0 — основная индуктивность; ω_1 и ω_2 — частота токов статора и ротора.

В стационарном режиме работы токи обмотки ротора с использованием уравнений (2) могут быть представлены как функции от токов обмотки статора:

$$j_d = \frac{\omega_2 \cdot L_{02} \cdot (R_2 \cdot i_q - \omega_2 \cdot L_{02} \cdot i_d)}{R_2^2 + \omega_2^2 \cdot L_{02}^2} ; j_q = - \frac{\omega_2 \cdot L_{02} \cdot (R_2 \cdot i_d + \omega_2 \cdot L_{02} \cdot j_q)}{R_2^2 + \omega_2^2 \cdot L_{02}^2} . \quad (3)$$

Для упрощения изложения, облегчения восприятия и придания универсальности результатам используются относительные единицы. Уравнения напряжений в относительных единицах идентичны уравнениям (1) и (2), но в них все переменные отмечены верхним индексом*. Переход к относительным величинам осуществляется через базовые величины и описан в работе [6].

Уравнения напряжений векторного управления. Синтез динамики электромагнитных процессов при векторном управлении выполняется так, что обеспечивается равенство нулю продольного тока обмотки статора j_d при условии, что продольный ток обмотки статора i_d меняется так медленно, что $pi_d \approx 0$. Выполнение равенств $j_d = pi_d = 0$ является условием векторного управления, при выполнении которого уравнения напряжений статора (1) в относительных единицах преобразуются к виду [6]:

$$\begin{aligned} u_d^* &= R_1^* \cdot i_d^* - \omega_1^* \cdot L_q^* \cdot i_q^* + L_q^* \cdot pi_d^*; \\ u_q^* &= R_1^* \cdot i_q^* + \omega_1^* \cdot \psi_d^* + L_q^* \cdot pi_q^*, \end{aligned} \quad (4)$$

где $L_q^* = L_{01}^* - L_0^{*2}/L_{02}^*$ — относительная продольная индуктивность АД; $\psi_d^* = L_{01}^* \cdot i_d^*$ — относительное продольное потокоцепление; $L_{01}^* \approx L_{02}^* = L_d^*$ — относительная продольная индуктивность.

Относительное продольное потокоцепление ψ_d^* является характеристикой намагниченности магнитопровода АД. Зависимость $\psi_d^*(i_d^*)$ нелинейна и является характеристикой холостого хода АД, представленной в относительных единицах. Продольный ток i_d статора при векторном управлении определяет намагниченность магнитопровода АД, а поперечный — нагрузку. Для реализации векторного управления необходимо поддерживать продольный ток статора постоянным или изменять его так медленно, чтобы постоянная времени контура управления продольным током была больше или равна значению L_{01}/R_1 .

Из уравнений токов ротора (2) следует, что при $j_d = pi_d = 0$ должны выполняться соотношения:

$$j_q^* = \frac{L_0^*}{L_{02}^*} \cdot i_q^* \text{ и } \omega_2^* = \frac{R_2^* \cdot i_q^*}{L_{02}^* \cdot i_d^*}. \quad (5)$$

Второе равенство выражения (5) определяет относительную частоту токов в обмотке ротора. Для его выполнения необходимо знать параметры ротора R_2^* и L_{02}^* , которые достоверно неизвестны. При нагреве ротора от температуры 20 °С на 100 °С электрическое сопротивление ротора изменяется в $k_R \approx 1,5$ раза. Будем полагать, что фактическое сопротивление ротора определяется выражением $R_2^* = k_R \cdot R_2^*(0)$, где $R_2^*(0)$ — априорно принятая величина электрического сопротивления ротора до начала процесса адаптивного управления; $k_R \approx 0,5 \dots 3$ — температурный коэффициент ротора. При этом относительная частота токов в обмотке ротора с учетом магнитного насыщения и нагрева ротора определяется выражением

$$\omega_2^* = \frac{k_R \cdot R_2^*(0) \cdot i_q^*}{\psi_d^*}. \quad (6)$$

где $R_2^*(0)$ — априорно принятая величина электрического сопротивления ротора до начала процесса управления; $\psi_d^*(i_d^*) \approx L_{02}^* \cdot i_d^*$ — относительное продольное потокоцепление.

Относительный электромагнитный момент АД в общем случае определяется выражением

$$M^* = L_0^* \cdot (i_d^* \cdot j_q^* - i_q^* \cdot j_d^*). \quad (7)$$

Если в это выражение подставить токи ротора (3), то электромагнитный момент с учетом соотношения (6) можно представить в виде функции температурного коэффициента ротора:

$$M^*(k_R) = \frac{L_0^{*2} \cdot i_d^{*2}}{L_{02}^* \cdot t_\theta} \cdot \frac{(1 - k_R)^2 + t_\theta^2 \cdot k_R^2}{k_R^3}, \quad (8)$$

где $t_\theta = i_q/i_d$ — тангенс угла токовой нагрузки.

Если сопротивление ротора достоверно известно, то можно принять, что температурный коэффициент ротора $k_R = 1$. Отношение $M^*(k_R)/M^*(1)$ будет определять погрешность векторного управления при достоверно неизвестном сопротивлении ротора. Графики отношения $M^*(k_R)/M^*(1)$

приведены на рис. 1, откуда следует, что для реализации векторного управления необходима достоверная информация о параметрах ротора, причем его температурный коэффициент k_R должен меняться при нагреве.

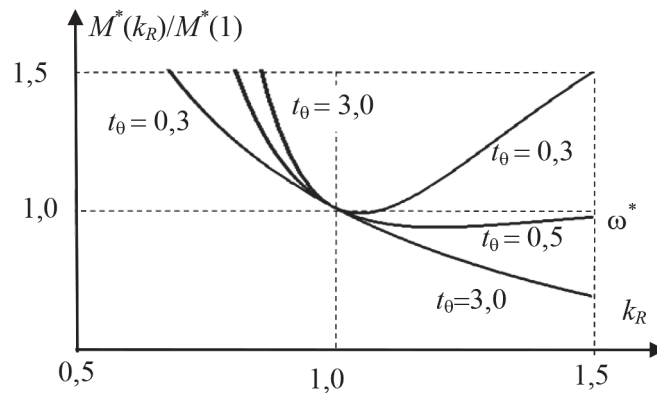


Рис. 1. Графики, характеризующие погрешность векторного управления электромагнитным моментом при неадекватной информации об электрическом сопротивлении ротора

Идентификация параметров ротора. Ошибка в оценке сопротивления ротора приводит к невязкам в стационарных уравнениях напряжений (4):

$$\Delta u_d^* = u_d^* - R_1^* \cdot i_d^* + \omega_1^* \cdot L_q^* \cdot i_q^*; \quad (9)$$

$$\Delta u_q^* = u_q^* - R_1^* \cdot i_q^* - \psi_d^*.$$

Используя стационарные исходные уравнения напряжений (1) и (2), невязки напряжений (9) можно записать в следующем виде:

$$\Delta u_d^* = -\frac{\omega_1^* \cdot L_0^{*2} \cdot i_d^{*2} \cdot i_q^* \cdot (k_R - 1)}{L_{02}^* \cdot (i_d^{*2} + k_R \cdot i_q^{*2})}; \quad \Delta u_q^* = \frac{\omega_1^* \cdot L_0^{*2} \cdot i_d \cdot i_q^{*2} \cdot k_R \cdot (k_R - 1)}{L_{02}^* \cdot (i_d^{*2} + k_R \cdot i_q^{*2})}. \quad (10)$$

Из выражений (9) и (10) следует, что невязки (9) являются функциями температурного коэффициента сопротивления ротора k_R , который можно определить по формуле

$$k_R = \frac{\Delta u_q^* \cdot i_d^*}{\Delta u_d^* \cdot i_q^*}. \quad (11)$$

Для вычисления температурного коэффициента сопротивления ротора по формуле (11) в формуле невязок (9) быть известны элементы — переменные u_d , u_q , i_d , i_q , ω_1 , а также параметры R_1 , L_d и L_q . Будем полагать, что достоверная информация об относительных токах i_d^* , i_q^* поступает с датчиков тока, а также, что информация об элементах вектора напряжения на обмотке статора u_d , u_q , а также о частоте токов статора ω_1 достоверно известна, так как эти величины являются результатом вычислений по алгоритму векторного управления АД. Однако достоверная информация о параметрах машины R_1 , L_d и L_q отсутствует. Погрешность в априорной оценке параметров R_1 , L_d и L_q будет приводить к погрешности вычисления температурного коэффициента сопротивления ротора k_R . Кроме того, знаменатель формулы (11) в процессе функционирования привода с АД может принимать малые значения. В этом случае погрешность оценки коэффициента сопротивления ротора k_R по формуле (11) будет недопустимо большой, поэтому ее применение нежелательно.

Альтернативный подход к оценке температурного коэффициента сопротивления ротора k_R , предложенный в работе [6], состоит в решении любого из дифференциальных уравнений:

$$\text{sign}(\omega_1^* \cdot i_q^*) \cdot \Delta u_d = -T_R \cdot p k_R; \text{sign}(\omega_1^*) \cdot \Delta u_q = T_R \cdot p k_R, \quad (12)$$

где T_R — постоянная времени, которая должна удовлетворять неравенству $T_R > L_d/R_1$.

Однако погрешность полученных решений также будет зависеть от достоверности информации о параметрах двигателя R_1^* , L_d^* и L_a^* , используемых при вычислении невязок по формуле (9).

Для повышения точности оценки температурного коэффициента сопротивления ротора k_R следует видоизменить второе уравнение в формулах (12) с учетом алгоритма векторного управления, изложенного в работе [15]. Для формирования динамики электромагнитных процессов в данной работе используется контур виртуальной диссипации (рис. 2), позволяющий существенно уменьшить влияние сопротивления ротора на погрешность расчета невязки, выполняемого по формуле

$$\Delta u_d = y_a - (R_x^* + k_R \cdot R_l^*) \cdot i_a^* - \omega_l^* \cdot \psi_d^*(i_d), \quad (13)$$

где $\psi_d^*(i_d^*)$ — относительное продольное потокоцепление, которое является априорно известной функцией продольного тока i_d^* (характеристикой холостого хода АД).

Сопротивление короткозамкнутого ротора оценивается по формуле

$$R_\gamma = k_R \cdot R_\gamma(0),$$

где $R_2(0)$ — априорная оценка сопротивления ротора; k_R — переменная, которая находится путем решения второго дифференциального уравнения формул (12).

В формуле (13) температурные колебания электрического сопротивления статора учитываются тем же коэффициентом k_R , что и электрического сопротивления ротора. Это справедливо, если температура статора и ротора приблизительно одинакова, а также одинаковы температурные коэффициенты сопротивлений статора и ротора. Следует отметить, что в формуле (13) параметр виртуальной диссипации R_x много больше относительной величины сопротивления обмотки статора $k_R \cdot R_1^*$ и его значение оказывает незначительное влияние на погрешность вычисления невязки (13).

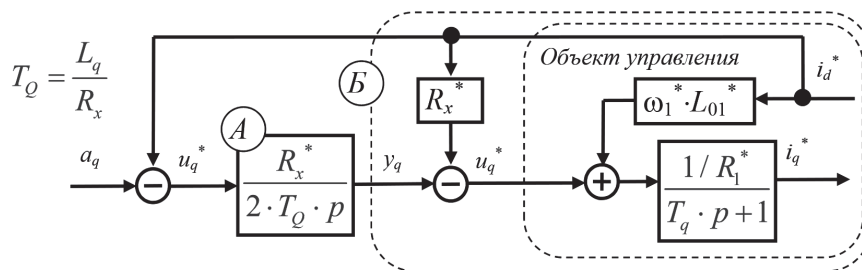


Рис. 2. Структурная схема контура управления поперечным током:

A — интегральный регулятор поперечного тока;

B — контур виртуальной диссипации; a_a — сигнал задания поперечного тока

При векторном управлении с постоянным намагничиванием величина продольного тока выбирается следующим образом:

$$\Psi_d^* = L_d^* \cdot i_a^* = 1. \quad (14)$$

Если при настройке системы управление соотношение (14) выполнено, то формула для вычисления невязки (13) примет следующий вид:

$$\Delta u_a = y_a - (R_x^* + k_R \cdot R_1^*) \cdot i_a^* - \omega_1^*. \quad (15)$$

Так как $R_x^* \gg R_1^*$, а y_1^* , i_q^* и ω_1^* известные величины, погрешность вычисления невязки по формуле (15) будет мала.

Моделирование динамики электромагнитных процессов. Структурная схема адаптивного управления скоростью вращения ротора с температурной компенсацией электрического сопротивления

Таблица 1

Таблица 2

Режим	Y_d^*	R_x	T_R^*	T_Q^*	$k_R(0)$	R_2	$R_2(0)$
1	1	0,6	0,320	0,0011	1	0,03	0,02
2	1	0,6	0,320	0,0011	1	0,02	0,03
3	1	0,6	0,320	0,0011	1	0,03	0,03

I — преобразователь частоты; 2 и 3 — соответственно блоки преобразования координат напряжения и тока;
 BR — датчик скорости; A — узел вычисления коэффициента температурной компенсации
 сопротивления ротора; B — узел вычисления относительной частоты токов ротора;
 B — регулятор скорости вращения ротора; Γ — узел ограничения поперечного тока;
 D — блок вычисления продольного потока сцепления

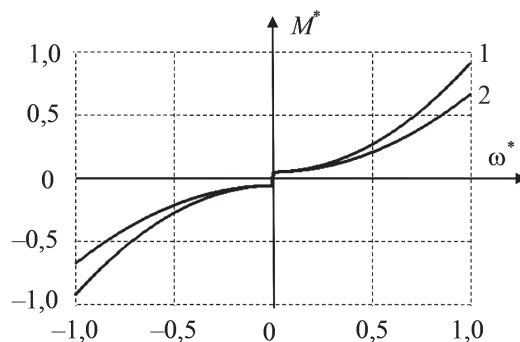


Рис. 4. Механические характеристики гребного винта:
1 — швартовная; 2 — свободная вода

Первый режим — априорная оценка сопротивления ротора занижена в 1,5 раза. Этот режим соответствует пуску нагретого АД при априорной оценке сопротивления ротора как у холодного двигателя. Результаты моделирования представлены на рис. 5, а, откуда видно, что температурный коэффициент сопротивления ротора k_R от единичного значения стремится к значению 1,5.

Второй режим — априорная оценка сопротивления ротора завышена в 1,5 раза. Этот режим соответствует пуску холодного АД при априорной оценке сопротивления ротора как у горячего двигателя. Результаты моделирования представлены на рис. 5, б. Из графиков видно, что значение температурного коэффициента сопротивления ротора k_R от единичного значения стремится к значению 0,66.

Третий режим — априорная оценка сопротивления ротора совпадает с истинным сопротивлением ротора. Этот режим соответствует пуску нагретого АД. Результаты моделирования представлены на рис. 5, в. Из графиков видно, что значения температурного коэффициента сопротивления ротора k_R остаются равными единице.

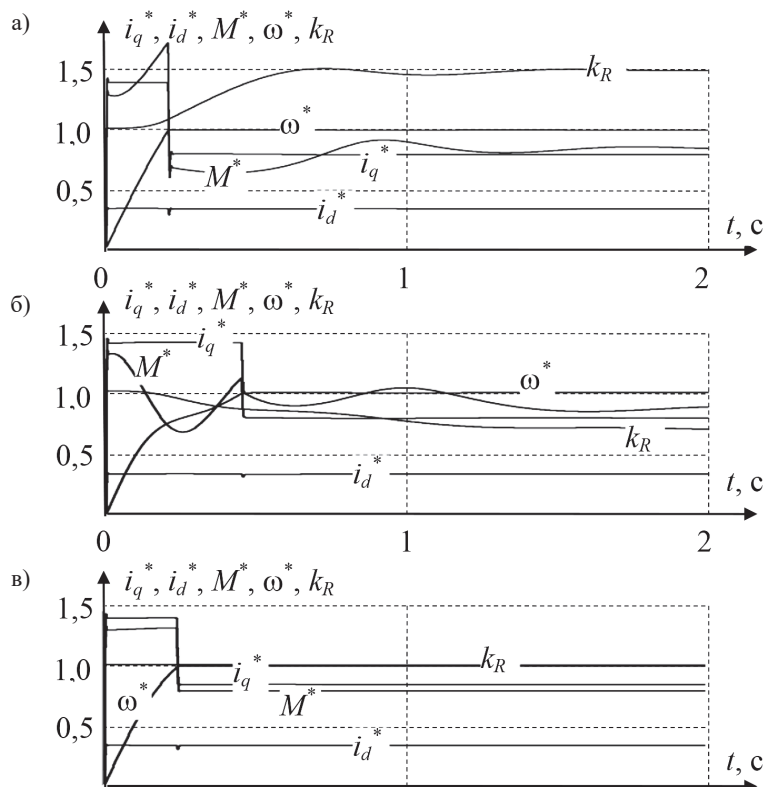


Рис. 5. Динамика при пуске АД в относительных единицах токов статора i_q^* , i_d^* , электромагнитного момента M^* , скорости вращения ротора ω^* и температурного коэффициента сопротивления ротора k_R в режимах: 1 (а); 2 (б); 3 (в)

Выводы (Summary)

Проведенное исследование позволяет сделать следующие выводы:

1. При наличии достоверной информации о сопротивлении ротора векторное управление позволяет формировать динамические процессы высокого качества, однако в процессе функционирования сопротивлению ротора меняется в достаточно широких пределах. Результаты моделирования показывают, что ошибки в априорной оценке сопротивления ротора приводят к существенному снижению точности управления электромагнитным моментом, а также и качества динамики электромагнитных процессов.

2. Предложенный алгоритм динамической оценки сопротивления обмотки ротора позволяет синтезировать адаптивный алгоритм управления электромагнитным моментом. Результаты моделирования подтверждают работоспособность предложенного алгоритма и целесообразность его применения. Данный алгоритм оценки сопротивления ротора достаточно прост в реализации и не требует больших вычислительных ресурсов.

3. Алгоритм динамической оценки сопротивления обмотки ротора при векторном управлении АД показал хорошую устойчивость даже при двукратных ошибках в их априорной оценке. На уточнение априорной оценки сопротивления обмотки ротора затрачивается время, равное 2...3 продолжных постоянных времени $T_R = L_d/R_1$.

4. Представленный алгоритм оценки сопротивления ротора может быть рекомендован для применения в системах в векторных системах управления мощными гребными АД.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Белоусов И. В. Широтно-импульсные преобразователи электрической энергии: моногр. / И. В. Белоусов [и др.]. — СПб.: ФГУП «Крыловский государственный научный центр», 2019. — 231 с.
2. Емельянов А. П. Скалярное управление асинхронным короткозамкнутым двигателем по активной составляющей тока статора / А. П. Емельянов, Б. А. Чуркин // Вестник Южно-Уральского государственного университета. Серия: Энергетика. — 2014. — Т. 14. — № 3. — С. 85–90.
3. Григорьев А. В. Обзор вариантов прямого управления моментом асинхронных электродвигателей (часть 1) / А. В. Григорьев // Вестник Кузбасского государственного технического университета. — 2012. — № 2 (90). — С. 53–58.
4. Фираго Б. И. К вопросу векторного управления асинхронными двигателями / Б. И. Фираго, Д. С. Васильев // Энергетика. Известия высших учебных заведений и энергетических объединений СНГ. — 2015. — № 5. — С. 5–16.
5. Виноградов А. Б. Адаптивная система векторного управления асинхронным электроприводом / А. Б. Виноградов, В. Л. Чистосердов, А. Н. Сибирцев // Электротехника. — 2003. — № 7. — С. 7–17.
6. Самосейко В. Ф. Адаптивный алгоритм векторного управления электроприводами с асинхронными электродвигателями / В. Ф. Самосейко // Вестник Государственного университета морского и речного флота имени адмирала С. О. Макарова. — 2019. — Т. 11. — № 1. — С. 156–168. DOI: 10.21821/2309-5180-2019-11-1-156-168.
7. Matsuo T. A rotor parameter identification scheme for vector-controlled induction motor drives / T. Matsuo, T. A. Lipo // IEEE Transactions on Industry Applications. — 1985. — Vol. IA-21. — Is. 3. — Pp. 624–632. DOI: 10.1109/TIA.1985.349719.
8. Wade S. A new method of rotor resistance estimation for vector-controlled induction machines / S. Wade, W. Dunnigan, B. W. Williams // IEEE Transactions on Industrial Electronics. — 1997. — Vol. 44. — Is. 2. — Pp. 247–257. DOI: 10.1109/41.564164.
9. Luenberger D. G. Introduction to Dynamic Systems: Theory, Models, and Applications / D. G. Luenberger. — 1st Edition. — N. Y.: Wiley, 1979. — 464 p.
10. Laroche E. Methodological insights for online estimation of induction motor parameters / E. Laroche, E. Sedda, C. Durieu // IEEE transactions on control systems technology. — 2008. — Vol. 16. — Is. 5. — Pp. 1021–1028. DOI: 10.1109/TCST.2007.916317.
11. Campbell M. L. Speed sensorless identification of the rotor time constant in induction machines / M. L. Campbell, J. Chiasson, M. Bodson, L. Tolbert // IEEE transactions on automatic control. — 2007. — Vol. 52. — Is. 4. — Pp. 758–763. DOI: 10.1109/TAC.2007.894548.

12. Хлопенко Н. Я. Структурный синтез стабилизирующего робастного регулятора потокосцепления ротора / Н. Я. Хлопенко, И. Н. Хлопенко // *Электротехника и электромеханика*. — 2017. — № 1. — С. 21–25. DOI: 10.20998/2074-272X.2017.1.04.
13. Базылев Д. Н. Метод идентификации сопротивлений статора и ротора асинхронного двигателя / Д. Н. Базылев, А. А. Бобцов, А. А. Пыркин, Р. Ортега // *Известия высших учебных заведений. Приборостроение*. — 2017. — Т. 60. — № 9. — С. 807–811. DOI: 10.17586/0021-3454-2017-60-9-807-811.
14. Терехин А. А. Обзор способов идентификации параметров асинхронного электропривода / А. А. Терехин, Д. А. Даденков // *Вестник Пермского национального исследовательского политехнического университета. Электротехника, информационные технологии, системы управления*. — 2017. — № 22. — С. 55–66.
15. Самосейко В. Ф. Алгоритмы управления электрическими машинами. Том 1. Алгоритмы управления асинхронной электрической машиной: моногр. / В. Ф. Самосейко [и др.]. — СПб.: ФГУП «Крыловский государственный научный центр», 2020. — 116 с.
16. Самосейко В. Ф. Теоретические основы управления электроприводом / В. Ф. Самосейко. — СПб.: Элмор, 2007. — 464 с.

REFERENCES

1. Belousov, I. V., F. A. Gel'ver, V. F. Samoseiko, and V. A. Khomyak. *Shirotno-impul'snye preobrazovateli elektricheskoi energii. Monografiya*. SPb.: Izd. Krylovskii gosudarstvennyi nauchnyi tsentr, 2019.
2. Emelianov, A. P., and B. A. Churkin. "Scalar control of squirrel-cage induction motor with stator active current." *Bulletin of South Ural State University. Series "Power Engineering"* 14.3 (2014): 85–90.
3. Grigor'ev, A. V. "Obzor variantov pryamogo upravleniya momentom asinkhronnykh elektrodvigateli (chast' 1)." *Vestnik Kuzbasskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta* 2(90) (2012): 53–58.
4. Firago, B. I., and D. S. Vasilyev. "On the issue of vector control of the asynchronous motors." *Energetika. Proceedings of CIS higher education institutions and power engineering associations* 5 (2015): 5–16.
5. Vinogradov, A. B., V. L. Chistoserdov, and A. N. Sibirtsev. "Adaptive vector control system for an asynchronous electric drive." *Russian Electrical Engineering* 74.7 (2003): 8–20.
6. Samosejko, Veniamin F. "The adaptive algorithm of the vector control of electrical drives with the induction motors." *Vestnik Gosudarstvennogo universiteta morskogo i rechnogo flota imeni admirala S. O. Makarova* 11.1 (2019): 156–168. DOI: 10.21821/2309-5180-2019-11-1-156-168.
7. Matsuo, Takayoshi, and Thomas A. Lipo. "A rotor parameter identification scheme for vector-controlled induction motor drives." *IEEE Transactions on Industry Applications* IA-21.3 (1985): 624–632. DOI: 10.1109/TIA.1985.349719.
8. Wade, Scott, W. Dunnigan, and Barry W. Williams. "A new method of rotor resistance estimation for vector-controlled induction machines." *IEEE Transactions on Industrial Electronics* 44.2 (1997): 247–257. DOI: 10.1109/41.564164.
9. Luenberger, David G. *Introduction to Dynamic Systems: Theory, Models, and Applications*. 1st Edition. N.Y.: Wiley, 1979.
10. Laroche, Edouard, Emmanuel Sedda, and Cécile Durieu. "Methodological insights for online estimation of induction motor parameters." *IEEE transactions on control systems technology* 16.5 (2008): 1021–1028. DOI: 10.1109/TCST.2007.916317.
11. Campbell, Mengwei Li, John Chiasson, Marc Bodson, and Leon M. Tolbert. "Speed sensorless identification of the rotor time constant in induction machines." *IEEE transactions on automatic control* 52.4 (2007): 758–763. DOI: 10.1109/TAC.2007.894548.
12. Khlopenko, N. J., and I. N. Khlopenko. "Structural synthesis of a stabilizing robust controller of the rotor flux linkage." *Electrical Engineering & Electromechanics* 1 (2017): 21–25. DOI: 10.20998/2074-272X.2017.1.04.
13. Bazylev, D. N., A. A. Bobtsov, A. A. Pyrkin, and R. Ortega. "Method for identification of asynchronous motor stator and rotor resistance." *Journal of Instrument Engineering* 60.9 (2017): 807–811.
14. Terekhin, A. A., and D. A. Dadenkov. "Review of identification methods of induction motor parameters." *PNRPU Bulletin. Electrotechnics, Informational Technologies, Control Systems* 22 (2017): 55–66.
15. Samoseiko, V. F., I. V. Belousov, F. A. Gel'ver, and V. A. Khomyak. *Algoritmy upravleniya elektricheskimi mashinami. Tom 1. Algoritmy upravleniya asinkhronnoi elektricheskoi mashinoi: Monografiya*. SPb.: FGUP «Krylovskii gosudarstvennyi nauchnyi tsentr», 2020.
16. Samoseyko, V. F. *Teoreticheskiye osnovy upravleniya elektroprivodom*. SPb.: Elmor, 2007.

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

Самосейко Вениамин Францевич —

доктор технических наук, профессор
ФГБОУ ВО «ГУМРФ имени адмирала
С. О. Макарова»
198035, Российская Федерация, Санкт-Петербург,
ул. Двинская, 5/7
e-mail: samoseyko@mail.ru,
kaf_electroprivod@gumrf.ru

Гуськов Владимир Олегович —

ведущий инженер отдела проектирования
электропривода и комплектных устройств
Завод «Электросила» —
филиал АО «Силовые машины»
196105, Российская Федерация, Санкт-Петербург,
Московский пр., 139
e-mail: vladimir_guskov@inbox.ru

INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Samoseiko, Veniamin F. —

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: samoseyko@mail.ru,
kaf_electroprivod@gumrf.ru

Guskov, Vladimir O. —

Leading Engineer of the Design Department
of Electric Drive and Complete Devices
Electrosila Plant —
branch of JSC “Power machines”
139 Moskovskii Av., St. Petersburg, 196105,
Russian Federation
e-mail: vladimir_guskov@inbox.ru

Статья поступила в редакцию 21 марта 2021 г.

Received: March 21 2021.

DOI: 10.21821/2309-5180-2021-13-3-430-441

PREVENTIVE PROTECTION OF SHIP'S ELECTRIC POWER SYSTEMS FROM OVERLOAD IN CASE OF ERRONEOUS ACTIONS OF THE CREW

N. V. ShirokovAdmiral Makarov State University of Maritime and Inland Shipping,
St. Petersburg, Russian Federation

Development of the method of preventive control for the purposes of safe operation of the ship's electric power system in emergency situations associated with errors of crew members when stopping generator sets during operation is considered in the paper. Special attention is paid to the development of the approach of preventive protection of equipment, which ensures the formation of a control action aimed at preventing the occurrence of an emergency situation on the ship at the time when the error has already been committed by the maintenance personnel, but the negative processes in the power system have not yet begun. It is shown that for such tasks, the decision-making time is extremely short and their solution is beyond the power of a human operator, so in this case it is advisable to use technical means that actively respond to the actions of the service personnel. For their development, a list of controlled parameters that have a significant impact on the flow of processes in the ship's power grid in the case of an illegal shutdown of a working generator set is provided in the paper. It is shown that in the case of predicting an abnormal operation mode of a ship's electric power system due to an erroneous shutdown of a functioning power source, two types of control actions are fundamentally possible, namely, blocking the signal for disconnecting the generator unit or disconnecting groups of electricity consumers and reducing the load on working machines. The results of analyzing the energy processes occurring in the ship's electric power system in the case of an operator error are shown in the paper. They are provided as logical expressions for each of the control signals. Based on the obtained equations, warning signals for the technical implementation of preventive protection that excludes the human factor influence are generated. The results of the research are written as the perfect disjunctive normal form of logical functions, and the resulting expressions are minimized. Special attention is paid to the development of a new specialized algorithm for preventive control, which provides preventive protection of the ship's electric power system from erroneous shutdowns of generator sets. A flowchart and a detailed description of this algorithm are provided. It is noted that it is necessary to take into account additional signs of the inoperable state of each of the working machines when forming the control action.

Keywords: ship electric power system, operator error, human factor, warning control, diagnostic feature, disconnecting consumers, overload of generator sets, preventive protection.

For citation:

Shirokov, Nikolaj V. "Preventive protection of ship's electric power systems from overload in case of erroneous actions of the crew." *Vestnik Gosudarstvennogo universiteta morskogo i rechnogo flota imeni admiral S. O. Makarova* 13.3 (2021): 430–441. DOI: 10.21821/2309-5180-2021-13-3-430-441.

УДК 621.316:658.58

ПРЕВЕНТИВНАЯ ЗАЩИТА СУДОВЫХ ЭЛЕКТРОЭНЕРГЕТИЧЕСКИХ СИСТЕМ ОТ ПЕРЕГРУЗКИ ПРИ ОШИБОЧНЫХ ДЕЙСТВИЯХ ЭКИПАЖА

Н. В. ШироковФГБОУ ВО «ГУМРФ имени адмирала С. О. Макарова»,
Санкт-Петербург, Российская Федерация

Статья посвящена развитию метода предупредительного управления в целях безопасной работы судовой электроэнергетической системы в нештатных ситуациях, связанных с ошибками членов экипажа при остановке генераторных агрегатов в процессе эксплуатации. Особое внимание уделено разработке подхода превентивной защиты оборудования, обеспечивающего формирование управляющего воздействия, направленного на предотвращение возникновения аварийной ситуации на судне в момент, когда ошибка обслуживающим персоналом уже совершена, но негативные процессы в энергосистеме еще не начались. Показано, что для подобного рода задач период реагирования на опасную ситуацию чрезвычайно мал и их

решение не под силу человеку-оператору, поэтому в данном случае целесообразно применять технические средства, активно реагирующие на действия обслуживающего персонала. Для разработки таких технических средств в статье рассмотрен перечень контролируемых параметров, оказывающих существенное влияние на протекание процессов в судовой электросети в случае неправомерного отключения работающего генераторного агрегата. Показано, что в случае прогнозирования нештатного режима работы судовой электроэнергетической системы вследствие ошибочного отключения функционирующего источника электроэнергии принципиально возможны два вида управляющих воздействий, а именно: блокировка сигнала отключения генераторного агрегата или отключение групп потребителей электроэнергии и снижение нагрузки на работающие машины. В работе приведены результаты анализа энергетических процессов, протекающих в судовой электроэнергетической системе в случае ошибки оператора, представленные в виде логических выражений для каждого из управляющих сигналов. На основе полученных уравнений сформированы предупредительные сигналы для технической реализации превентивной защиты, исключающей влияние человеческого фактора. Результаты исследований записаны в виде совершенной дизъюнктивной нормальной формы логических функций, а также выполнена минимизация полученных выражений. Особое внимание уделено разработке нового специализированного алгоритма предупредительного управления, обеспечивающего превентивную защиту судовой электроэнергетической системы от ошибочных отключений генераторных агрегатов. Приведена блок-схема и дано подробное описание данного алгоритма. Отмечена необходимость учета при формировании управляющего воздействия дополнительных признаков неработоспособного состояния каждой из работающих машин.

Ключевые слова: судовой электроэнергетической системы, ошибка оператора, человеческий фактор, предупредительное управление, диагностический признак, отключение потребителей, перегрузка генераторных агрегатов, превентивная защита.

Для цитирования:

Широков Н. В. Превентивная защита судовых электроэнергетических систем от перегрузки при ошибочных действиях экипажа / Н. В. Широков // Вестник Государственного университета морского и речного флота имени адмирала С. О. Макарова. — 2021. — Т. 13. — № 3. — С. 430–441. DOI: 10.21821/2309-5180-2021-13-3-430-441.

Введение (Introduction)

Эксплуатация постоянно стареющего оборудования в сочетании с неблагоприятными факторами окружающей среды сопровождается авариями и чрезвычайными происшествиями в судовых электроэнергетических системах (СЭЭС) [1]–[3]. При этом наиболее вероятными оказываются угрозы техногенного характера. Так, для аварий, происходящих на ЭЭС, индекс вероятности возникновения угроз (ИБВУ) составляет 70,05. В то же время доля чрезвычайных ситуаций, возникающих, например, вследствие природных катаклизмов, характеризуется ИБВУ = 41,7 [4]. При этом стоимость ликвидации последствий различных аварий и катастроф весьма велика и может достигать в нашей стране 3 % от ВВП [5]. Данное обстоятельство предопределяет актуальность исследований, направленных на повышение безопасности функционирования СЭЭС и уменьшение вероятности возникновения аварийных ситуаций. При этом угрозы техногенного характера во многом обусловлены ошибками обслуживающего персонала, которые особенно часто происходят в период нештатного режима работы СЭЭС, связанного с выходом из строя оборудования [6]–[8]. В отдельных случаях доля таких ситуаций может достигать 70–90 % от общего числа отказов [9], [10], что вызвано прежде всего монотонным характером работы операторов, недостаточным уровнем подготовки, связанным с отсутствием практических навыков управления СЭЭС в условиях отказа ее элементов, в опасных ситуациях и условиях аварии. В этой связи в последнее время особенно интенсивно развиваются научно-технические методы, обеспечивающие активное обучение обслуживающего персонала на основе специальных программ и тренажеров, имитирующих не только нормальные, но и нештатные режимы функционирования СЭЭС [11]–[13]. Применение данных подходов позволяет существенно повысить компетентность работников, обслуживающих сложные СЭЭС и повысить безопасность их эксплуатации.

Следует отметить, что снижение аварийности, тем или иным образом связанной с человеческим фактором, невозможно без разработки нового оборудования, учитывающего процессы взаимодействия оперативного персонала и технических средств управления СЭЭС. В данной связи

следует отметить работы, рассматривающие человеко-машинный комплекс как единую систему, ведущая роль в которой принадлежит оператору. Это объясняется тем, что мозг человека способен прогнозировать события, анализируя сразу несколько видов неоднозначной информации, и обладает способностью адекватно реагировать на изменяющиеся условия функционирования оборудования. В то же время средства технического управления осуществляют свои функции с более высокой точностью и быстродействием, на их работе не сказываются эмоциональные и физические нагрузки [14], [15]. Практическая реализация синтеза достоинств человека и аппаратуры управления СЭЭС позволяет перейти к созданию технических систем, адаптивных к функциям обслуживающего персонала. Данный подход в целом позволяет существенно уменьшить число аварий техногенного характера, вызванных ошибками оператора, но не может предотвратить их полностью, так как даже хорошо подготовленный психологически, знающий и обладающий профессиональными навыками специалист время от времени допускает серьезные оплошности. По этой причине возникли и нашли применение *методы управления психическим состоянием обслуживающего персонала ЭЭС*, основанные на использовании функциональной музыки, чередовании режимов труда и отдыха, улучшении эстетических и санитарно-гигиенических условий труда [14].

Особенно отчетливо влияние человеческого фактора на аварийность проявляется при эксплуатации СЭЭС [16]–[18]. Это вызвано особыми условиями труда обслуживающего персонала, связанными с оторванностью от дома, ограниченным кругом общения, стесненностью помещений, шумами и вибрацией в рабочей зоне оборудования, высокой температурой и влажностью. При этом сокращение численности экипажей привело к тому, что на большинстве судов в штате остался только один электромеханик, а в некоторых случаях его обязанности возложены на старшего механика и матроса-электрика. В связи с этим выполняющий свои профессиональные обязанности специалист время от времени склонен совершать те или иные ошибки. При этом особенно часто возникает вопрос о некомпетентности сотрудников при работе в нештатной ситуации, отсутствии возможности совместно обсудить проблему, а также обеспечить передачу опыта эксплуатации. Кроме того, серьезное психологическое давление на операторов обусловлено высокой степенью ответственности за обеспечение электроснабжения судна, особенно во время прохождения узкостей, при маневрировании, работе в штормовых условиях, когда цена ошибки кратно возрастает. В этой связи для флота особую актуальность приобретает научно-техническая задача по разработке специальных методов и технических средств, обеспечивающих предотвращение ошибочных действий экипажа.

Методы и материалы (Methods and Materials)

Современные методы, обеспечивающие предотвращение ошибочных действий экипажей судов с помощью технических средств, можно разделить на две группы. К первой группе следует отнести подходы, обеспечивающие выдачу своевременных рекомендаций обслуживаемому персоналу о целесообразности выполнения определенных операций в нештатных ситуациях. Технические средства, реализующие задачи этой группы, являются пассивными с точки зрения реагирования на действия оператора. Они не оказывают влияние на его работу, осуществляя вспомогательные функции по управлению, а также предоставляя информацию о путях решения проблемы и наиболее вероятных результатах управляющего воздействия. В этом случае обслуживающий персонал сам, на основе своего опыта и технической интуиции, с учетом полученных данных принимает решение о воздействии на объект управления, причем не обязательно совпадающее с рекомендациями, выданными аппаратурой. К такому оборудованию относятся системы предотвращения столкновений между морскими судами [19]–[21], предоставляющие судоводителю информацию о наиболее предпочтительных действиях, например, для безопасного расхождения в условиях акватории порта.

Задачи, решаемые техническими средствами, рекомендуящими выполнение тех или иных операций, с одной стороны, обычно предполагают наличие интервала времени, вполне достаточного для их решения, а с другой стороны, имеют много вводных рекомендаций, отображающих параметры противоречивого характера, иногда предполагающие противоположные действия. Это

чрезвычайно сложная проблема для искусственного интеллекта и роль человеческого фактора в подобной ситуации очень велика.

Ко второй группе методов, обеспечивающих предотвращение ошибочных действий экипажей судов с помощью технических средств, можно отнести те из них, которые реализуют превентивную защиту оборудования. При этом аппаратура должна обеспечивать формирование управляющего воздействия в ситуации, когда ошибка обслуживающим персоналом уже совершена, но негативные процессы, например, в СЭЭС, еще не начались. В данном случае время принятия решения ничтожно мало и осуществить эффективное воздействие на объект управления обычно не под силу человеку-оператору. К тому же в большинстве случаев перечень контролируемых параметров, оказывающих существенное влияние на функционирование электроэнергетической системы, определен. При этом для технических средств имеется возможность заранее вполне адекватно оценить последствия возможных ошибочных действий обслуживающего персонала, принять своевременные решения и осуществить необходимые операции для их нейтрализации. Это чрезвычайно важная задача, от решения которой зависит работоспособность ЭЭС и судна в целом, а иногда и сохранение жизни членов экипажа. В то же время технические средства, выполняющие подобные функции, не разработаны и на флоте практически не применяются. Исключение составляют приборы программируемого запуска подруливающих устройств и других потребителей, создающих нагрузку на сеть, соизмеримую с мощностью генераторного агрегата (ГА). В данном случае наиболее опасным является необоснованное снижение мощности или отключение хотя бы одного из работающих источников электроэнергии. Примером может служить ошибка оператора, повлекшая за собой катастрофические последствия на крупнейшей в США аварии на атомной электростанции Три-Майл-Айленд. На водном транспорте неправомерное отключения ГА обычно приводит к перегрузке сети, обесточиванию судна, потере его управляемости и хода, что создает аварийную ситуацию, чреватую непосредственной опасностью для его экипажа, а зачастую и других судов.

Для разработки технических средств, обеспечивающих превентивную защиту СЭЭС от перегрузки, возникающей вследствие ошибочного отключения одного из работающих ГА, полезно воспользоваться *методом предупредительного управления*, описанном в работе [22]. В рамках указанного подхода осуществляется процесс формирования такого воздействия на СЭЭС, в результате которого ее техническое состояние после срабатывания защиты будет соответствовать усеченной области правильного функционирования. В этой связи при поступлении команды на отключение ГА анализируют режим работы СЭЭС, и если отключение агрегата приведет к перегрузке сети, то формируют управляющее воздействие, направленное на предотвращение аварийной ситуации [23]. В случае прогнозирования нештатного режима работы СЭЭС, характеризующегося загрузкой хотя бы одного из работающих агрегатов выше допустимого значения, принципиально возможны два вида управляющих воздействий, а именно:

- прекращение процесса отключения (остановки) ГА — блокировка сигнала отключения;
- изменение режима функционирования СЭЭС — отключение групп потребителей электроэнергии и снижение нагрузки на работающие агрегаты.

Обозначим управляющее воздействие, разрешающее отключение ГА, как Y_1 , Y_2 — блокировка сигнала отключения и Y_3 — отключение выбранных групп потребителей. При этом в случае параллельной работы двух агрегатов (ГА1 и ГА2) можно выделить три сигнала, характеризующие режим работы электроэнергетической системы: X_1 — ГА1 исправен; X_2 — ГА2 исправен, суммарная нагрузка сети P_s меньше допустимого значения — P_{lim} . Тогда, воспользовавшись функционально-логическим методом, запишем логические выражения для каждого из управляющих воздействий. Если в момент нажатия кнопки «Стоп» первого агрегата ГА1 и ГА2 исправны и нагрузка сети меньше допустимого значения ($P_s < P_{lim}$), то осуществляется функция отключения и остановки ГА1. При этом все условия отключения и остановки агрегата находятся в штатном режиме эксплуатации.

Логическую функцию, описывающую данный процесс, можно представить следующим образом:

$$X_1 \wedge (P_s < P_{\text{lim}}) \wedge X_2 = Y_1. \quad (1)$$

Если ГА1 и ГА2 исправны, но нагрузка сети больше допустимого значения, то выполняется блокировка отключения агрегата. В этом случае останов первой машины приведет к перегрузке и отключению защитой второго агрегата и аварийной ситуации, вызванной обесточиванием судна. Блокировка отключения позволит избежать аварии СЭЭС. Процесс управления отключением ГА1 в этом случае опишем следующим логическим уравнением:

$$X_1 \wedge (P_s \geq P_{\text{lim}}) \wedge X_2 = Y_2. \quad (2)$$

Если ГА1 исправен и условие $P_s < P_{\text{lim}}$ выполняется, но ГА2 неработоспособен, то отключение первой машины также блокируется. Это достаточно часто встречающаяся ситуация, когда при отклазе одного ГА по ошибке останавливают другой. В данном случае после отключения исправного агрегата вся нагрузка, пусть и допустимая, переводится на неработоспособный ГА, который через определенный промежуток времени отключается защитой, в результате чего происходит обесточивание судна. Соответствующая логическая функция может быть записана в виде

$$X_1 \wedge (P_s < P_{\text{lim}}) \wedge \overline{X_2} = Y_2. \quad (3)$$

Если ГА1 исправен, а ГА2 неработоспособен и нагрузка сети больше допустимого значения, то осуществляют блокировку сигнала останова первой машины. При этом отключение исправного агрегата приведет к перегрузке неработоспособного ГА, его отключению защитой и обесточиванию судна. Остановка вышедшего из строя второго агрегата в данном случае нерациональна, так как по сигналу о его неисправности запускается резервная машина и, возможно, она примет на себя нагрузку до момента срабатывания защиты. В противном случае сработает штатная система превентивного отключения выбранной группы потребителей, произойдет разгрузка сети и оставшийся работоспособным первый агрегат примет на себя оставшуюся нагрузку, продолжив работу в штатном режиме. Логическое условие блокировки отключения ГА1 можно представить следующим образом:

$$X_1 \wedge (P_s \geq P_{\text{lim}}) \wedge \overline{X_2} = Y_2. \quad (4)$$

В случае, если ГА1 вышел из строя, ГА2 работоспособен, а нагрузка сети меньше допустимой величины, то выполняют команду оператора на отключение первого агрегата. Это правильное решение обслуживающего персонала СЭЭС в условиях нештатной ситуации, вызванной отказом источника электроэнергии. Своевременное отключение отказавшей машины предотвратит дальнейшее развитие дефекта, а ГА2 примет допустимую нагрузку без перегрузки. Логическое выражение, соответствующее данному режиму работы, представим в виде следующего уравнения:

$$\overline{X_1} \wedge (P_s < P_{\text{lim}}) \wedge X_2 = Y_1 \quad (5)$$

Если оба ГА неработоспособны, а нагрузка сети меньше допустимого значения, то наиболее целесообразно отключить ГА1 по команде обслуживающего персонала. В данном случае опасно блокировать отключение отказавшего агрегата (например, при неисправной системе защиты). В то же время вторая машина в течение некоторого времени продолжит снабжать судно электроэнергией и, возможно, успеет запуститься резервный ГА. При этом, как показано в публикации [22], в данной ситуации может быть осуществлен превентивный запуск аварийного дизель-генератора, время включения на нагрузку которого существенно меньше, чем у резервного агрегата. Логическую функцию, описывающую данный процесс, можно представить в следующем виде:

$$\overline{X_1} \wedge (P_s < P_{\text{lim}}) \wedge \overline{X_2} = Y_1. \quad (6)$$

Если ГА1 неработоспособен, а ГА2 исправен, но нагрузка сети превысила допустимую величину, то осуществляют отключение выбранных групп потребителей с последующим отключением первого агрегата. В данном случае непосредственное выполнение команды оператора приведет к перегрузке исправной машины и обесточиванию судна. В этой связи до отключения ГА1 предполагается разгрузка СЭЭС, после которой неработоспособный агрегат может быть безопасно от-

ключен. Задержка в отключении составит менее одной десятой доли секунды и для данного случая является пренебрежимо малой величиной. Логическое уравнение, описывающее управление в данном режиме функционирования электроэнергетической системы, запишем в виде

$$\overline{X_1} \wedge (P_s \geq P_{\lim}) \wedge X_2 = Y_3. \quad (7)$$

В чрезвычайно сложной ситуации, при которой оба ГА вышли из строя и нагрузка сети выше допустимой величины, по команде оператора наиболее целесообразно выполнить разгрузку СЭЭС с последующим отключением первой машины. В данном случае приходится ограничиться соображениями, изложенными при обосновании вида управляющего воздействия в режиме работы СЭЭС, описанном уравнением (6), и надеждой на техническую интуицию членов экипажа, принимающих решение об остановке ГА1. При этом следует отметить, что вероятность наступления такого события чрезвычайно мала и все возможные ресурсы для исключения обесточивания в данном случае будут реализованы. Логическое выражение, соответствующее данному режиму работы, представим следующим образом:

$$\overline{X_1} \wedge (P_s \geq P_{\lim}) \wedge \overline{X_2} = Y_3. \quad (8)$$

На основании логических выражений, описывающих взаимосвязь режимов работы СЭЭС и управляющих воздействий, направленных на предотвращение аварийной ситуации (1)–(8), составим систему уравнений, характеризующих указанную зависимость в виде совершенной дизъюнктивной нормальной формы:

$$\begin{cases} (X_1 \wedge (P_s < P_{\lim}) \wedge X_2) \vee (\overline{X_1} \wedge (P_s < P_{\lim}) \wedge X_2) \vee (\overline{X_1} \wedge (P_s < P_{\lim}) \wedge \overline{X_2}) = Y_1; \\ (X_1 \wedge (P_s < P_{\lim}) \wedge \overline{X_2}) \vee (X_1 \wedge (P_s \geq P_{\lim}) \wedge \overline{X_2}) \vee (X_1 \wedge (P_s \geq P_{\lim}) \wedge X_2) = Y_2; \\ (\overline{X_1} \wedge (P_s \geq P_{\lim}) \wedge X_2) \vee (\overline{X_1} \wedge (P_s \geq P_{\lim}) \wedge \overline{X_2}) = Y_3. \end{cases} \quad (9)$$

После минимизации полученных выражений, запишем:

$$\begin{cases} (X_1 \wedge (P_s < P_{\lim}) \wedge X_2) \vee (\overline{X_1} \wedge (P_s < P_{\lim})) = Y_1; \\ (X_1 \wedge (P_s < P_{\lim}) \wedge \overline{X_2}) \vee (X_1 \wedge (P_s \geq P_{\lim})) = Y_2; \\ \overline{X_1} \wedge (P_s \geq P_{\lim}) = Y_3. \end{cases} \quad (10)$$

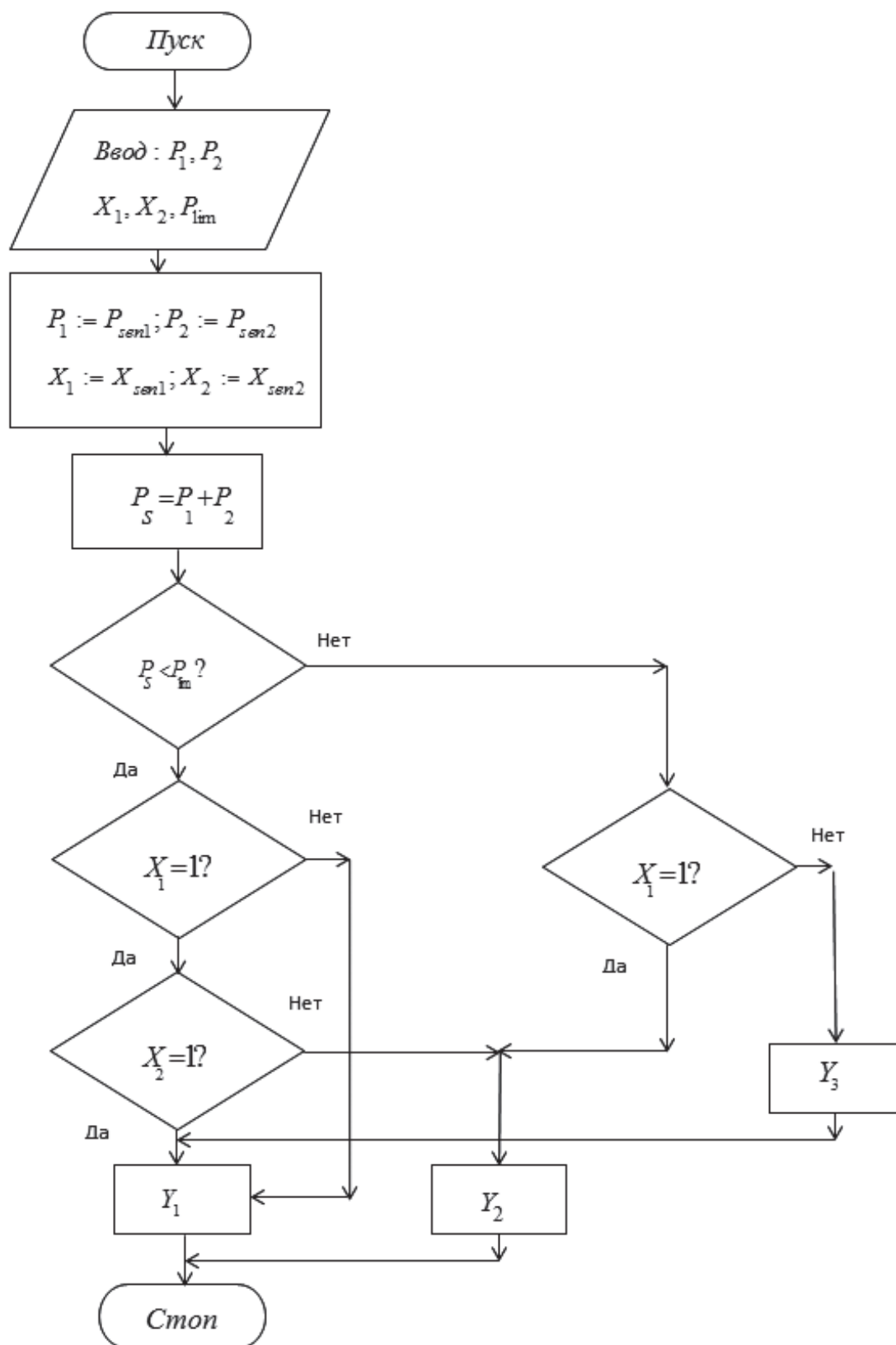
Данные логические выражения позволяют разработать специализированные технические средства, обеспечивающие превентивную защиту СЭЭС от ошибочных действий членов экипажа при отключении ГА.

Результаты (Results)

На основании полученных результатов, записанных в виде выражений (10), для случая параллельной работы двух агрегатов в составе СЭЭС разработан алгоритм предупредительного отключения ГА, блок-схема которого представлена на рисунке (с. 436).

При нажатии кнопки «Стоп» системы дистанционного автоматического управления первого агрегата формируется команда «Пуск» программы, по которой вводятся контролируемые параметры, получаемые от датчиков активной нагрузки P_{sen1}, P_{sen2} , а также системы определения технического состояния генераторных агрегатов X_1, X_2 и вычисляется величина суммарной нагрузки сети в данный момент времени P_s . Затем выполняется сравнение P_s с максимально допустимой величиной нагрузки, которую сможет принять ГА2 после отключения первой машины $P_{\lim}$. Если условие $P_s < P_{\lim}$ выполняется, то проверяют сигналы, характеризующие техническое состояние ГА1 и ГА2 и если они работоспособны или вышел из строя только ГА1, то отключают первую машину. Если оказался неработоспособным второй агрегат, то блокируют отключение ГА1. В ситуации, при которой нагрузка сети превышает допустимое значение и условие $P_s < P_{\lim}$ не выполняется,

проверяют ТС первого агрегата и если он вышел из строя, то отключают выбранную группу потребителей, а затем отключают ГА1. В момент времени, когда оператор подает команду на останов первой машины при условии, что неравенство $P_s < P_{lim}$ не выполняется и отключаемый агрегат работоспособен, действия обслуживающего персонала блокируются.



Блок-схема алгоритма предупредительного отключения ГА

В данном случае для оценки ТС агрегатов можно воспользоваться информацией, получаемой от датчиков минимального давления смазочного масла или температуры охлаждающей воды дизеля. На сигналы с подобных датчиков настроены аварийно-предупредительная сигнализация и система защиты СЭЭС, однако этого недостаточно. В случае отказа, например, топливной системы первичного двигателя ГА он перейдет в двигательный режим и будет отключен защитой от обратной мощности. При этом интервал времени от момента возникновения дефекта до перехода неработоспособного агрегата в двигательный режим может составить до 20 с. В течение этого времени члены экипажа и система защиты будут определять вышедший из строя агрегат как работоспособный. Данное обстоятельство может привести к ошибочному отключению оператором агрегата, работающего параллельно с вышедшей из строя машиной, и к обесточиванию сети.

В связи с ранее изложенным, в целях своевременной идентификации ТС работающих ГА целесообразно воспользоваться методом, основанном на анализе перераспределения нагрузок в СЭЭС, описанном в работе [24]. В рамках данного подхода измеряют величину неравномерности загрузки ГА и определяют момент отклонения последней за пределы уставки, соответствующей $\Delta P_{\text{пл}}$, затем определяют момент, когда загрузка одного ГА уменьшается, а загрузка другого ГА увеличивается и при совпадении этих моментов ГА признают неработоспособным тот, загрузка которого уменьшается. При этом идентификация неработоспособного состояния машины осуществляется в течение нескольких секунд после возникновения отказа, что существенно повышает безопасность выполнения команды на отключение агрегата.

К недостаткам данного базового способа определения неработоспособного агрегата можно отнести возможность появления ошибки второго рода при синхронизации генераторов и в случае перехода с ручного на автоматический режим управления. Для повышения достоверности диагностирования в публикации [25] был применен способ исключения омонимичных областей, заключающийся в том, что при использовании диагностического параметра, определяющего неработоспособное состояние ГА, из процесса диагностирования исключают режимы функционирования СЭЭС, соответствующие данным областям. В этих режимах средства диагностирования будут определять техническое состояние исправного ГА как неработоспособное [26]. При этом в статье [25] сформулирован диагностический признак (I_i , $i = 1, 2, \dots, n$, где n — количество работающих в данный момент ГА), позволяющий идентифицировать ГА со снижающейся нагрузкой как неработоспособный, а именно:

$$I_i = L_1 \wedge (L_2 > L_{\text{lim}}) \wedge (\overline{w_1^g} \wedge \overline{w_5^g}), \quad (11)$$

где L_1 — событие, заключающееся в том, что нагрузка одного агрегата увеличивается, а другого уменьшается; L_2 — величина разности нагрузок параллельно работающих генераторов; L_{lim} — допустимая (заданная) разность нагрузок параллельно работающих генераторов; w_1^g — усеченная область правильного функционирования СЭЭС, соответствующая режиму включения ГА на параллельную работу; w_5^g — усеченная область правильного функционирования СЭЭС, соответствующая переключению с ручного на автоматический режима работы ГА.

Обсуждение (Discussion)

Предложенный подход превентивной защиты СЭЭС от перегрузки в случае ошибочных действий экипажа позволяет существенным образом сократить влияние человеческого фактора при выполнении операций остановки генераторных агрегатов. При этом применение подобных технических средств на судах никак не регламентировано «Правилами классификации и постройки морских судов РМРС», что не совсем верно, так как их использование способно повысить безопасность работы СЭЭС. В рамках данной статьи не исследовалась возможность реализации предложенного подхода для остановки ГА посредством кнопки «Аварийный стоп», при использовании которой разработанные логические выражения для определения управляющих воздействий могут быть несколько скорректированы.

Выводы (Summary)

На основании проведенного исследования можно сделать следующие выводы:

1. Современные средства управления не обеспечивают защиту электроэнергетических систем, в том числе и судовых, от ошибочных действий обслуживающего персонала при остановках генераторных агрегатов, что может привести к тяжелым авариям.
2. Для решения задачи безаварийной эксплуатации СЭЭС при остановке ГА обосновано использование метода предупредительного управления, осуществляемого в нештатных режимах работы электроэнергетической системы посредством блокировки команды на останов источника электроэнергии или отключения выбранной группы потребителей с последующим выполнением команды на останов агрегата. При этом СЭЭС переходит в режим правильного функционирования после отключения ГА, минуя перегрузку.
3. Разработанный алгоритм предупредительного управления позволяют сравнительно просто избежать аварии в СЭЭС, вызванной ошибкой членов экипажа в процессе остановки ГА, и может использоваться в других автономных электроэнергетических системах.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Гвоздев Е. В. Методология анализа показателей влияния человеческого фактора на комплексную безопасность электроэнергетических предприятий / Е. В. Гвоздев, Е. Б. Грибанова, Ю. Г. Матвиенко // Безопасность труда в промышленности. — 2020. — № 12. — С. 38–43. DOI: 10.24000/0409-2961-2020-12-38-43.
2. Кузнецов П. А. Комплексная система защиты потребителей электроэнергии от аварийных режимов работы / П. А. Кузнецов, О. А. Степанов // Вестник Московского авиационного института. — 2016. — Т. 23. — № 4. — С. 145–154.
3. Булатов Ю. Н. Противоаварийное управление установками распределенной генерации / Ю. Н. Булатов, А. В. Крюков // Электричество. — 2019. — № 2. — С. 18–25. DOI: 10.24160/0013-5380-2019-2-18-25.
4. Зубок Ю. А. Угрозы в трансформирующейся среде обитания как фактор социальных рисков: прогнозирование и регулирование / Ю. А. Зубок, В. И. Чупров // Социологические исследования. — 2017. — № 5 (397). — С. 57–67.
5. Магид С. И. Человеческий фактор и энергобезопасность на современном этапе развития электроэнергетики / С. И. Магид // Энергосбережение и водоподготовка. — 2006. — № 3 (41). — С. 55–62.
6. Ivanova M. Analysis of Power Outages and Human errors in the Operation of Equipment in Power Grids / M. Ivanova, R. Dimitrova, A. Filipov // 2020 12th Electrical Engineering Faculty Conference (BulEF). — IEEE, 2020. — Pp. 1–5. DOI: 10.1109/BulEF51036.2020.9326058.
7. Bao Y. Impact analysis of human factors on power system operation reliability / Y. Bao, C. Guo, J. Zhang, J. Wu, S. Pang, Z. Zhang // Journal of Modern Power Systems and Clean Energy. — 2018. — Vol. 6. — Is. 1. — Pp. 27–39. DOI: 10.1007/s40565-016-0231-6.
8. Kondratyeva O. E. Analysis of the Applicability of Key Risk Assessment Methods for Solving Problems of Reducing Accidents at Energy Facilities / O. E. Kondratyeva, M. K. Romashov, O. A. Loktionov // 2021 3rd International Youth Conference on Radio Electronics, Electrical and Power Engineering (REEPE). — IEEE, 2021. — Pp. 1–5. DOI: 10.1109/REEPE51337.2021.9388031.
9. Магид С. И. Надежность электроэнергетики и нормирование тренажерной подготовки персонала / С. И. Магид, Е. Н. Архипова // Надежность и безопасность энергетики. — 2011. — № 1 (12). — С. 24–33.
10. Коновалов Ю. В. Повышение безопасности эксплуатации электротехнических комплексов систем электроснабжения при их интеллектуализации / Ю. В. Коновалов, Н. В. Кузнецова // Вестник Иркутского государственного технического университета. — 2017. — Т. 21. — № 1 (120). — С. 103–112. DOI: 10.21285/1814-3520-2017-1-103-112.
11. Magid S. I. Topical issues of simulation construction development in modern electric power engineering / S. I. Magid, E. N. Arkhipova, I. S. Zagretdinov // Thermal Engineering. — 2015. — Vol. 62. — Is. 14. — Pp. 1017–1027. DOI: 10.1134/S0040601515140086.
12. Никоноров А. Н. Разработка учебно-исследовательской АСУТП энергоблока с парогазовой установкой / А. Н. Никоноров [и др.] // Автоматизация в промышленности. — 2021. — № 2. — С. 38–43. DOI: 10.25728/avtprom.2021.02.07.

13. Бойко Е. А. Формирование профессиональных цифровых компетенций при реализации многоуровневой модели проектно-ориентированной подготовки теплоэнергетиков / Е. А. Бойко // Энергобезопасность и энергосбережение. — 2021. — № 1. — С. 61–71. DOI: 10.18635/2071-2219-2021-1-61-71.

14. Окорочков Р. В. Роль человеческого фактора в управлении энергетическими объектами в условиях цифровой трансформации / Р. В. Окорочков, А. А. Тимофеева // Фундаментальные и прикладные исследования в области управления, экономики и торговли: сб. трудов всероссийской научной и учебно-практической конференции. В 3 ч. — СПб.: ИПЦ СПбПУ «ПОЛИТЕХ-ПРЕСС», 2020. — С. 96–101.

15. Tyrva V. O. Anthropomorphic Control over Electromechanical System Motion: Simulation and Implementation / V. O. Tyrva, A. V. Saushev, O. V. Shergina // 2020 International Russian Automation Conference (RusAutoCon). — IEEE, 2020. — Pp. 374–379. DOI: 10.1109/RusAutoCon49822.2020.9208070.

16. Белов О. В. Методология анализа и контроля безопасности судна как сложной организационно-технической системы / О. В. Белов // Вестник Камчатского государственного технического университета. — 2015. — № 34. — С. 12–18. DOI: 10.17217/2079-0333-2015-34-12-18.

17. Coraddu A. Determining the most influential human factors in maritime accidents: A data-driven approach / A. Coraddu, L. Oneto, B. N. de Maya, R. Kurt // Ocean Engineering. — 2020. — Vol. 211. — Pp. 107588. DOI: 10.1016/j.oceaneng.2020.107588.

18. Navas de Maya B. Application of card-sorting approach to classify human factors of past maritime accidents / B. Navas de Maya, H. Khalid, R. E. Kurt // Maritime Policy & Management. — 2021. — Vol. 48. — Is. 1. — Pp. 75–90. DOI: 10.1080/03088839.2020.1754481.

19. Wang T. Autonomous decision-making scheme for multi-ship collision avoidance with iterative observation and inference / T. Wang, Q. Wu, J. Zhang, B. Wu, Y. Wang // Ocean Engineering. — 2020. — Vol. 197. — Pp. 106873. DOI: 10.1016/j.oceaneng.2019.106873.

20. Tu E. Exploiting AIS Data for Intelligent Maritime Navigation: A Comprehensive Survey From Data to Methodology / E. Tu, G. Zhang, L. Rachmawati, E. Rajabally, G. B. Huang // IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems. — 2017. — Vol. 19. — Is. 5. — Pp. 1559–1582. DOI: 10.1109/TITS.2017.2724551.

21. Alizadeh D. Vessel trajectory prediction using historical automatic identification system data / D. Alizadeh, A. A. Alesheikh, M. Sharif // The Journal of Navigation. — 2021. — Vol. 74. — Is. 1. — Pp. 156–174. DOI: 10.1017/S0373463320000442.

22. Широков Н. В. Предупредительное управление судовой электроэнергетической системой при отказе источников электроэнергии / Н. В. Широков // Вестник Государственного университета морского и речного флота имени адмирала С. О. Макарова. — 2019. — Т. 11. — № 2. — С. 396–405. DOI: 10.21821/2309-5180-2019-11-2-396-405.

23. Пат. 2731756 Российская Федерация, МПК H02H 3/08. Способ предупредительного управления отключением генераторного агрегата / Н. В. Широков; заяв. и патентообл. Н. В. Широков. — № 2020105350; заявл. 04.02.2020; опубл. 08.09.2020, Бюл. № 25. — 13 с.

24. Пат. 2715555 Российская Федерация, МПК H02H 3/08. Способ определения неработоспособного генераторного агрегата / Н. В. Широков; заяв. и патентообл. ООО «Форпик стандарт сервис». — № 2019137276; заявл. 19.11.2019; опубл. 02.03.2020, Бюл. № 7. — 9 с.

25. Saushev A. Preventive Protection of Ship's Electric Power System from Reverse Power / A. Saushev, N. Shirokov, S. Kuznetsov // International Scientific Conference Energy Management of Municipal Facilities and Sustainable Energy Technologies EMMFT 2019. EMMFT 2019. Advances in Intelligent Systems and Computing. — Springer, Cham, 2021. — Vol. 1258. DOI: 10.1007/978-3-030-57450-5_33.

26. Широков Н. В. Метод исключения омонимичных областей в предупредительном управлении электротехнической системой / Н. В. Широков // Вестник Государственного университета морского и речного флота имени адмирала С. О. Макарова. — 2020. — Т. 12. — № 2. — С. 390–401. DOI: 10.21821/2309-5180-2020-12-2-390-401.

REFERENCES

1. Gvozdev, E. V., E. B. Gribanova, and Yu. G. Matvienko. “Methodology for analysis of the indicators of the human factor effect on the integrated safety and security of electric power enterprises.” *Occupational safety in industry* 12 (2020): 38–43. DOI: 10.24000/0409-2961-2020-12-38-43.

2. Kuznetsov, Pavel, and Oleg Stepanov. “Combined system for electric power consumers protection against emergency states.” *Aerospace MAI Journal* 23.4 (2016): 145–154.

3. Bulatov, Yury N., and Andrey V. Kryukov. "Emergency control of distributed generation plants." *Electrical Technology Russia* 2 (2019): 18–25. DOI: 10.24160/0013-5380-2019-2-18-25.
4. Zubok, Yulia A., and Vladimir I. Chuprov. "Threats in a transforming living environment as a factor of social risks: forecasting and regulation." *Sociological Research* 5(397) (2017): 57–67.
5. Magid, S. I. "Chelovecheskii faktor i energobezопасnost' na sovremennom etape razvitiya elektroenergetiki." *Energobezопасnost i vodopodgotovka* 3(41) (2006): 55–62.
6. Ivanova, Milena, Rositsa Dimitrova, and Anton Filipov. "Analysis of Power Outages and Human errors in the Operation of Equipment in Power Grids." *2020 12th Electrical Engineering Faculty Conference (BulEF)*. IEEE, 2020. DOI: 10.1109/BulEF51036.2020.9326058.
7. Bao, Yingkai, Chuangxin Guo, Jinjiang Zhang, Jiaxin Wu, Suhong Pang, and Zhiping Zhang. "Impact analysis of human factors on power system operation reliability." *Journal of Modern Power Systems and Clean Energy* 6.1 (2018): 27–39. DOI: 10.1007/s40565-016-0231-6.
8. Kondrateva, Olga E., Mikhail K. Romashov, and Oleg A. Loktionov. "Analysis of the Applicability of Key Risk Assessment Methods for Solving Problems of Reducing Accidents at Energy Facilities." *2021 3rd International Youth Conference on Radio Electronics, Electrical and Power Engineering (REEPE)*. IEEE, 2021. DOI: 10.1109/REEPE51337.2021.9388031.
9. Magid, S. I., and E. N. Arkhipova. "Nadegnost elektroenergetiki i normirovaniye trenagernoy podgonovki personala." *Nadegnost i bezопасnost energetiki* 1(12) (2011): 24–33.
10. Konovalov, Yuriy V., and Natalia V. Kuznetsova. "Improving operation safety of electrical complexes of power supply systems under their intellectualization." *Proceedings of Irkutsk State Technical University* 21.1(120) (2017): 103–112. DOI: 10.21285/1814-3520-2017-1-103-112.
11. Magid, S. I., E. N. Arkhipova, and I. Sh Zagretidinov. "Topical issues of simulation construction development in Modern Electric Power Engineering." *Thermal Engineering* 62.14 (2015): 1017–1027. DOI: 10.1134/S0040601515140086.
12. Nikonorov, A. N., I. K. Muravyov, E. D. Marshalov, and T. E. Muravyova. "Razrabotka uchebno-issledovatel'skoj ASUTP energobloka s parogazovoj ustanovkoj." *Avtomatizatsiya v promyshlennosti* 2 (2021): 38–43. DOI: 10.25728/avtprom.2021.02.07.
13. Boiko, Evgeny. "Digital skill development in project-based learning of heat power engineering students." *Energy Safety and Energy Economy* 1 (2021): 61–71. DOI: 10.18635/2071-2219-2021-1-61-71.
14. Okorokov, R. V., and A. A. Timofeeva. "The role of the human factor in the energy objects management in the context of digital transformation." *Fundamentalnye i prikladnye issledovaniya v oblasti upravleniya, ekonomiki i torgovli: sb. Nauch. Tr.* SPb: POLITEH-PRESS, 2020. 96–101.
15. Tyrva, Vladimir O., Aleksandr V. Saushev, and Olga V. Shergina. "Anthropomorphic Control over Electromechanical System Motion: Simulation and Implementation." *2020 International Russian Automation Conference (RusAutoCon)*. IEEE, 2020. 374–379. DOI: 10.1109/RusAutoCon49822.2020.9208070.
16. Belov, O. A. "The methodology of analysis and monitoring of ship safety as difficult technical-organizational system." *Vestnik Kamchatskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta* 34 (2015): 12–18. DOI: 10.17217/2079-0333-2015-34-12-18.
17. Coraddu, Andrea, Luca Oneto, Beatriz Navas de Maya, and Rafet Kurt. "Determining the most influential human factors in maritime accidents: A data-driven approach." *Ocean Engineering* 211 (2020): 107588. DOI:10.1016/j.oceaneng.2020.107588.
18. Navas de Maya, Beatriz, Hassan Khalid, and Rafet Emek Kurt. "Application of card-sorting approach to classify human factors of past maritime accidents." *Maritime Policy & Management* 48.1 (2021): 75–90. DOI: 10.1080/03088839.2020.1754481.
19. Wang, Tengfei, Qing Wu, Jinfen Zhang, Bing Wu, and Yang Wang. "Autonomous decision-making scheme for multi-ship collision avoidance with iterative observation and inference." *Ocean Engineering* 197 (2020): 106873. DOI: 10.1016/j.oceaneng.2019.106873.
20. Tu, Enmei, Guanghao Zhang, Lily Rachmawati, Eshan Rajabally, and Guang-Bin Huang. "Exploiting AIS data for intelligent maritime navigation: A comprehensive survey from data to methodology." *IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems* 19.5 (2017): 1559–1582. DOI:10.1109/TITS.2017.2724551.
21. Alizadeh, Danial, Ali Asghar Alesheikh, and Mohammad Sharif. "Vessel trajectory prediction using historical automatic identification system data." *The Journal of Navigation* 74.1 (2021): 156–174. DOI: 10.1017/S0373463320000442.

22. Shirokov, Nikolaj V. “Warning control of ship’s electric power system in case of the power sources failure.” *Vestnik Gosudarstvennogo universiteta morskogo i rechnogo flota imeni admirala S. O. Makarova* 11.2 (2019): 396–405. DOI: 10.21821/2309-5180-2019-11-2-396-405.

23. Shirokov, N. V. RU 2 731 756 C1, IPC H02H 3/08. Method for preventive control of generator unit switching off. Russian Federation, assignee. Publ. 8 Sept. 2020.

24. Shirokov, N. V. RU 2 715 555 C1, IPC H02H 3/08. Sposob opredeleniya nerabotosposobnogo generatornogo agregata. Russian Federation, assignee. Publ. 2 June 2020.

25. Saushev, Alecsandr, Nikolai Shirokov, and Sergey Kuznetsov. “Preventive Protection of Ship’s Electric Power System from Reverse Power.” *International Scientific Conference Energy Management of Municipal Facilities and Sustainable Energy Technologies EMMFT 2019. EMMFT 2019. Advances in Intelligent Systems and Computing*. Vol. 1258. Springer, Cham, 2021. DOI: 10.1007/978-3-030-57450-5_33.

26. Shirokov, Nikolaj V. “Method for eliminating homonymous areas in warning control of the electrical system.” *Vestnik Gosudarstvennogo universiteta morskogo i rechnogo flota imeni admirala S. O. Makarova* 12.2 (2020): 390–401. DOI: 10.21821/2309-5180-2020-12-2-390-401.

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРЕ

Широков Николай Викторович —
кандидат технических наук, доцент
ФГБОУ ВО «ГУМРФ имени адмирала
С. О. Макарова»
198035, Российская Федерация, Санкт-Петербург,
ул. Двинская, 5/7
e-mail: Shirokovn@inbox.ru,
kaf_electroprivod@gumrf.ru

INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Shirokov, Nikolaj V. —
PhD, associate professor
Admiral Makarov State University of Maritime
and Inland Shipping
5/7 Dvinskaya Str., St. Petersburg, 198035,
Russian Federation
e-mail: Shirokovn@inbox.ru,
kaf_electroprivod@gumrf.ru

Статья поступила в редакцию 5 мая 2021 г.
Received: May 5, 2021.

Научное периодическое издание

**Вестник Государственного университета морского
и речного флота имени адмирала С. О. Макарова**

Том 13. № 3

2021 год

Выпускающий редактор *Н. А. Карамзина*
Дизайн и верстка *М. Н. Евсюткина*

Подписано в печать с оригинал-макета 30.06.21. Формат 60×90/8
Гарнитура Times New Roman. Усл. печ. л. 17,75. Тираж 500 экз. Заказ № 214/21

Государственный университет морского и речного флота имени адмирала С. О. Макарова
198035, Санкт-Петербург, ул. Двинская, 5/7