

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 16. № 3

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

**САНКТ-ПЕТЕРБУРГ
2024**

Вестник Государственного университета морского и речного флота имени адмирала С. О. Макарова. — СПб. : ГУМРФ имени адмирала С. О. Макарова, 2024. — Т. 16. — № 3. — 150 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 диссертационных работ на соискание ученой степени доктора и кандидата наук по основным группам специальностей в соответствии с Номенклатурой специальностей научных работников.

2.5.19 «Технология судостроения, судоремонта и организация судостроительного производства (технические науки)»;

2.5.20 «Судовые энергетические установки и их элементы (главные и вспомогательные) (технические науки)»;

2.3.3 «Автоматизация и управление технологическими процессами и производствами (технические науки)»;

2.9.7 «Эксплуатация водного транспорта, водные пути сообщения и гидрография (технические науки).

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 агентства Урал-Пресс: 37276.



ISSN 2309-5180



© Государственный университет морского и речного флота имени адмирала С. О. Макарова, 2024

Гл. редактор

С. О. Барышников
д-р техн. наук, проф.

Зам. гл. редактора

А. П. Нырков
д-р техн. наук, проф.

Члены
редакционной
коллегии:

А. Е. Сазонов
д-р техн. наук, проф.,
чл.-кор. РАН

Р. М. Юсупов
д-р техн. наук, проф.,
чл.-кор. РАН

О. К. Безюков,
д-р техн. наук, проф.

А. Т. Беккер,
д-р техн. наук, проф.

Н. И. Ватин,
д-р техн. наук, проф.

П. А. Гарибин,
д-р техн. наук, проф.

Д. П. Голоскоков,
д-р техн. наук, проф.

**ЭКСПЛУАТАЦИЯ ВОДНОГО ТРАНСПОРТА, ВОДНЫЕ ПУТИ
СООБЩЕНИЯ И ГИДРОГРАФИЯ 336**

Логиновский В. А. Оценка точности определения координат места судна по измерениям в реальном масштабе времени 336

Ильинский Д. А., Ганжа О. Ю., Корнеев А. А. Донные сейсмические наблюдения на море: проблемы и методы их решения 347

Марьясов Г. В., Шарлай Г. Н. Математическая модель движения судна при предусмотренной посадке на мель 363

Агеев С. А., Каретников В. В., Рудых С. В. Обеспечение безопасности судоходства на внутренних водных путях регионального значения Санкт-Петербурга 370

Маликова Т. Е., Петрова Е. Е. Имитационная модель престакинга на контейнерном терминале морского порта 379

Кузнецов А. Л., Грызлов В. Ю., Уами Абделжалил. Алгоритм построения произвольного маршрута на дискретной плоскости и его поординатное описание 391

Галин А. В., Хватов Г. М. Оптимизация погрузки нефтеналивных грузов на танкерном флоте 403

Изотов О. А. Многокритериальная оценка возможности контейнерных перевозок сборных партий грузов 413

Ююкин И. В. Реализация плавности конфигурации сплайн-траектории для своевременного уклонения от запретных районов плавания 421

**СУДОВЫЕ ЭНЕРГЕТИЧЕСКИЕ УСТАНОВКИ
И ИХ ЭЛЕМЕНТЫ (ГЛАВНЫЕ И ВСПОМОГАТЕЛЬНЫЕ) 444**

Ивановская А. В., Жуков В. А., Шустряков Н. А. Тенденции развития и современные методы проектирования грузоподъемных устройств рыбопромыслового судна 444

В. Л. Ерофеев,
д-р техн. наук, проф.

В. А. Жуков,
д-р техн. наук, доц.

Ю. М. Искандеров,
д-р техн. наук, проф.

В. В. Каретников,
д-р техн. наук, доц.

А. В. Кириченко,
д-р техн. наук, проф.

М. Н. Кирсанов,
д-р физ.-мат. наук, проф.

М. А. Колосов,
д-р техн. наук, проф.

Е. А. Королева,
д-р экон. наук, проф.

И. И. Костылев,
д-р техн. наук, проф.

А. Л. Кузнецов,
д-р техн. наук, проф.

В. А. Логиновский,
д-р техн. наук, проф.

А. В. Макишанов,
д-р техн. наук, проф.

В. Е. Марлей,
д-р техн. наук, проф.

Т. А. Пантина,
д-р экон. наук, проф.

В. И. Решняк,
д-р техн. наук, проф.

А. В. Саушев,
д-р техн. наук, доц.

С. В. Смоленцев,
д-р техн. наук, проф.

С. С. Соколов,
д-р техн. наук, доц.

М. В. Сухотерин,
д-р техн. наук, доц.

А. Л. Тезиков,
д-р техн. наук, проф.

А. А. Чертков,
д-р техн. наук, доц.

В. Б. Чистов,
д-р техн. наук, проф.

**АВТОМАТИЗАЦИЯ И УПРАВЛЕНИЕ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИМИ
ПРОЦЕССАМИ И ПРОИЗВОДСТВАМИ..... 456**

Нырко А. П., Юмашева Е. С., Кириков А. В. Оптимизация процесса
тестирования на проникновение в АСУ технологическими
процессами с использованием алгоритмов машинного
обучения..... 456

Костин А. С., Майоров Н. Н., Кучко Д. В. Исследование моделей
и методов практической реализации беспилотных транспортных систем
для морских пассажирских терминалов 467

CONTENTS

OPERATION OF WATER TRANSPORT, WATERWAYS AND HYDROGRAPHY..... 336

Loginovsky V. A. Assessing the accuracy of ship position through
real-time measurements 336

Ilyinsky D. A., Ganzha O. Yu., Korneev A. A. Bottom seismic
observations at sea. Problems and solutions 347

Maryasov G. V., Sharlay G. N. Mathematical model of the vessel
motion during a planned grounding..... 363

Ageev S. A., Karetnikov V. V., Rudykh S. V. Ensuring the safety
of navigation on the inland waterways of regional importance
in Saint Petersburg 370

Malikova T. E., Petrova E. E. Simulation model of prestacking
at the seaport container terminal 379

Kuznetsov A. L., Gryzlov V. Yu., Uami Abdeljalil. Algorithm
for constructing an arbitrary route on a discrete plane
and its executable description 391

Galin A. V., Khvatov G. M. Optimization of oil tankers handling
at export oil terminals 403

Izotov O. A. Multi-criteria assessment of the combined shipments
container transportation possibility 413

Yuyukin I. V. Realization of the smoothness of spline trajectory
configuration for avoidance of no-go areas in due time 421

SHIP POWER PLANTS AND THEIR ELEMENTS (MAIN AND AUXILIARY)..... 444

Ivanovskaya A. V., Zhukov V. A., Shustrayakov N. A. Development trends
and modern methods of designing lifting devices
for fishing vessels..... 444

Volume 16. № 3

2024

EDITORIAL BOARD

S. O. Baryshnikov
Doctor of Technical Sciences

Deputy Editor-in-Chief
A. P. Nyrkov
Doctor of Technical Sciences

Members of the editorial board:

A. Ye. Sazonov
Doctor of Technical Sciences,
Prof.,
corresponding member
of the Russian Academy
of Sciences

R. M. Yusupov
Doctor of Technical Sciences,
Prof., corresponding member
of the Russian Academy of
Sciences

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. L. Erofeev,
Doctor of Technical Sciences

V. A. Zhukov,
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

E. A. Koroleva,
Doctor of Economic Sciences

I. I. Kostylev,
Doctor of Technical Sciences

A. L. Kuznetsov,
Doctor of Technical Sciences

V. A. Loginovskiy,
Doctor of Technical Sciences

A. V. Makshanov,
Doctor of Technical Sciences

V. Ye. Marley,
Doctor of Technical Sciences

T. A. Pantina,
Doctor of Economic Sciences

V. I. Reshnyak,
Doctor of Technical Sciences

A. V. Saushev,
Doctor of Technical Sciences

S. V. Smolentsev,
Doctor of Technical Sciences

S. S. Sokolov,
Doctor of Technical Sciences

M. V. Sukhoterin,
Doctor of Technical Sciences

A. L. Tezikov,
Doctor of Technical Sciences

A. A. Chertkov,
Doctor of Technical Sciences

V. B. Chistov,
Doctor of Technical Sciences

AUTOMATION AND CONTROL OF TECHNOLOGICAL PROCESSES AND PRODUCTIONS	456
<i>Nyrkov A. P., Yumasheva E. S., Kirikov A. V.</i> Optimization of the penetration testing process in automated process control systems using machine learning algorithms	456
<i>Kostin A. S., Maiorov N. N., Kuchko D. V.</i> Research of models and methods for practical implementation of unmanned transport systems for marine passenger terminals	467

ЭКСПЛУАТАЦИЯ ВОДНОГО ТРАНСПОРТА, ВОДНЫЕ ПУТИ СООБЩЕНИЯ И ГИДРОГРАФИЯ

DOI: 10.21821/2309-5180-2024-16-3-335-346

ASSESSING THE ACCURACY OF SHIP POSITION THROUGH REAL-TIME MEASUREMENTS

V. A. Loginovsky

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

One of the most important tasks of shipping for ensuring the efficiency and safety of navigation is accurately determining the ship position during the voyage. Research on the accuracy of finding a ship coordinates is always at the top of the list of urgent navigational issues, even nowadays with the widespread implementation of state-of-the-art information technologies and the progress of navigation systems and techniques. If to follow measurement standards, there are two close terms applied in marine navigation in this context. They are “accuracy” and “precision” of measurements, which in principle might confuse the understanding of the task onboard the ship. In marine navigation, the traditional understanding of ship current position accuracy is to assess the impact of a combination of random errors in measured navigation parameters on random errors in computed coordinates. Two-dimensional confidence intervals centered on the fixed ship position serve as a graphical representation of the assessed accuracy, which is algebraically, might be described by the covariance matrix of coordinate errors. As a result of the high level of uncertainty caused by the effect of random errors in real-time measurements, it is impossible to assess the accuracy of ship position during the voyage. The magnitude and mathematical sign of these errors are unknown, and the navigation parameter indications themselves do not provide any information on their accuracy. For this reason, a priori prediction of the precision of navigation parameters associated with certain sets of measurements made in the past under specific standard conditions are used to assess the accuracy of the real-time ship position. This priori data inspires to substitute the concept of accuracy of the real-time ship position with the concept of precision of the navigation system, technique, or device operation, which is essentially the theoretical inconsistency. The purpose of this study is to partially solve this inconsistency. The study outcome is a proposed indicator that, by using information gathered from redundant measurements of navigation parameters obtained in real time without the use of priori data, can indirectly assess the accuracy of the real-time fixed coordinates of the ship position. The indicator concept is based on assessing the area of the real-time figure of errors. This area is limited by its outer contour of position lines and has a high degree of measurement redundancy to guarantee that, the probability of locating the true point within this figure is 100 %. In addition to having high precision features, modern navigation technology also makes it possible to handle a larger volume of measurement data utilizing contemporary technologies, such as Big Data platforms, which do not restrict the number of measurements. Consequently, higher number of navigation measurements can significantly raise the probability of finding the true position in the ensuing complicated figure of errors. The shape of the figure allows for a spatial analysis of the proximity of potential navigational hazards and the ship location, by using, for example, the least squares method. The area of such a figure is a characteristic of the uncertainty (an analog of precision) of coordinate errors, and its minimum area provides the best accuracy. The ability to determine the real-time figure area with sheer certainty of existing the true point in it stimulates the development of the next more technologically advanced and encouraging level of alternative and autonomous methods for determining the vessel position. These methods are based primarily on the possibility of increasing the volume of processed measurement information. It directly relates, for example, to the development of azimuthal methods of nautical astronomy, which make it possible to perform an unlimited number of autonomous navigation measurements in the absence of a visible horizon, which undoubtedly becomes valuable when ships are sailing in high latitude regions, especially during a long period of polar night.

Keywords: determination of the ship position, probability, figure of errors, confidence interval, redundancy of measurements, accuracy, precision.

For citation:

Loginovsky, Vladimir A. “Assessing the accuracy of ship position through real-time measurements.” *Vestnik Gosudarstvennogo universiteta morskogo i rechnogo flota imeni admirala S. O. Makarova* 16.3 (2024): 335–346. DOI: 10.21821/2309-5180-2024-16-3-335-346.

ОЦЕНКА ТОЧНОСТИ ОПРЕДЕЛЕНИЯ КООРДИНАТ МЕСТА СУДНА ПО ИЗМЕРЕНИЯМ В РЕАЛЬНОМ МАСШТАБЕ ВРЕМЕНИ

В. А. Логиновский

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

Темой исследования является одна из наиболее важных задач морской навигации в обеспечении безопасности и эффективности мореплавания, а именно точность определения координат места судна. Несмотря на интенсивное внедрение информационных технологий и повышение точности навигационных систем и методов в списке актуальных задач мореплавания постоянно находятся исследования, связанные с точностью определения координат места судна. Традиционно под оценкой точности текущих координат места судна в морской навигации понимается априорная оценка влияния комбинации случайных погрешностей измеренных навигационных параметров на случайные погрешности рассчитанных координат. С помощью этой информации осуществляется подмена точности текущих координат места судна понятием «точность работы навигационной системы или метода», что принципиально является теоретическим несоответствием. Целью данного исследования является попытка частично компенсировать это несоответствие. Для этого предложен индикатор, позволяющий косвенно оценить текущую точность обсервованных координат места судна по информации, содержащейся в избыточных измерениях, полученных в масштабе реального времени без использования априорных данных. Идея индикатора основана на оценке площади фигуры погрешностей линий положения, ограниченной ее внешним контуром при высоком уровне избыточности измерений, обеспечивающих вероятность нахождения истинной точки в этой фигуре, равной 100 %. Отмечается, что современная навигационная техника характеризуется не только высокими точностными характеристиками, но и позволяет наращивать объем измерительной информации, используя для ее обработки современные технологии, включая платформы Big Data. Возможность определения текущей области с полной достоверностью нахождения в ней истинной точки стимулирует развитие следующего более технологичного и перспективного уровня автономных методов определения места судна, который напрямую относится, например, к развитию азимутальных методов мореходной астрономии, позволяющих выполнять неограниченное количество измерений в отсутствие видимого горизонта, что, несомненно, является актуальным при плавании судов в условиях высоких широт, особенно в длительный период полярной ночи.

Ключевые слова: определение места судна, вероятность, фигура погрешностей, доверительный интервал, избыточность измерений, точность, прецизионность.

Для цитирования:

Логиновский В. А. Оценка точности определения координат места судна по измерениям в реальном масштабе времени / В. А. Логиновский // Вестник Государственного университета морского и речного флота имени адмирала С. О. Макарова. — 2024. — Т. 16. — № 3. — С. 335–346. DOI: 10.21821/2309-5180-2024-16-3-335-346.

Введение (Introduction)

Точное и надежное определение координат места судна (ОМС) является одной из наиболее важных задач морской навигации для обеспечения безопасности и эффективности мореплавания. Исследования, связанные с точностью ОМС и навигационной безопасностью, постоянно находятся в списке актуальных задач морской навигации, которые включают обеспечение безопасного движения судов по заданным траекториям [1], применение методов автономной навигации [2]–[4], а также детальное исследование альтернативных и интегрированных навигационных систем [5], [6]. Большое внимание уделяется реальным измерениям [7], [8], повышению их точности [9]–[11] и информативности [12]–[13], включая оценку надежности [14], [15] применяемых методов ОМС.

Традиционно под оценкой точности ОМС (обсервации) в морской навигации понимается оценка влияния комбинации случайных погрешностей измеренных навигационных парамет-

ров (НП) на случайные погрешности обсервованных координат места судна (*прецизионность* — precision (англ.))¹ согласно ГОСТу Р ИСО 5725-1–2002. Оценка точности ОМС в общем виде формируется с помощью ковариационной матрицы погрешностей координат и геометрически иллюстрируется двумерными доверительными интервалами (областями) с центром в обсервованной точке. Контуры таких интервалов в навигационном пространстве ограничены либо эллипсом, либо окружностью определенных размеров, в которых с некоторой вероятностью прогнозируется нахождение истинного места судна. Предполагается, что эта вероятность зависит от принимаемого закона распределения случайных погрешностей обсервации, в качестве которого обычно используется закон Гаусса. Термин «прецизионность» в настоящее время не нашел применения в практике морской навигации, поэтому, во избежание терминологической путаницы в изложении материала, в данной работе использован термин «априорная точность».

Оценка *априорной точности* обсервованных координат места судна включает высокий уровень неопределенности, ее расчет не является тривиальной задачей, прежде всего, из-за того, что текущие погрешности измерений неизвестны ни по модулю, ни по знаку, а сами измерения навигационных параметров (НП) не несут какой-либо информации о своей точности и количество измерений обычно мало. Поэтому для оценки точности конкретной обсервации применяется априорный подход, основанный на параметрах обобщенного вероятностно-статистического закона распределения, что, по сути, является вероятностным прогнозом.

Априорная точность характеризует некоторую генеральную совокупность погрешностей измерений НП, полученных в специальных стандартных условиях задолго до момента текущей обсервации (возможно, много лет тому назад) с помощью конкретной техники (прибора, метода, системы). В такой постановке она описывает точность работы измерительной техники, но не характеризует текущую точность конкретного измерения [16] (*ассигасу* (англ.))² и, соответственно, текущую точность обсервации, подобно тому, как средняя зарплата сотрудников компании не характеризует уровень дохода конкретного работника и наоборот. Единственным источником информации, влияющим на текущую точность обсервации, является *геометрический фактор* (ГФ), определяющий взаимное расположение судна и навигационных ориентиров, составляющие которого являются элементами матрицы частных производных от навигационных функций (НФ) по координатам (матрица Якоби). В чистом виде ГФ можно выделить только для равноточных и однородных измерений. Этим объясняется ограничение его применимости как для оценки априорной точности, так и для оценки текущей точности обсервованных координат. ГФ является некоторым аналогом числа обусловленности системы линейных уравнений линий положения.

Методы и материалы (Methods and Materials)

Распространение характеристик (общего) закона распределения на конкретную обсервацию с неизвестными погрешностями измерений НП в динамически меняющихся условиях эксплуатации судна выявляет некоторое логическое несоответствие в теории, прежде всего, потому, что единичной обсервации присваиваются свойства математического ожидания закона распределения, т. е. центра искусственно принятого доверительного интервала. В такой постановке задачи этот центр при повторении измерений будет иметь различные координаты в навигационном пространстве в силу действия случайных погрешностей (рис. 1) даже если судно находится все это время в одной и той же опорной (истинной точке).

¹ Прецизионность (precision) — степень близости друг к другу независимых результатов измерений, полученных в конкретных регламентированных условиях. Прецизионность зависит только от случайных погрешностей, она не имеет отношения к истинному или установленному значению измеряемой величины. Меру прецизионности обычно выражают в терминах неточности и вычисляют как стандартное отклонение результатов измерений; меньшая прецизионность соответствует большему стандартному отклонению.

² Точность (assigasy) — степень близости результата измерений к принятому опорному значению.

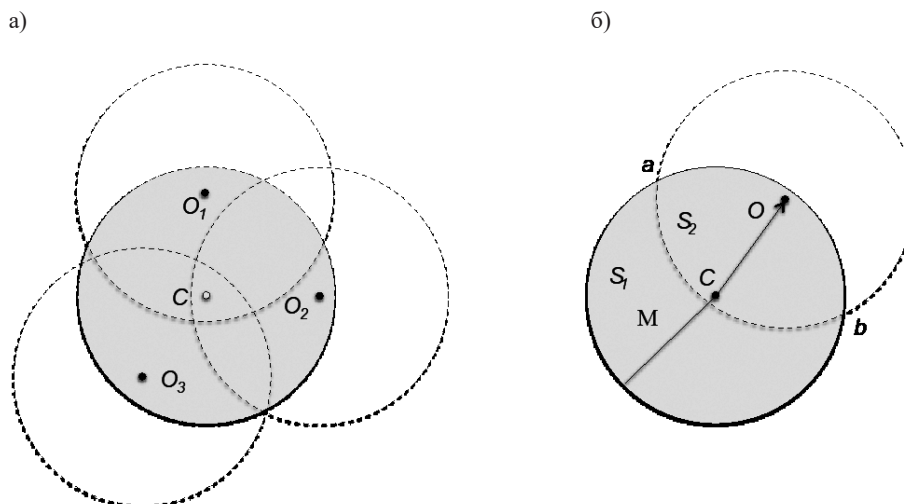


Рис. 1. Оценка точности (прецизионности) работы навигационной системы (а) и единичной обсервации (б)

Fig. 1. Assessment of the accuracy (precision) of the navigation system (a) and single observation (b)

В качестве гипотетического примера предположим, что судно для проведения исследований точности (прецизионности) навигационной системы NS находится в опорной (истинной) точке C (прямая задача). В течение некоторого интервала времени проведено условно неограниченное количество обсерваций по навигационной системе NS и математическое ожидание полученной совокупности обсерваций практически совпало с истинным значением координат (см. рис. 1, а), получен доверительный интервал, покрывающий полученные погрешности координат с уровнем вероятности $P = 0,95$ (затененный контур). Пусть в этом доверительном интервале для любой его точки матрица Якоби предполагается практически постоянной, поэтому выбранные произвольно из него точки O_{1-3} , согласно принятому *априорному подходу*, имеют свойства точки C (обратная задача), т. е. их *априорная точность* оценивается такими же доверительными интервалами с утверждением, что истинная точка в любом из трех приведенных на рисунке интервалов содержится в них с вероятностью $P = 0,95$.

Некорректность обратной задачи заключается в следующем: (i) — эти точки O_{1-3} не являются центрами распределения случайных погрешностей координат; (ii) — точки имеют свойства смещенных оценок; (iii) — истинная точка не может находиться в незакрашенных областях искусственных доверительных интервалов; (iv) — вероятность $P = 0,95$ не может распространяться на незакрашенные области. Исходя из (iv) для завершения анализа в данном случае целесообразно применить концепцию геометрической оценки вероятности P_g нахождения истинной точки в секторе ab пересечения окружностей (рис. 1, б), определяемой как $P_g = S_2 / S_1$, где S_2 — площадь сектора ab , а S_1 — площадь полного круга радиуса M . Очевидное неравенство $0 \leq P_g < 1$ доказывает некорректность применения такого подхода к оценке априорной точности текущей обсервации в точке O . В итоге анализ показал, что в априорной оценке точностных характеристик обсервованных координат имеются тонкости, которые находятся вне зоны внимания исследователей и практиков, стимулирующие поиск иных подходов к постановке задачи и ее решению.

В данной работе для исследования качества обсервации применяется подход, основанный на другом определении точности, приведенном в стандарте [16]. В нем термин «точность» (accuracy (англ.)) определяется как степень близости результата измерения к принятому опорному значению. При исключении систематических погрешностей в серии навигационных измерений термин «точность обсервации» будет определяться сочетанием только случайных независимых погрешностей и определяться близостью к опорной (истинной) точке. В статье этот термин определен как *текущая точность*.

Таким образом, интерпретация термина «точность» в практической навигации имеет два значения и может относиться как к характеристикам работы конкретной измерительной техники и оцениваться с помощью ковариационной матрицы или геометрически с применением доверительного интервала и использоваться как *априорная точность* для выбора навигационной техники или метода ОМС, так и к конкретному измерению или обсервации (*текущая точность*) как степень близости результата измерения к принятому опорному значению или близости обсервации к истинной точке нахождения судна, которая на практике неизвестна. Стандарты точности, представленные в документах ИМО, относятся к точности навигационных систем [16], [17].

Несмотря на то, что единичные измерения НП не несут информации об их точности, однако комбинация избыточных измерений рождает такую новую информацию, которая геометрически наглядно проиллюстрирована в виде образующихся в навигационном пространстве фигур погрешностей в отличие от традиционных доверительных интервалов, описанных ранее. В этих фигурах истинная точка может содержаться с определенной вероятностью P , причем при таком подходе не предполагается использование априорной информации для ее оценки — это *текущие (мгновенные) навигационные интервалы*, существующие только на момент обсервации. Утверждение справедливо при любом законе распределения случайных погрешностей измерений (линий положения), который с практической точки зрения может приниматься как симметричный. Так, в соответствии с результатами работы [8], в таблице показаны численные значения этих вероятностей как комбинации навигационных пространств различной размерности $n = 1-10$ и избыточности измерений в них: $r = 1-10$.

n	r									
	1"	2"	3"	4"	5"	6"	7"	8"	9"	10"
1"	0,5000	0,7500	0,8750	0,9375	0,9688	0,9844	0,9922	0,9961	0,9980	0,9990
2"	0,2500	0,5000	0,7500	0,8750	0,9375	0,9688	0,9844	0,9922	0,9961	0,9980
3"	0,1250	0,2500	0,5000	0,7500	0,8750	0,9375	0,9688	0,9844	0,9922	0,9961
4"	0,0625	0,1250	0,2500	0,5000	0,7500	0,8750	0,9375	0,9688	0,9844	0,9922
5"	0,0313	0,0625	0,1250	0,2500	0,5000	0,7500	0,8750	0,9375	0,9688	0,9844
6"	0,0156	0,0313	0,0625	0,1250	0,2500	0,5000	0,7500	0,8750	0,9375	0,9688
7"	0,0078	0,0156	0,0313	0,0625	0,1250	0,2500	0,5000	0,7500	0,8750	0,9375
8"	0,0039	0,0078	0,0156	0,0313	0,0625	0,1250	0,2500	0,5000	0,7500	0,8750
9"	0,0020	0,0039	0,0078	0,0156	0,0313	0,0625	0,1250	0,2500	0,5000	0,7500
10"	0,0010	0,0020	0,0039	0,0078	0,0156	0,0313	0,0625	0,1250	0,2500	0,5000

Приведенные данные показывают, что при увеличении избыточности измерений r вероятность P покрытия истинной точки фигурой погрешностей увеличивается. Этот результат не является противоречивым, так как он подтверждает *свойство состоятельности* такой оценки вероятности, но при этом возникают следующие вопросы:

- 1) можно ли с помощью информации, извлеченной из этих мгновенных фигур погрешностей, оценить *текущую точность* обсервации при наличии случайных погрешностей измерений;
- 2) является ли уменьшение площади фигуры погрешностей основанием считать, что такая фигура находится ближе к истинной точке, т. е. действует ли принцип «чем меньше, тем точнее».

Очевидно, что для ответа на эти вопросы необходимо оценить функциональную связь расстояния D между опорной точкой и центром тяжести фигуры погрешностей с площадью S в последовательности измерений.

Рассмотрим традиционное навигационное пространство ($n = 2, r = 1$), в котором случайные погрешности формируют фигуры в виде треугольников (2-симплексов). В такой постановке задачи нет смысла комбинировать вероятность покрытия опорной точки треугольником с его размерами, так как эта вероятность P составляет всего 0,25. Указанный факт позволяет ответить на второй вопрос, который является немаловажным для навигации, а именно верна ли гипотеза о том, что чем меньше площадь текущего треугольника погрешностей S , тем точнее проведенные измерения или перефразируя эту гипотезу, чем меньше треугольник погрешностей, тем ближе он находится к принятому истинному значению координат места судна, т. е. расстояние D между истинной точкой и центром тяжести треугольника уменьшается при уменьшении его площади S . Вряд ли ответ

на этот вопрос может быть положительным, так как комбинации независимых случайных погрешностей измерений могут формировать фигуры погрешностей различных размеров случайным образом на различных удалениях D от истинной точки.

Для подтверждения или опровержения данной гипотезы было проведено моделирование последовательности из 50 блоков навигационных измерений по трем измерениям в каждом, используя генератор нормально распределенных случайных чисел, которые имитировали погрешности линий положения. Были заданы следующие параметры закона распределения: математическое ожидание $\mu = 0$, среднеквадратическое отклонение $\sigma = 10$ у. е. Градиенты трех навигационных функций для упрощения были равномерно распределены по горизонту в опорной точке, т. е. $\tau_1 = 0^\circ$, $\tau_2 = 120^\circ$, $\tau_3 = 240^\circ$, поэтому все треугольники погрешностей в последовательности измерений появлялись как равносторонние, но разных размеров. Последовательность таких треугольников позволила сделать еще одно упрощение, заключающееся в том, что вместо площадей треугольников для анализа использовались радиусы вписанных в них окружностей R , которые функционально связаны с площадями S , но численно имеют ту же размерность, что и D . Это упрощает их совместное графическое представление (рис. 2). На этом рисунке представлена R -последовательность радиусов вписанных окружностей в треугольники погрешностей в у. е. и фрагментарно показаны площади некоторых треугольников S как функции R ; D — последовательность расстояний от опорной точки до центра тяжести соответствующего треугольника.

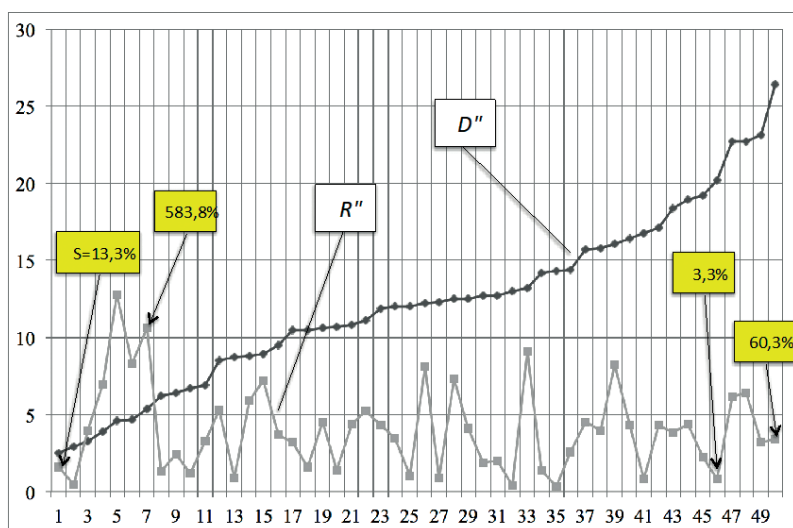


Рис. 2. Соотношения между размерами треугольников погрешностей и их положением относительно опорной точки

Fig. 2. Relationships between the sizes of error triangles and their position relative to the reference point

Процесс моделирования показал следующие результаты:

1. При нормальном законе распределения случайных погрешностей линий положения условно малые треугольники погрешностей ($R < 5$) встречаются чаще, чем треугольники условно больших размеров ($R > 5$).

2. Формирование малого треугольника погрешностей не означает увеличение *текущей точности* измерений как близости его к опорной точке. Так, например, на рис. 2 центр тяжести треугольника с $S = 3,3$ (у. е.)² находится на расстоянии от опорной точки $D = 20,2$ у. е.; треугольник с $S = 583,8$ (у. е.)² отстоит от опорной точки всего на $D = 4,7$ у. е.

Рассмотрим более информативную ситуацию, когда применяется восемь линий положения, т. е. избыточность навигационных измерений $r = 6$. В соответствии с результатами работы [8] вероятность P покрытия опорной точки такой фигурой близка к единице, что делает вполне приемлемым использование такого количества линий положения для практического исследования.

В публикации [8] комбинации знаков погрешностей линий положения описана в виде формулы бинома Ньютона, где g и h — соответственно положительные и отрицательные погрешности линий положения без фиксации их численных значений:

$$(g + h)^8 = g^8 + 8g^7h + 28g^6h^2 + 56g^5h^3 + 70g^4h^4 + 56g^3h^5 + 28g^2h^6 + 8gh^7 + h^8.$$

В данном исследовании численные значения погрешностей линий положения включены в процесс моделирования для определения площадей фигур погрешностей. При моделировании использовались те же условия, которые применялись для избыточности $r = 1$ со следующей ориентацией градиентов НФ: $\tau_1 = 0^\circ$, $\tau_2 = 120^\circ$, $\tau_3 = 240^\circ$, $\tau_4 = 45^\circ$, $\tau_5 = 315^\circ$, $\tau_6 = 200^\circ$, $\tau_7 = 30^\circ$, $\tau_8 = 90^\circ$.

Высокая вероятность P покрытия опорной точки фигурой погрешностей дает возможность сконцентрироваться на площади полученной фигуры, ограниченной контуром, соединяющим внешние точки пересечения линий положения (рис. 3), исключив саму вероятность P покрытия как константу для этого блока измерений.

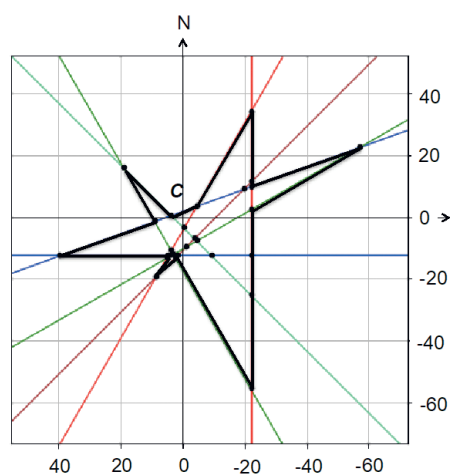


Рис. 3. Фигура погрешностей линий положения
в навигационном пространстве при $r = 6$

Fig. 3. Figure of position lines errors in navigation space at $r = 6$

В исследовании не ставится вопрос о выборе точки нахождения места судна в полученной фигуре погрешностей. Вполне очевидно, что если истинная точка находится в этой области с $P \approx 1$, то и обсервованная точка, в соответствии с принципом внутренней сходимости, должна находиться в той же области. Тогда справедливо утверждение о том, что чем меньше площадь области S , тем ближе обсервованная и истинная точки находятся друг к другу, что соответствует определению *текущей точности* конкретного измерения (обсервации). Учитывая принцип внутренней сходимости, можно сделать вывод о том, что это может быть любая точка внутри фигуры погрешностей, включая точку, полученную по методу наименьших квадратов (МНК) как наиболее естественную. При увеличении избыточности измерений r точка по МНК будет стремиться к положению истинной точки, расстояние между ними будет уменьшаться, т. е. текущая точность обсервации [8] будет повышаться. Это определяет целесообразность применения МНК для расчета обсервованных координат в фигуре погрешностей, где вероятность $P \approx 1$. Современные технологии позволяют решать такие задачи с большим количеством измерений при использовании платформ Big Data, что может стимулировать развитие, например, техники и технологии асимптотических методов мореходной астрономии для ОМС в высоких широтах в условиях полярной ночи (Северный морской путь).

На рис. 3 представлена фигура погрешностей для условий ($n = 2$, $r = 6$), которая включает 28 точек пересечения линий положения и опорную точку C , находящуюся на пересечении координатных линий, отмеченных стрелками. Внешний контур фигуры и ее площадь S фиксируют зону неопределенности, внутри которой с вероятностью $P \approx 1$ находится опорная точка.

Эта комбинация параметров зоны является *косвенной характеристикой* близости обсервации к опорной точке, т. е. чем меньше S , тем ближе к опорной точке находится обсервация. Для моделирования применялась онлайн-платформа для расчета площади фигуры, ограниченной линиями положения [18].

Фигура погрешностей с $r = 6$ существенно отличается от треугольника тем, что истинная точка находится в этой зоне с вероятностью $P \approx 1$. Поэтому применение принципа внутренней сходимости (например, МНК), в отличие от ситуации с $r = 1$, где $P = 0,25$, вполне оправданно. При наличии нескольких блоков измерений с $P = 1$ возможна оптимизация, заключающаяся в том, что из нескольких комбинаций линий положения при $r \geq 6$ появляется возможность выбрать фигуру погрешностей с минимальной площадью S .

Таким образом, в результате исследования сделан вывод о том, что необходимо обратить внимание на следующие различия между двумя подходами к оценке точности ОМС в морской навигации:

- оценке точности навигационной измерительной техники (прибора, метода, системы), полученной по характеристикам экспериментального доверительного интервала (precision) в конкретном районе плавания, фиксируемая в технической документации и впоследствии используемая в качестве априорной оценки точности информации для выбора навигационной техники для ОМС;
- оценке точности текущей обсервации в фигуре погрешностей линий положения, полученной по ее площади S при избыточности измерений $r \geq 6$.

На рис. 4 в качестве примера показаны четыре комбинации по восемь линий положения, формирующие фигуры погрешностей различной формы с различными площадями S_{1-4} .

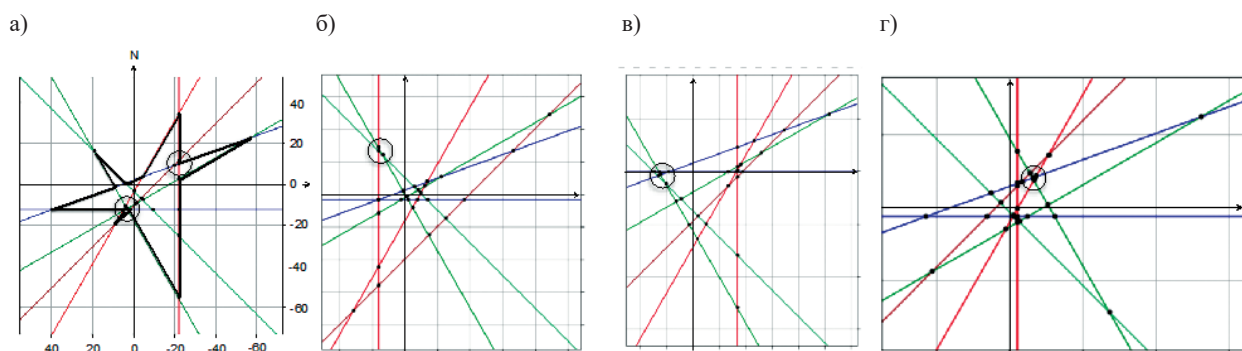


Рис. 4. Фигуры погрешностей и их площади в (у. е.): а — $S = 2967$; б — $S = 3288$; в — $S = 2224$; г — $S = 4910$
Fig. 4. Figures of errors and their areas in (conventional unit); а — $S = 2967$; б — $S = 3288$; в — $S = 2224$; д — $S = 4910$

Кружками отмечены условно малые треугольники, находящиеся на значительных расстояниях от опорной точки, подтверждающие результаты, представленные на рис. 2. В соответствии с рис. 4 наиболее точная комбинация измерений НП имеет площадь $S = 2224$ у. е., а наименее точная формирует фигуру с $S = 4910$ у. е.

Результаты (Results)

В выполненном исследовании получены результаты, акцентирующие внимание на существенных различиях в применении на практике двух подходов к оценке точности навигационных измерений, которые заключаются в следующем:

1. Для оценки точности работы навигационной техники (прибора, метода, системы) применяется подход, основанный на экспериментальных характеристиках доверительных интервалов, полученных в конкретных стандартных условиях испытаний. Эта информация в виде средних квадратических погрешностей (отклонений) фиксируется в технической документации навигационных приборов и инструментов и впоследствии используется в качестве априорной информации при выборе навигационной техники и методов для ОМС. Показано логическое несоответствие в применении *априорной точности* т. е. закона распределения случайных погрешностей измерений НП к оценке *текущей точности* обсервации.

2. На практике координаты обсервации определяются с помощью навигационных измерений, отягощенных случайными погрешностями, и положение истинного места судна неизвестно, но при $r \geq 6$ вероятность P его нахождения в фигуре погрешностей близка или равна единице. Это дает основание сделать вывод об области истинного положения судна. Для оценки размеров этой области, т. е. косвенной оценки близости обсервации и истинного места судна, предлагается оценка площади S фигуры погрешностей. Так как обе точки находятся в фигуре погрешностей, при ее меньшей площади S расстояние D между этими точками меньше, т. е. *текущая точность* обсервации выше.

3. При нормальном законе распределения случайных погрешностей линий положения условно малые треугольники погрешностей встречаются чаще, чем треугольники условно больших размеров.

4. Формирование малого треугольника случайными погрешностями линий положения не означает увеличение точности измерений (близости треугольника к опорной точке).

Обсуждение (Discussion)

В статье выполнен анализ различия двух методов оценки точности навигационных измерений и сформулирован вопрос о некорректности применения априорных методов оценки точности для эпизодических обсерваций, изложенных в курсах морской навигации. Основным признаком такой некорректности заключается в переносе свойств совокупности ранее идентифицированных погрешностей навигационных измерений на неизвестные погрешности единичной обсервации и придании ей статуса математического ожидания этой совокупности, т. е. центра навигационного априорного доверительного интервала, ограниченного контуром эллипса или окружности.

В процессе исследования зафиксирован вывод о том, что избыточность измерений при наличии независимых случайных погрешностей играет ключевую роль и связана с методом оценки текущей точности эпизодической обсервации. Достаточно неочевидным является полученный результат, свидетельствующий о том, что при $r = 1$ размеры площади S треугольника погрешностей и расстояние D между треугольником (центр тяжести) и опорной точкой не связаны между собой. Несмотря на то, что по результатам моделирования при нормальном распределении погрешностей условно малые треугольники образуются чаще в последовательности измерений, такие треугольники не обязательно располагаются ближе к опорной (истинной) точке. Этот факт опровергает утверждение о том, что меньший треугольник погрешностей является подтверждением большей точности ОМС, что может явиться причиной сосредоточения более пристального внимания на некоторых вопросах навигации, связанных с этим неочевидным явлением, включая малый уровень вероятности покрытия треугольником истинной точки.

Увеличение избыточности измерений r приводит не только к образованию сложных фигур погрешностей, но и к увеличению вероятности покрытия P ими истинной точки. При $P \approx 100\%$ площадь S фигур погрешностей является косвенной характеристикой точности единичной обсервации, которая может быть формально получена с использованием МНК, причем чем меньше площадь S , тем ближе расположены истинная точка и точка по МНК внутри фигуры погрешностей. Увеличение избыточности измерений при $r \geq 6$ реализует свойство практической состоятельности оценки по МНК, т. е. тенденцию к совмещению точек, а площадь фигуры S погрешностей может играть роль некоего эквивалента геометрическому фактору и регламентироваться в зависимости от навигационной сложности района плавания.

В исследовании рассмотрено только двумерное навигационное пространство, исходя из предположения, что экстраполяция на пространства других размерностей (например, на $n = 3$) даст теоретически аналогичные результаты, а также в нем не учитываются систематические погрешности измерений.

Выводы (Summary)

На основе выполненного исследования можно сделать следующие выводы:

1. Современная навигационная техника, характеризующаяся высокой точностью измерений, в перспективе позволяет наращивать объем измерительной информации, используя для ее обработки платформы Big Data без ограничения количества данных.

2. Увеличение количества навигационных измерений не исключает необходимости решения задачи оценки точности единичной обсервации, которая может быть выполнена косвенно с помощью оценки площади фигуры погрешностей линий положения или фигуры погрешностей, образованной внешними контурами навигационных изолиний.

3. Интенсивное внедрение информационных технологий в мореплавании стимулирует развитие следующего более технологичного и перспективного этапа альтернативных и автономных методов ОМС, основанного на возможности увеличения объема обрабатываемой измерительной информации. Этот этап напрямую относится, например, к азимутальным методам мореходной астрономии, которые позволяют выполнять неограниченное количество навигационных измерений в отсутствии видимого горизонта, что несомненно, является актуальным при плавании судов в непростых условиях высоких широт, особенно в длительный период полярной ночи.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Васьков А. С. Планирование и контроль криволинейной траектории движения судна / А. С. Васьков, А. А. Мироненко // Вестник Государственного университета морского и речного флота имени адмирала С. О. Макарова. — 2023. — Т. 15. — № 3. — С. 401–415. DOI: 10.21821/2309-5180-2023-15-3-401-415.
2. Дерябин В. В. Модель движения судна для счисления пути / В. В. Дерябин // Вестник Государственного университета морского и речного флота имени адмирала С. О. Макарова. — 2022. — Т. 14. — № 1. — С. 17–24. DOI: 10.21821/2309-5180-2022-14-1-17-24.
3. Дерябин В. В. Нейросетевой подход к созданию системы определения счислимого места судна / В. В. Дерябин // Вестник Государственного университета морского и речного флота имени адмирала С. О. Макарова. — 2018. — Т. 10. — № 3. — С. 469–476. DOI: 10.21821/2309-5180-2018-10-3-469-476.
4. Дерябин В. В. Определение местоположения судна по глубинам при помощи нейронной сети / В. В. Дерябин // Вестник Государственного университета морского и речного флота имени адмирала С. О. Макарова. — 2024. — Т. 16. — № 1. — С. 7–16. DOI: 10.21821/2309-5180-2024-16-1-7-16.
5. Ююкин И. В. Картографирование изоповерхности дополнительных вторичных факторов методом сплайн-аппроксимации как условие повышения точности обсерваций e-Lozan / И. В. Ююкин // Вестник Государственного университета морского и речного флота имени адмирала С. О. Макарова. — 2024. — Т. 16. — № 1. — С. 37–54. DOI: 10.21821/2309-5180-2024-16-1-37-54.
6. Czaplewski K. The Concept of Using the Decision-Robustness Function in Integrated Navigation Systems / K. Czaplewski, B. Czaplewski // Sensors. — 2022. — Vol. 22. — Is. 16. — Pp. 6157. DOI: 10.3390/s22166157.
7. Specht M. Determination of navigation system positioning accuracy using the reliability method based on real measurements / M. Specht // Remote Sensing. — 2021. — Vol. 13. — Is. 21. — Pp. 4424. DOI: 10.3390/rs13214424.
8. Логиновский В. А. Оценка вероятности нахождения места судна в геометрической фигуре погрешностей линий положения / В. А. Логиновский // Вестник Государственного университета морского и речного флота имени адмирала С. О. Макарова. — 2023. — Т. 15. — № 2. — С. 161–171. DOI: 10.21821/2309-5180-2023-15-2-161-171.
9. Nguyen T. D. Evaluation of the accuracy of the ship location determined by GPS global positioning system on a given sea area / T. D. Nguyen // Journal of Physics: Conference Series. — IOP Publishing, 2020. — Vol. 1515. — No. 4. — Pp. 042010. DOI: 10.1088/1742-6596/1515/4/042010.
10. Specht M. Consistency of the empirical distributions of navigation positioning system errors with theoretical distributions — comparative analysis of the DGPS and EGNOS systems in the years 2006 and 2014 / M. Specht // Sensors. — 2020. — Vol. 21. — Is. 1. — Pp. 31. DOI: 10.3390/s21010031.
11. Zalewski P. Evolution of Maritime GNSS and RNSS Performance Standards / P. Zalewski, A. Bąk, M. Bergmann // Remote Sensing. — 2022. — Vol. 14. — Is. 21. — Pp. 5291. DOI: 10.3390/rs14215291.
12. Filipowicz W. Mathematical theory of evidence in navigation / W. Filipowicz // Belief Functions: Theory and Applications: Third International Conference, BELIEF 2014, Oxford, UK, September 26–28, 2014. Proceedings 3. — Springer International Publishing, 2014. — Pp. 199–208. DOI: 10.1007/978-3-319-11191-9_22.
13. Specht M. Statistical distribution analysis of navigation positioning system errors — issue of the empirical sample size / M. Specht // Sensors. — 2020. — Vol. 20. — Is. 24. — Pp. 7144. DOI: 10.3390/s20247144.

14. Filipowicz W. Position fixing and its accuracy evaluation / W. Filipowicz // *Zeszyty Naukowe/Akademia Morska w Szczecinie*. — 2013. — № 36 (108) z. 1. — Pp. 42–48.
15. Specht C. A method for the assessing of reliability characteristics relevant to an assumed position-fixing accuracy in navigational positioning systems / C. Specht, J. Rudnicki // *Polish Maritime Research*. — 2016. — Vol. 23. — Is. 3. — Pp. 20–27. DOI: 10.1515/pomr-2016-0028.
16. Resolution A.915(22). Revised maritime policy and requirements for a future global navigation satellite system (GNSS) [Электронный ресурс]. — Режим доступа: [https://www.wcdn.imo.org/localresources/en/KnowledgeCentre/IndexofIMOResolutions/AssemblyDocuments/A.915\(22\).pdf](https://www.wcdn.imo.org/localresources/en/KnowledgeCentre/IndexofIMOResolutions/AssemblyDocuments/A.915(22).pdf) (дата обращения: 30.04.2024).
17. Resolution A.1046(27). Worldwide radionavigation system [Электронный ресурс]. — Режим доступа: [https://www.wcdn.imo.org/localresources/en/KnowledgeCentre/IndexofIMOResolutions/AssemblyDocuments/A.1046\(27\).pdf](https://www.wcdn.imo.org/localresources/en/KnowledgeCentre/IndexofIMOResolutions/AssemblyDocuments/A.1046(27).pdf) (дата обращения: 30.04.2024).
18. Площадь фигуры, ограниченная линиями online [Электронный ресурс]. — Режим доступа: <https://mrexam.ru/graph/area> (дата обращения: 30.04.2024).

REFERENCES

1. Vas'kov, Anatoliy S., and Aleksandr A. Mironenko. "Planning and control of the ship curvilinear route." *Vestnik Gosudarstvennogo universiteta morskogo i rechnogo flota imeni admirala S. O. Makarova* 15.3 (2023): 401–415. DOI: 10.21821/2309-5180-2023-15-3-401-415.
2. Deryabin, Victor V. "A model of vessel motion for dead reckoning." *Vestnik Gosudarstvennogo universiteta morskogo i rechnogo flota imeni admirala S. O. Makarova* 14.1 (2022): 17–24. DOI: 10.21821/2309-5180-2022-14-1-17-24.
3. Deryabin, Victor V. "Neural network based approach to a vessel's dead reckoning position fixing system construction." *Vestnik Gosudarstvennogo universiteta morskogo i rechnogo flota imeni admirala S. O. Makarova* 10.3 (2018): 469–476. DOI: 10.21821/2309-5180-2018-10-3-469-476.
4. Deryabin, Victor V. "Depth-based vessel position fixing by means of a neural network." *Vestnik Gosudarstvennogo universiteta morskogo i rechnogo flota imeni admirala S. O. Makarova* 16.1 (2024): 7–16. DOI: 10.21821/2309-5180-2024-16-1-7-16.
5. Yuyukin, Igor V. "Map-aiding of the additional secondary factors isosurface by the spline approximation method as a condition of improving the e-Loran observations accuracy." *Vestnik Gosudarstvennogo universiteta morskogo i rechnogo flota imeni admirala S. O. Makarova* 16.1 (2024): 37–54. DOI: 10.21821/2309-5180-2024-16-1-37-54.
6. Czaplewski, Krzysztof, and Bartosz Czaplewski. "The Concept of Using the Decision-Robustness Function in Integrated Navigation Systems." *Sensors* 22.16 (2022): 6157. DOI: 10.3390/s22166157.
7. Specht, Mariusz. "Determination of navigation system positioning accuracy using the reliability method based on real measurements." *Remote Sensing* 13.21 (2021): 4424. DOI: 10.3390/rs13214424.
8. Loginovsky, Vladimir A. "Assessment of ship position probability in the geometrical figure of position lines errors." *Vestnik Gosudarstvennogo universiteta morskogo i rechnogo flota imeni admirala S. O. Makarova* 15.2 (2023): 161–171. DOI: 10.21821/2309-5180-2023-15-2-161-171.
9. Nguyen, Thai Duong. "Evaluation of the accuracy of the ship location determined by GPS global positioning system on a given sea area." *Journal of Physics: Conference Series*. Vol. 1515. No. 4. IOP Publishing, 2020. DOI: 10.1088/1742-6596/1515/4/042010.
10. Specht, Mariusz. "Consistency of the empirical distributions of navigation positioning system errors with theoretical distributions — comparative analysis of the DGPS and EGNOS systems in the years 2006 and 2014." *Sensors* 21.1 (2020): 31. DOI: 10.3390/s21010031.
11. Zalewski, Paweł, Andrzej Bąk, and Michael Bergmann. "Evolution of Maritime GNSS and RNSS Performance Standards." *Remote Sensing* 14.21 (2022): 5291. DOI: 10.3390/rs14215291.
12. Filipowicz, Włodzimierz. "Mathematical theory of evidence in navigation." *Belief Functions: Theory and Applications: Third International Conference, BELIEF 2014, Oxford, UK, September 26–28, 2014. Proceedings* 3. Springer International Publishing, 2014. 199–208. DOI: 10.1007/978-3-319-11191-9_22.
13. Specht, Mariusz. "Statistical distribution analysis of navigation positioning system errors — issue of the empirical sample size." *Sensors* 20.24 (2020): 7144. DOI: 10.3390/s20247144.
14. Filipowicz, W. "Position fixing and its accuracy evaluation." *Zeszyty Naukowe/Akademia Morska w Szczecinie* 36(108) z. 1 (2013): 42–48.

15. Specht, Cezary, and Jacek Rudnicki. "A method for the assessing of reliability characteristics relevant to an assumed position-fixing accuracy in navigational positioning systems." *Polish Maritime Research* 23.3 (2016): 20–27. DOI: 10.1515/pomr-2016-0028.

16. Resolution A.915 (22). Revised maritime policy and requirements for a future global navigation satellite system (GNSS). Web. 30 Apr. 2024 <[https://wwwcdn.imo.org/localresources/en/KnowledgeCentre/IndexofIMOResolutions/AssemblyDocuments/A.915\(22\).pdf](https://wwwcdn.imo.org/localresources/en/KnowledgeCentre/IndexofIMOResolutions/AssemblyDocuments/A.915(22).pdf)>.

17. Resolution A.1046(27). Worldwide radionavigation system. Web. 30 Apr. 2024 <[https://wwwcdn.imo.org/localresources/en/KnowledgeCentre/IndexofIMOResolutions/AssemblyDocuments/A.1046\(27\).pdf](https://wwwcdn.imo.org/localresources/en/KnowledgeCentre/IndexofIMOResolutions/AssemblyDocuments/A.1046(27).pdf)>.

18. Ploshchad' figury, ogranichennaya liniyami online. Web. 30 Apr. 2024 <<https://mrexam.ru/graph/area>>.

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРЕ

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

INFORMATION ABOUT THE AUTHOR

Loginovsky, Vladimir A. —
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: loginovskijVA@gumrf.ru

Статья поступила в редакцию 14 апреля 2024 г.

Received: April 14, 2024.

DOI: 10.21821/2309-5180-2024-16-3-347-362

BOTTOM SEISMIC OBSERVATIONS AT SEA. PROBLEMS AND SOLUTIONS

D. A. Ilyinsky^{1,2}, O. Yu. Ganzha¹, A. A. Korneev²

¹ — P. P. Shirshov Institute of Oceanology of Russian Academy of Sciences,
Moscow, Russian Federation

² — Geovendor LLC, Moscow, Russian Federation

The seismic seabed observations, the current state of the issue and the ways of development of bottom seismic using robotic tools are considered in the paper. An overview of the current types of bottom seismic surveys and their division into two main types — deep-water and shallow-water works and works in land-sea transition zones (transit zones) is given. The main current technologies used in both sectors of the bottom works market are discussed. The bottlenecks and problems of each of the types of technologies used are considered. The technology of self-popup seismic nodes for use in deep and shallow water is presented in detail. The advantage of using this technology for the bottom part of hybrid marine seismic surveys in deep water is shown. Several variants of the prospects for the development of self-popup technology in deep water are presented. Among them, a new direction of seabed seismic exploration in deep water has been analyzed in detail. It consists in the design and use of a large number of Autonomous Underwater Vehicles (AUV), each of which is complemented by the ability to receive and record seismic bottom data. A new technology of robotic surveys based on the use of self-popup nodes without leaving anchor on the seabed and an unmanned autonomous surface vessel-platform has been proposed for the shallow-water sector. The model of the self-popup node without leaving the anchor on the seabed has been tested. An effective way of automatically node deployment to the seabed has been found and tested. Marine tests of the emersion of the proposed model of a self-popup seismic node without anchor using compressed air technology have been carried out. The problems of the proposed model are identified. After that a stable modified version of its emersion under all weather conditions has been found.

Keywords: seabed seismic observations, self-popup seismic nodes, unmanned robotic platform.

For citation:

Ilyinsky, Dmitry A., Oleg Yu. Ganzha, and Anton A. Korneev. "Bottom seismic observations at sea. Problems and solutions." *Vestnik Gosudarstvennogo universiteta morskogo i rechnogo flota imeni admirala S. O. Makarova* 16.3 (2024): 347–362. DOI: 10.21821/2309-5180-2024-16-3-347-362.

УДК 550.834.08

ДОННЫЕ СЕЙСМИЧЕСКИЕ НАБЛЮДЕНИЯ НА МОРЕ: ПРОБЛЕМЫ И МЕТОДЫ ИХ РЕШЕНИЯ

Д. А. Ильинский^{1,2}, О. Ю. Ганжа¹, А. А. Корнеев²

¹ — Федеральное государственное бюджетное учреждение науки «Институт океанологии им. П. П. Shirshova Российской академии наук», Москва, Российская Федерация

² — ООО «Геовендор», Москва, Российская Федерация

Статья посвящена сейсмическим донным наблюдениям на море, текущему состоянию данного вопроса и путям развития донной сейсморазведки с применением роботизированных средств. Выполнен обзор текущих видов донных сейсмических съемок и их подразделение на два основных вида: глубоководные работы и работы на мелкой воде и в переходных зонах суша – море (транзитных зонах). Показаны основные применяемые технологии донных работ и рассмотрены проблемы каждой из них. Подробно представлена технология работы с самовсплывающими станциями для применения на глубокой и мелкой воде. Показано преимущество применения этой технологии для донной части гибридных съемок на глубокой воде. Представлено несколько вариантов перспективы развития самовсплывающей станции на глубокой воде. Подробно проанализировано новое направление донной сейсморазведки на глубокой воде, состоящее в создании и применении большого количества автономных подводных дронов, каждый из которых дополнен возможностью приема и записи на дне сейсмических донных наблюдений. Для мелководного сектора донной сейсморазведки предложена

новая технология роботизированных съемок на основе использования безэкипажного судна-носителя самовсплывающих станций и автоматизированных самовсплывающих донных станций, работающих без оставления груза на дне. Проведены реальные морские испытания модели донной самовсплывающей станции без оставления груза на дне. Найден и испытан эффективный способ автоматической постановки станций на дно. Проведены морские испытания всплытия предложенной модели с использованием технологии сжатого воздуха. Выявлены проблемы предложенной модели и найден устойчивый модифицированный вариант ее всплытия при любых погодных условиях.

Ключевые слова: донные сейсмические наблюдения, самовсплывающая донная станция, беспилотная роботизированная платформа.

Для цитирования:

Ильинский Д. А. Донные сейсмические наблюдения на море: проблемы и методы их решения / Д. А. Ильинский, О. Ю. Ганжа, А. А. Корнеев // Вестник Государственного университета морского и речного флота имени адмирала С. О. Макарова. — 2024. — Т. 16. — № 3. — С. 347–362. DOI: 10.21821/2309-5180-2024-16-3-347-362.

Введение (Introduction)

Морские донные сейсмические наблюдения с каждым годом занимают все большее место в общем объеме морской сейсморазведки. Это связано не только с освоением месторождений в транзитных зонах, но и расположенных на больших глубинах, достигающих до 3 км и более. Причиной этого являются фундаментальные геофизические преимущества донной съемки по сравнению с технологией буксируемых кос гидрофонов [1], [2]. Недропользователям с каждым годом необходима все более точная и качественная информация о строении подземных недр в море и положении искоемых залежей углеводородов (УВ). Донные наблюдения также помогают решать фундаментальные вопросы происхождения и образования УВ[1].

Существующие технологии донной сейсморазведки, несмотря на их прогрессивное развитие, требуют значительных трудозатрат и постоянного присутствия большого количества высокопрофессиональных специалистов, что предполагает помимо выплаты им заработной платы создание комфортной инфраструктуры для работы и проживания, а также ужесточает требования по безопасности, устанавливая необходимость периодической смены сейсмической партии. В результате размер судов, а, следовательно, и стоимость работ растут. Поэтому приоритетным направлением является развитие роботизированных технологий, требующих минимального количества людей на исследовательских судах.

Традиционно донные сейсмические съемки подразделяются на *глубоководные* с глубиной воды более 500 м, *мелководные* и *транзитные* (переходные зоны суша – море). Это связано с наиболее распространенной технологией их проведения — *технологией буксируемых кос*, состоящих из групп соединенных между собой отдельных гидрофонов, образующих один сейсмический канал. При отсутствии возможности применения буксируемых кос в промышленности были вынуждены использовать различные донные технологии регистрации сейсмических сигналов: от донных кос (вариант тех же буксируемых кос, но изготовленных в донном подводном варианте) до отдельных автономных донных станций.

В настоящее время технологии использования донных регистраторов занимают все больше места в общем объеме сейсморазведочных работ на мелководье. Это связано, прежде всего, с простотой их использования и надежностью работы электроники и датчиков, легкой масштабируемостью, которая позволяет использовать данную технологию для одновременной регистрации очень большого количества приемных каналов. Более того, популярность автономной регистрации привела к возможности использования ее на суше, где конструкция каждого автономного модуля еще проще и дешевле, а количество каналов технически ничем не ограничено.

В последние двадцать лет появился новый вид донных наблюдений, так называемые *гибридные съемки*, когда вместе с буксируемыми косами используются одновременно расставленные на дне донные сейсмические станции в варианте 2Д [2] и 3Д [3] сейсмических съемок. Целью таких донных наблюдений является получение детальной глубинной скоростной модели среды,

используемой при последующей обработке данных, полученных с буксируемых кос для улучшения качества сейсмического изображений, особенно в трудных местах и на больших глубинах. Кроме того, скоростные разрезы в продольных и поперечных волнах имеют также самостоятельную ценность для геологической интерпретации. При этом используется *метод полноволновой инверсии* для получения скоростного разреза, который служит для улучшения изображения, полученного по данным многокосовой съемки. Результатом гибридной съемки может быть ясное изображение подсолевых структур, как это показано при стрельбе многокосового судна на сетке 50×100 м [3] в Мексиканском заливе.

Прототипом гибридной съемки является отечественный способ наблюдений отраженных и преломленных волн одновременно, впервые примененный в Прикаспийской впадине. Геологической задачей состояла в поиске в подсолевом разрезе карбонатных тел сравнительно небольших размеров, перспективных для поиска нефти и газа. При невысокой пластовой скорости подсолевого комплекса пород, составляющей около 4,0 км/с, можно было предположить, что в исследуемом районе он представлен в основном терригенными отложениями. Скоростные модели, полученные по данным отраженных и преломленных волн, были использованы для построения глубинных изображений на основе данных МОВОГТ (метод отраженных волн общей глубинной точки) [4].

Целью статьи является обоснование эффективности использования технологии самовсплывания на основе анализа современного опыта донных сейсмических работ и его перспектив развития для морских сейсмических донных работ. Предложена новая технология роботизированных съемок на основе использования безэкипажного судна-носителя самовсплывающих станций и автоматизированных самовсплывающих донных станций, работающих без оставления груза на дне. На основе выполненного исследования были проведены реальные морские испытания модели донной самовсплывающей станции без оставления груза на дне.

Методы и материалы (Methods and Materials)

Первый опыт применения глубоководных донных технологий. Донные сейсмические работы на глубокой воде начинались с применения самовсплывающих сейсмических донных станций. По этой технологии сейсмические донные станции в свободном падении погружаются на дно, а затем после выполнения программы записи данных вызываются по гидроакустическому каналу на всплытие с обслуживающего судна. Каждая станция имеет уникальный код всплытия, позволяющий контролировать этот процесс и сбор информации о всплытии станций с поверхности моря. Именно с помощью данной технологии была выполнена первая в мире трехмерная глубоководная съемка в 2001 г. на месторождении *Tunder Horse* в Мексиканском заливе [5] компанией *GeoPro GmbH* по заказу *British Petroleum*. В то время еще не были решены две основные проблемы самовсплывающей технологии: первая проблема — точность попадания станции в запланированную точку на дне (при глубине 3 км современные тендеры на проведение донных сейсмических съемок требуют попадания станции в круг диаметром 25 м), вторая проблема, связанная с экологией: самовсплывающая станция оставляет на дне якорь-груз. Согласно требованиям экологов, после проведения сейсмической донной съемки дно моря должно оставаться нетронутым. Данное требование остается актуальным несмотря на то, что после аварии на нефтяной платформе *Deepwater Horizon* на месторождении *Макондо* в 2010 г. в Мексиканский залив вылилось около 5 млн баррелей нефти и образовавшееся в результате этого нефтяное пятно достигло площади 75 тыс. км², что составляет около 5 % площади Мексиканского залива.

Донные съемки с помощью управляемых подводных роботов. Важным этапом в развитии сейсмических донных технологий на морском дне, ставшим в последующие два десятилетия ее основным трендом, являлось применение глубоководных дистанционно управляемых роботов (ROV). Схема работ с применением роботов представлена на рис. 1, в левой части которого показано судно-носитель источника сейсмических сигналов, справа — судно, обслуживающее донные станции с двумя подводными роботами-установщиками [6]. Аппараты ROV были разработаны в 1970-х гг. для работы в условиях экстремальных давлений и низких температур. Кроме того,

подводный ROV имеет в своем составе контейнер, в котором расположены донные станции в количестве 30–40 шт. в зависимости от вида ROV.

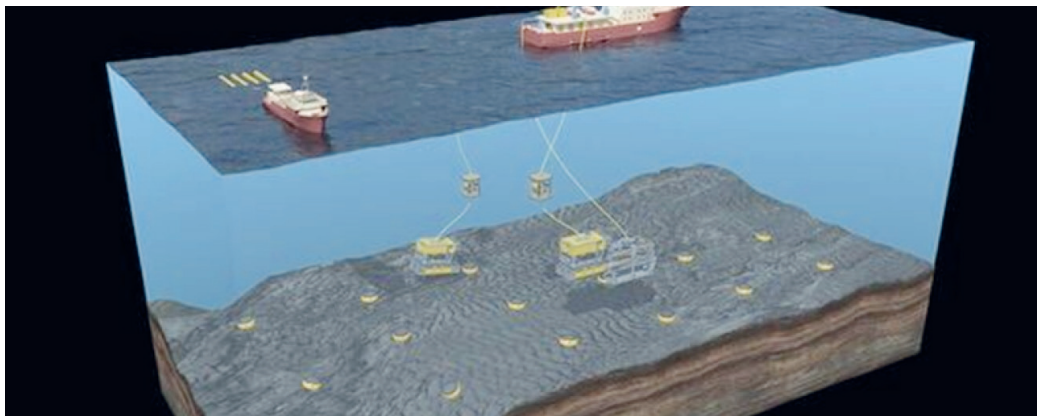


Рис. 1. Современная технология установки / снятия донных сейсмических станций с помощью двух подводных роботов для ускорения процесса сейсмической съемки [6])

Fig. 1. Modern technology of installation/removal of seabed seismic stations using two underwater robots to speed up the seismic survey process [6]

Подводный робот имеет гидроакустическую систему позиционирования относительно несущего судна с точностью определения положения, равной 1 промилле (0,001) от наклонной дальности до ROV со станциями. Впервые такая система сейсмической съемки была применена компанией *Fairfield* по заказу *British Petroleum* в 2006 г. на месторождении *Atlantis* в Мексиканском заливе [7] на глубине 2200 м. Процесс постановки станций на дно, а также их подъема при общем количестве станций в одной постановке порядка 1000 шт. занимает значительное время и требует больших материальных затрат. Для сравнения стоимость съемки с применением донных самовсплывающих сейсмических станций в 8 раз меньше при тех же параметрах съемки.

Прогресс самовсплывающей технологии. С целью преодоления экологических ограничений в 2012–2014 гг. российская компания «Геонод разведка» создала новое поколение донных сейсмических станций, имеющих ряд уникальных свойств, одним из которых является создание экологически чистого якоря-груза, который распадается на составляющие морского дна после проведения геофизических работ, не нанося вреда окружающей среде [8]. Было получено два российских патента на состав якоря и его конфигурацию. Компании удалось создать парк станций и выполнить с ним ряд проектов как в Российской Федерации, так и за рубежом [9]–[11]. Другое решение этой проблемы рассмотрено далее в при исследовании технологий самовсплывающих станций для мелководья в транзитных зонах, а именно рассмотрена конструкция станций без груза на основе двух известных технологий подъема затонувших объектов со дна моря.

Проблема точной постановки станций на дно. Изучение проблемы точной установки донных станций на дно и ее влияния на качество получаемого сейсмического изображения не были изучены с помощью использования математического моделирования даже в упрощенной постановке. Математическое моделирование было проведено только в целях изучения влияния на результат плотности установки донных станций на регулярной сетке перед проведением пионерской 3Д-донной съемки в 2006 г. [12]. Для трехмерного моделирования использовалось простое волновое уравнение, что справедливо для модели жидких слоев со скоростями продольных волн как в донных осадках, но без поперечных волн. Такой подход может быть применен к реальным донным сейсмическим данным, когда полученные записи с помощью хорошо разработанных современных процедур очищены от всех поперечных и обменных волн. Такие очищенные синтетические данные для ожидаемой модели среды (с соляным куполом) были рассчитаны для каждой точки приема (сейсмограммы общей точки приема) при различных регулярных расстояниях между донными станциями. После этого полученные данные обрабатывались по выбранному

графу, в результате чего получался итоговый куб изображения среды для каждого интервала расстановки станций на дне. По результатам сравнения полученных синтетических изображений с исходной моделью был выбран оптимальный интервал расстановки донных станций на дне — донные станции должны были находиться на регулярной сетке с интервалом 450 м между станциями в обоих горизонтальных направлениях.

Аналогичное моделирование необходимо осуществить для исследования влияния отклонения реального положения станций на дне. Например, рассмотрим экспериментальные данные отклонений донного положения станций от поверхностного в месте сброса, при проведении сейсмических съемок в условиях свободного падения станций на дно. Возможно, что даже большие отклонения станций, вплоть до половины заданного регулярного интервала установки станций, не окажут никакого влияния на итоговое качество восстановленного синтетического изображения. В результате проведенного исследования будут выработаны статистические критерии допустимости для таких отклонений. Значительным препятствием на пути реализации подобного проекта является большой объем вычислений. Выполнение трехмерной задачи для решения волнового уравнения методом конечных разностей для 10 000 излучений на кластере производительностью 10 Терафлоп потребовало двадцати дней [13]. Для сокращения времени выполнения этой задачи можно воспользоваться разумными упрощениями модели, которые значительно сокращают время вычислений, не оказывая влияния на результат исследования нерегулярности интервалов постановки станций на дне. Например, использовать осесимметричную модель соли и примыкающих к ней слоев, а также гибридную схему вычислений — конечно-разностную схему в окрестности солевого тела, «сшивая» затем это решение с более простым для плоскопараллельных слоев, окружающих соль. При таком подходе можно использовать также полную систему уравнений теории упругости и получать более реалистичные волновые поля, попутно проверяя и тестируя процедуры очистки записей от поперечных и обменных волн.

4Д-донные съемки. Существует еще одна разновидность донной съемки, где особенно важной является точность установки донных регистраторов на дно — **4Д-сейсмические съемки** или повторные 3Д-съемки через определенный интервал времени для мониторинга добычи углеводородов. Разность трехмерных изображений в разные моменты времени одного и того же места образует так называемый **4Д-сигнал**, позволяя следить за выработкой месторождения. Поскольку 4Д-сигнал достаточно мал, точное повторение условий получения данных может гарантировать положительный результат.

«Веревочная» технология донной съемки. Проблема относительной неточности достижения донной станцией на дне заранее запланированной точки (*preplot*), согласно плану проведения сейсмической съемки, актуальна не только для самовсплывающих станций, но и при использовании технологий постановки станции на дно с помощью прочного фала или троса. Этот способ проведения работ впервые был предложен компанией *Fairfield* после проведения пилотного проекта с донными станциями, устанавливаемыми на дно подводными роботами. Стоимость первой съемки с *ROV* была столь велика, что компания начала искать другие способы постановки станций на дно. При работе с «веревочной» технологией сначала веревка-фал с грузом выбрасывается за корму на ходу судна, затем при движении судна донные станции через равномерные интервалы (50 м или 25 м) подцепляются к ведущему фалу, один конец которого уже опущен с грузом на дно, и таким образом увлекаются на дно. Работа такой системы требует сноровки, и любая задержка при прикреплении станции к фалу чревата риском порвать или запутать основную веревку, а вероятность и возможность приблизить положение станций на дне к запланированной позиции гораздо ниже, чем при использовании самовсплывающей технологии. Очевидно, что с ростом глубины точность укладки станций на дно снижается, поэтому данная технология применяется в настоящее время в мелководных проектах и транзитных зонах.

Ряд компаний (*FairField Nodal*, *MagSeis*, *inApril*) предприняли попытки автоматизировать технологию постановки донных станций на фале и работать в глубоководном секторе донного рынка. Они создали автоматизированные системы крепления станций к тросу при постановке

и снятии с троса при подъеме станций со дна. После подъема на борт судна и отцепления от троса станции попадают на транспортный конвейер внутри судна для доставки к месту копирования данных и подзарядки. Там робот вставляет разъем в каждый донный модуль, а затем отсоединяет разъем, ставит готовый модуль на конвейер и транспортирует его к месту сцепления с тросом для последующей постановки на дно. Данная система является громоздкой и требует наличия специализированного судна-носителя, к тому же «веревочная» технология на средней и глубокой воде не обеспечивает требуемой точности постановки. Несмотря на это компании с автоматизированной «веревочной» технологией получили достаточное количество проектов на средней и глубокой воде (до 3000 м) для их выживания и возврата вложенных инвестиций на разработку и производство необходимого количества оборудования.

Проблема неточной установки станций на дно решалась количественным путем благодаря автоматизации работы со станциями, где их количество может достигать 10 000 ед. при установке с одного судна. Такое количество станций можно установить на дне в 1,5–2 раза плотнее требуемого по геологическому заданию, в этом случае проблема неточной установки их на дне отпадет сама собой. В Российской Федерации упрощенная «веревочная» технология была реализована в 2017–2018 гг. в рамках межотраслевой государственной программы по импортозамещению, организованной Министерством промышленности и торговли РФ и АО «ГазПромНефть» [14]–[16]. Эта система не предусматривает автоматизированную систему крепления станций к тросу при постановке и снятии их с троса, а также систему автоматизированной доставки станций к месту считывания данных на судне и их обслуживания после каждой постановки на дно. Отсутствие автоматизации позволяет применять эту систему на предельном мелководье с выходом на сушу. Сервисная компания АО «Морская арктическая геологоразведочная экспедиция» (МАГЭ) успешно использует данное оборудование для проведения донных сейсмических работ [17].

Опытные испытания и результаты (Pilot Tests and Results)

Новая проектная технология донных съемок с помощью подводных дронов. Новой концепцией в донной сейсморазведке является использование подводных автономных аппаратов-дронов (AUV), у которых появляется дополнительная функция носителя сейсмических датчиков и системы записи данных. В идеале каждый подводный дрон с донной станцией на борту, самостоятельно достигая нужной точки на дне, производит необходимую запись сейсмического источника. После того как текущая активная расстановка дронов-станций приняла все положенные по плану излучения от сейсмического источника, они перемещаются на новые точки на дне, согласно плану съемки, и далее до выполнения всего объема работ. Количество участвующих дронов-станций и их программа перемещения позволяют не делать перерывы в работе излучающего судна. Такой подход позволяет для донной сейсмической съемки достичь производительности многокосового судна и открыть широкий рынок морских работ. При этом стоимость съемки будет меньше, чем у многокосового судов, так как для работы со станциями-дронами подходит практически любое судно. Ряд компаний уже получили гранты от нефтяных компаний для создания первых прототипов таких дронов-станций¹, но этой технологии [18] помимо технологических вызовов, предстоит преодолеть также психологический барьер, как это было при массовом внедрении автономной регистрации. В описанной схеме со станциями-дронами отсутствует реальная возможность проверки записи на всех станциях до тех пор, пока полностью не закончена работа над проектом. Конечно, можно использовать выборочно гидроакустическую связь для контроля статуса дрона-станции на дне, но в силу большого количества дронов-станций и ограничений по энергии и полосе пропускания гидроакустики по сравнению с объемом сейсмических данных такой подход имеет определенные ограничения.

В качестве примера дрона-станции рассмотрим концепцию норвежской компании *iDROP Oceano* [18], [19]. Дрон-станция, которая опускается на дно под действием силы тяжести, имеет

¹ <https://www.upstreamonline.com/hc-technology/dipping-into-the-seabed-acquisition-market/1-1-1011999> Andrew McBarnet. Dipping into the seabed acquisition market // Upstream Online. 2016.

форму ракеты с управляющими хвостовыми плавниками (рис. 2), управляющими падением в горизонтальной плоскости, обеспечивая падение в планируемую точку на дне. Дрон использует портативную инерциальную навигационную систему. Для изменения плавучести используется сжатый воздух, находящийся в камере и ресивере. Данный вид дронов имеет практически нейтральную плавучесть, поэтому приходится применять отделяемый и потом вновь присоединяемый относительно тяжелый контейнер с сейсмическими датчиками для обеспечения хорошего сцепления сейсмоприемников с грунтом, что значительно усложняет и приводит к увеличению стоимости каждого дрона-станции.

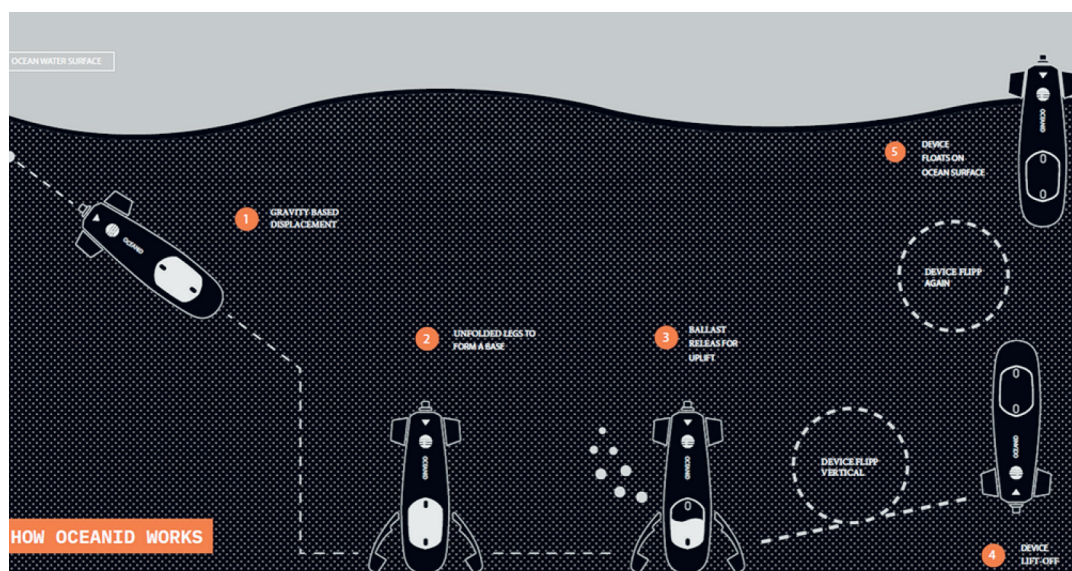


Рис. 2. Технология работы донной станции-дрона: общий вид прототипа во время падения станции на дно и во время записи данных на дне
(Источник заимствования Сайт компании iDrop.no)

Fig. 2. Technology of a bottom station-drone operation: general view of the prototype during the station fall to the bottom and while recording data at the bottom
(Borrowing source is Company website iDrop.no)

Прогресс самовсплывающих технологий. Для решения задачи постановки донной станции на дно в точку с заданной точностью технологию самовсплывающей станции можно усовершенствовать. Для этого существует два пути: первый — с использованием станции-дрона, второй — постановка станции с помощью подводных роботов. В том и другом случае эти решения являются наименее затратными и позволяют экономить значительное время для проведения сейсмической съемки.

Управляемое падение станции на дно. Для обеспечения достижения нужного положения на дне в данном исследовании предлагается использование уже хорошо себя зарекомендовавшей самовсплывающей донной станции с экологическим грузом. Необходимо сделать не дрон, несущий донную станцию, а донную станцию с небольшими дополнениями от конструкции дрона, оснатив ее хвостовым оперением-рулями, которые будут контролировать движение станции в горизонтальной плоскости при ее падении на дно. Вместо инерциальной системы навигации используем отечественную систему подводного позиционирования¹. Эта система использует четыре навигационных буя, которые непрерывно передают по гидроакустике сигналы со своим местоположением, полученные по обычному каналу и сигналы для измерения расстояния от объекта до них. Каждый объект, определяющий свои координаты, использует приемный трансдьюсер в пассивном режиме (важно при проведении длительной сейсмической

¹ <https://www.unavlab.com/o-nas/articles/podvodnyj-gps-na-teleupravljajemom-neobitaemom-podvodnom-apparate-opyt-ispolzovaniya/> Подводный GPS на телеуправляемом обитаемом подводном аппарате: опыт использования.

съемки, так как при этом не затрачивается энергия на передачу гидроакустических импульсов) связи с контроллером, определяющим его координаты в толще воды. Система может обслуживать неограниченное число объектов подводной навигации в силу принципа своей архитектуры. В глубоководной ситуации на море (3 км глубины и более) вместо буйев можно использовать волновые глайдеры с тем же оборудованием.

Буксируемый подводный планер над дном для постановки станций. Другой возможностью увеличения производительности донных сейсмических работ на глубокой воде является некоторая модификация подхода, связанного с применением ROV. Судно-установщик станций буксирует цилиндр-носитель с нейтральной плавучестью (ЦННП), на котором установлены два подруливающих устройства, обеспечивающих прохождение ЦННП по запланированной траектории установки станций с точностью ± 5 м. На переднем и заднем концах ЦННП установлены гидроакустические маяки-ответчики, определяющие с помощью навигации с ультракороткой базой (USBL) положение ЦННП относительно буксирующего судна, т. е. в абсолютных координатах. ЦННП буксируется на глубине 50 м ± 20 м от поверхности дна.

На ЦННП установлен эхолот и датчик глубины. При достижении очередной точки постановки с нужной точностью открывается магнитный захват, удерживающий петлю, расположенную на станции, и она падает на дно в нужное место. При достижении следующей точки постановки освобождается следующая станция и т. д. По буксирующему ЦННП кабель-тросу станции спускаются с судна. Преимущество данной технологии заключается в следующем: быстрая постановка станций на дно со скоростью до 5 уз, быстрый их подъем со дна за счет самовсплывания, а также существенное сокращение времени и стоимости выполняемых работ за счет одновременного использования большего количества станций.

Самовсплывающая технология для гибридных съемок. При проведении гибридных съемок расстояние между станциями обычно составляет 1–1,5 км и проблема точной установки на дне станций не является актуальной даже при глубине моря до 3 км. Поэтому оптимальной для этого является технология самовсплывающих станций. При работах в Индийском океане среднестатистические отклонения от точки сброса не превышали ± 50 м [20]. Использование технологии самовсплывающих станций для этого вида съемок практически не добавляют дополнительных затрат.

Сейсмические работы на мелкой воде и в транзитных зонах (Seismic work on shallow water and in transit zones)

Несмотря на важность глубоководных донных сейсмических работ наиболее массовым применением донных сейсмических станций по-прежнему являются работы на мелкой воде и в транзитных (суша – море) зонах, поскольку по-другому в этих условиях проводить работы нельзя.

Выполним анализ данного вида работ. Для сейсмической разведки в транзитной зоне (глубины воды 0–20 м) на шельфе необходимо найти эффективное решение для ее автоматизации и безопасного проведения. Существующие в настоящее время решения предусматривают использование большого объема небезопасного ручного труда, требуют продолжительного времени проведения работ, привлечения большого количества человеческих ресурсов и плавучих средств, а также подвергают риску жизнь персонала при проведении работ. Гибель двух человек при проведении сейсмической 3Д разведки в 2017 г. в транзитной зоне на лицензионном участке «Газпрома» в северо-западной части полуострова Ямал, является подтверждением этого.

Снижение стоимости углеводородов на мировых рынках также предъявляет новые требования к эффективному расходованию средств на все циклы производства УВ и в частности необходимо искать пути снижения затрат на проведение масштабных трехмерных сейсмических работ в транзитной зоне. Предлагаемый в работе проект направлен на решение и этой актуальной задачи.

В связи с освоением Северного морского пути произойдет развитие прибрежной инфраструктуры для его обслуживания. Для оценки рисков сейсмической, геологической и техногенной опасности необходимо проведение инженерно-геологических изысканий предстоящего проекта. Наиболее эффективным методом оценки материального состава грунтов являются активные / пас-

сивные сейсмические измерения на дне для определения скорости поперечных волн. В отличие от разведки УВ бюджет на проведение инженерно-геологических работ и длительных сейсмологических наблюдений для оценки сейсмической опасности обычно на порядок ниже, поэтому нужны недорогие донные сейсмические инструменты с автоматизированной технологией их применения.

Специалисты ИО РАН при участии компании «ГЕОВЕНДОР» предложили инновационное решение для решения проблемы автоматизации донных сейсмических съемок на мелководье. Основным элементом этой системы должна стать самовсплывающая станция, обладающая рядом специальных свойств, которые сделают возможным применение роботизированных плавучих платформ. Новая донная станция должна быть компактной самовсплывающей четырехкомпонентной и работать без оставления груза на дне, имея возможность в автономном режиме много раз погружаться на дно и возвращаться к поверхности моря. Для многократного всплытия без оставления груза на дне используется технология работы со сжатым воздухом под водой, которая сейчас широко применяется ныряльщиками.

На этапе реализации проекта автоматизации мелководной съемки предлагается разработать надводные роботизированные платформы для сбора самовсплывающей донной станции без оставления груза, использующие технологию сжатого воздуха (рис. 3). Роботизированные платформы работают без участия или с минимальным участием (на начальном этапе) персонала, что автоматически приведет к значительному снижению затрат на сейсмические работы, увеличит скорость проведения работ и значительно повысит безопасность и безаварийность работ для участвующего в них персонала.

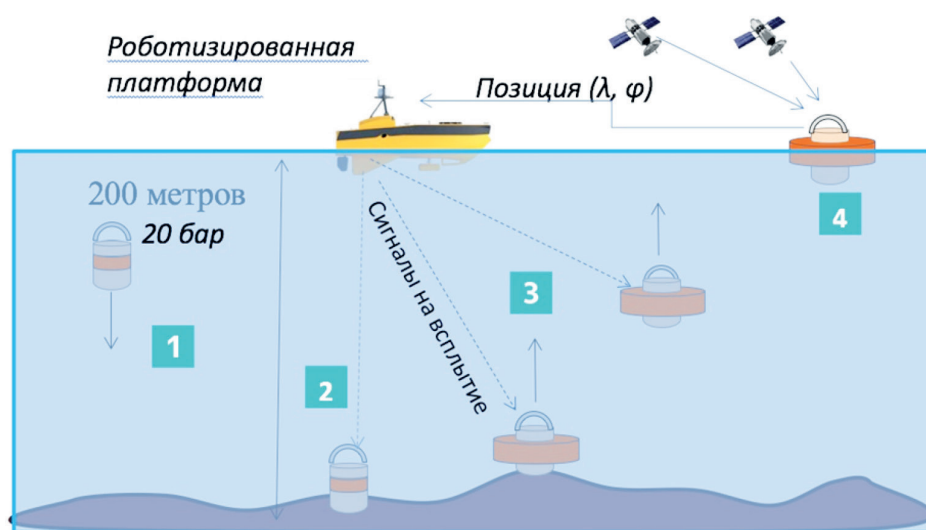


Рис. 3. Схема работы роботизированной платформы с самовсплывающей донной станцией без оставления груза
Fig. 3. Scheme of a robotic platform operation with a self-popup bottom station without leaving a load

Донные станции сначала устанавливаются на дно с роботизированной платформы в режиме свободного падения (позиция 1 на рис. 3). При постановке на дно станция со сжатым плавучим мешком (без воздуха) падает на дно. После того как все станции, согласно плану съемки, установлены на дно, их местоположение проверено по гидроакустическому каналу и они приняли все необходимые излучения от сейсмического источника, мобильная платформа начинает сбор станции со дна. Вначале она посылает сигналы на всплытие (позиция 2 на рис. 3) станции после приема соответствующих кодированных посылок, затем надувает мешок и станция начинает всплывать (позиция 3 на рис. 3). При достижении поверхности моря станция получает сигналы ГЛОНАСС, синхронизирует свои часы и получает каждую секунду свои координаты, которые по радиоканалу передает на плавучую платформу. При получении сигналов с координатами станции мобильная

роботизированная платформа автоматически наводится на всплывшую станцию, поднимает ее к себе на борт с помощью манипулятора, где станция по беспроводному высокоскоростному интерфейсу передает записанные данные. Плавающий мешок при этом сдувается, и станция вновь готова к погружению в новую точку на дне согласно плану выполнения работ.

Беспилотные платформы для работы с самовсплывающими станциями без оставления груза на дне транспортируются к месту съемки судном-носителем, на котором находится сейсмический источник, а также сосредоточено управление проектом, прием и контроль качества сейсмических данных, получаемых с роботизированных носителей.

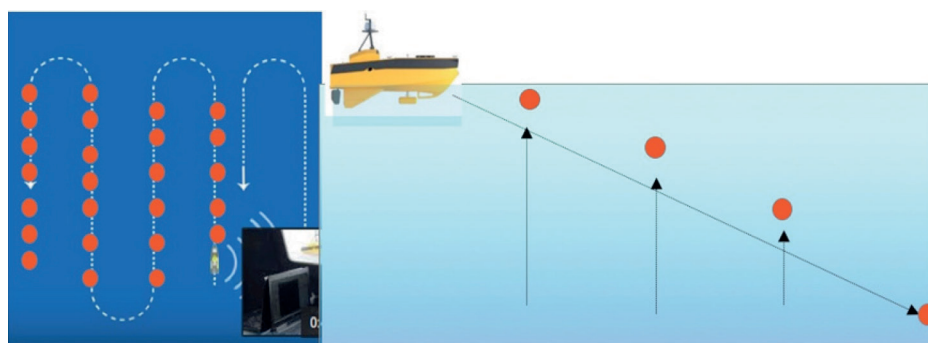


Рис. 4. Сбор станций со дна беспилотной платформой
Fig. 4. Gathering of stations from the bottom by an unmanned platform

На рис. 4, в его левой части, показан путь беспилотной платформы при сборе станций, в нижнем правом углу выделен терминал контролирующей системы на управляющем съемкой судне. Справа на этом рисунке показан последовательный процесс подъема станций со дна моря: станции вызываются на всплытие со дна с некоторой задержкой, позволяющей последовательно их собирать с поверхности моря по мере всплытия.

Испытания модели корпуса для самовсплывающей станции без груза. При создании новой самовсплывающей станции без оставления груза на дне выбрана следующая концепция корпуса (рис. 5): станция должна состоять из двух оболочек. Внутренний корпус является водонепроницаемым (коричневый внутри синего цилиндра на рис. 5, а), установлен на жестком основании, в которое вставлены два баллона сжатого воздуха высокого давления (300 бар), объемом по 1 л каждый. Внешняя оболочка крепится к внутреннему корпусу, представляя собой открытый книзу пластиковый цилиндр. Модель такого корпуса, приведенная на рис. 5, б, использовалась для дальнейшего тестирования процесса всплытия станции со дна. Выбор предложенной конструкции самовсплывающей станции без оставления груза на дне обусловлен попыткой сделать постановку и подъем донной станции максимально простым и автоматизированным. С внешней стороны при этом станция выглядит как простой цилиндр с крышкой, выполненный из тонкого прочного пластика. Все рабочие части, такие как прочный корпус, баллоны сжатого воздуха, воздушная арматура, сейсмический гидрофон и гидроакустический трансдьюсер, находятся внутри внешнего корпуса и защищены от случайных внешних воздействий при транспортировке и эксплуатации станции.

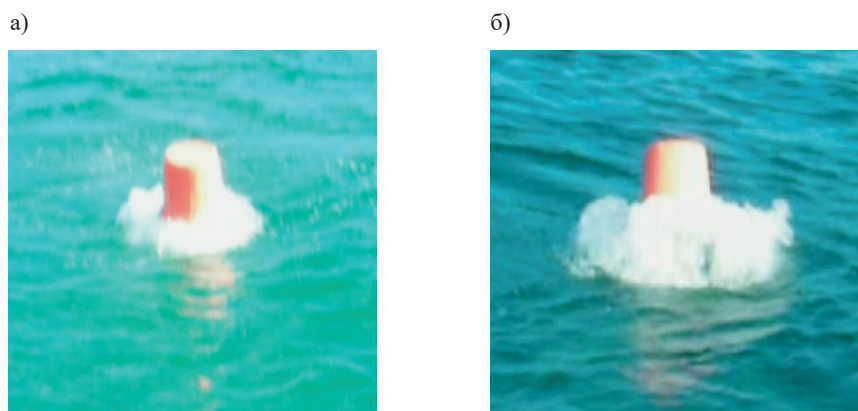
Процесс постановки станции на дно представляет собой скатывание по наклонному желобу, который опускается с борта судна в воду. Станция скатывается по этому желобу в воду, где она должна набрать воду и опуститься на дно. Процесс скатывания станции по направляющим с борта судна занимает одно и то же время, поэтому можно использовать одинаковое упреждение по времени перед достижением точки сброса, корректируя его в зависимости от вариации скорости несущего судна (рис. 5, в). Был выполнен ряд натурных испытаний на модели донной станции для проверки процесса погружения станции на дно и конструкции направляющего желоба. В результате проведения испытаний оказалось, что для надежного погружения станции на дно недостаточно наличия направляющих без верхних ограничителей. Иногда станция не успевает набрать достаточное количество воды между внешним и внутренним корпусом и в течение длительного про-

межутка времени остается на плаву. Только после того, как конструкция желоба была дополнена верхними ограничивающими направляющими, станция смогла надежно набирать воду и уходить на дно в течение одного и то же периода времени при фиксированном наклоне направляющего желоба и его длины в воде.



Рис. 5. Концепция донной станции без оставления груза на дне (а), ее модель, выполненная из пластикового ведра и груза (вид сверху) (б), графический вид метода погружения станции на дно (в)
Fig. 5. The concept of a bottom station without leaving a load at the bottom (a), its model made of a plastic bucket and a load (top view) (b), a graphical view of the method of immersing the station to the bottom (c)

Далее были проведены испытания работы модели станции при всплытии ее со дна моря. Модель опускалась на дно на глубину 10 и 20 м (рис. 6). Затем водолазы добавляли сжатый воздух в пространство между внешним и внутренним корпусом, после чего станция начинала всплывать. Это действие водолазов имитировало штатный процесс всплытия станции со дна, когда она по гидроакустической команде открывает воздушный клапан на определенное время и выпускает сжатый воздух из баллонов в пространство между внутренним и внешним корпусами и станция за счет вытесненного объема воды начинает всплывать. Весь процесс на дне и на поверхности моря был зафиксирован видеосъемкой для того чтобы понять, насколько устойчиво происходят процессы всплытия станции и дальнейшего ее нахождения на поверхности моря. Испытания проводились на базе Южного отделения института океанологии им. П. П. Ширшова РАН, г. Геленджик. Было проведено три серии испытаний с перерывом в несколько недель.



*Рис. 6. Выброс воздуха при всплытии модели станции:
а — после всплытия с глубины 10 м; б — после всплытия с глубины 20 м*
*Fig. 6. Air release during emersion of the station model:
a — (on the left) after emersion from a depth of 10 m; b — after emersion from a depth of 20 m*

В результате проведенных испытаний был выявлен ряд недостатков, устранением которых специалисты Института океанологии занимаются в рабочем порядке. Одним из них является воздействие

на корпус станции воздуха под давлением, в результате которого станция выпрыгивает из воды, теряя в этот момент основные излишки воздуха, равные его объемному расширению из-за разницы давлений на дне и на поверхности.

Прыжок из воды данной конструкции станции с открытым корпусом иногда приводит к ее падению набок, в результате чего станция набирает воду и уходит на дно, откуда ее надо опять вызывать по акустике, расходуя непроизводительно запас сжатого воздуха из баллонов, который используется для следующих циклов погружения / всплытия. Иллюстрацией эффекта прыжка служат отдельные видеокadres (рис. 6, а), сделанные в момент наибольшего выброса воздуха. Накопленный за время всплытия воздух с избыточным давлением выходит в последний момент всплытия. При всплытии с глубины 20 м объем выброшенного воздуха в два раза больше, чем с глубины 10 м (рис. 6, б). Для устойчивой работы станции необходим плавный выход станции из воды, чтобы она устойчиво оставалась на поверхности воды до того момента, пока ее не подберет на борт плавучая платформа. Проблема смягчения прыжка станции при выходе из воды была решена увеличением количества отверстий на внешней оболочке станции. Следующей модификацией было предусмотрено использование водолазного клапана сброса излишнего давления, вмонтированного в верхнюю поверхность внешнего корпуса. Это еще более замедлило «прыжок» донной станции при выходе ее на поверхность (рис. 7) и обеспечило стабильное поведение станции после всплытия на поверхность воды.

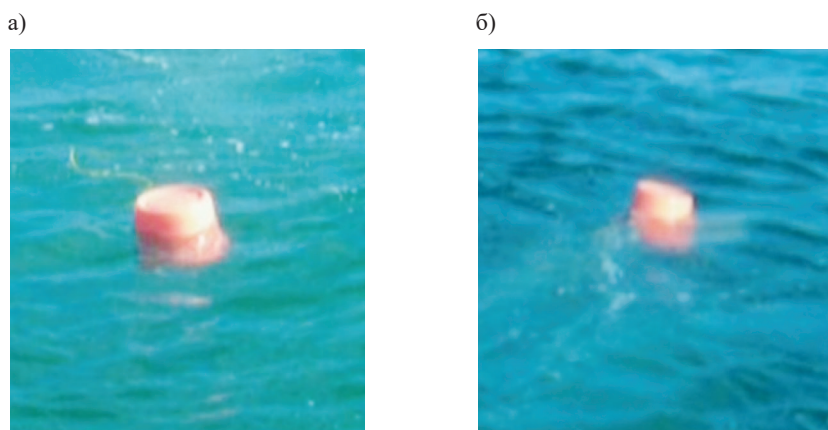


Рис. 7. Устойчивое положение модели после сброса лишнего воздуха:

а — с глубины 10 м; б — с глубины 20 м

Fig. 7. Stable position of the model after releasing excess air:

а — from a depth of 10 m; б — from a depth of 20 m

Таким образом, после проведения морских испытаний модели донной самовсплывающей станции без оставления груза на дне был найден эффективный способ автоматической постановки станций на дно. Проведены морские испытания всплытия предложенной модели самовсплывающей станции без оставления груза на дне с использованием технологии сжатого воздуха. Выявлены проблемы предложенной модели, после чего найден устойчивый модифицированный вариант ее всплытия при любых погодных условиях.

Выводы (Summary)

В результате проведенного исследования можно сделать следующие выводы:

1. Рассмотрены проблемы автоматизации проведения донных сейсмических съемок на глубокой и мелкой воде.
2. Показано, что технологии, построенные на базе самовсплывающих сейсмических донных станций, имеют существенное преимущество при проведении донной составляющей гибридных съемок.
3. Рассмотрено несколько альтернативных методов автоматизации 3Д сейсмической донной съемки на глубокой воде и сопутствующие им проблемы.

4. Предложена новая концепция автоматизации мелководных сейсмических съемок на основе использования самовсплывающих станций без оставления груза на дне и беспилотного автономного надводного судна-платформы

5. В результате проведенных испытаний предложенной модели донной сейсмической станции найден легкий и стабильный способ ее постановки на дно с помощью направляющего желоба особой конструкции.

6. Проведены испытания по всплытию модели новой донной станции с глубин 10 м и 20 м. В результате выявлена ограниченность применения внешнего корпуса с открытым контуром. Дальнейшее усовершенствование конструкции приводит к использованию закрытой камеры всплытия (например, вложенного торообразного мешка всплытия между внешним и внутренним корпусом с клапаном сброса излишнего давления). Это решение является наиболее оптимальным для нахождения всплывшей станции на поверхности моря и не зависит от погодных условий (высоты волн).

Финансирование

Исследование выполнено в рамках Государственного задания Института океанологии им. П. П. Ширшова РАН (тема № FMWE-2024–0026).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Ильинский Д. А. Геофизические технологии для изучения процессов образования глубинной нефти / Д. А. Ильинский, К. А. Рогинский, О. Ю. Ганжа // Вестник Государственного университета морского и речного флота имени адмирала С. О. Макарова. — 2018. — Т. 10. — № 5. — С. 936–950. DOI: 10.21821/2309-5180-2018-10-5-936-950.

2. Górszczyk A. Regional-scale FWI of wide-angle OBN data from a crude initial model using graph-space optimal transport / A. Górszczyk, R. Brossier, L. Métivier // First International Meeting for Applied Geoscience & Energy. — Society of Exploration Geophysicists, 2021. — Pp. 707–711. DOI: 10.1190/segam2021-3577774.1.

3. Vigh D. Sparse-node regional study from acquisition to imaging / D. Vigh, X. Cheng, K. Lyons, N. Seymour, E. Kocel, Z. Pan // First International Meeting for Applied Geoscience & Energy. — Society of Exploration Geophysicists, 2021. — Pp. 722–726. DOI: 10.1190/segam2021-3583372.1.

4. Юров Ю. Г. Определение скоростной модели среды с помощью наблюдений отражённых и преломлённых волн / Ю. Г. Юров // Технологии сейсморазведки. — 2009. — № 3. — С. 28–35.

5. Ray A. First nodal OBS acquisition from the Thunder Horse Field in the deep water of the Gulf of Mexico / A. Ray, B. Nolte, D. Herron // SEG International Exposition and Annual Meeting. — SEG, 2004. — Pp. SEG-2004-0406.

6. Brown I. Ocean Bottom Seismic: Robots on the Seabed [Электронный ресурс] / I. Brown. — Режим доступа: <https://geoexpro.com/ocean-bottom-seismic-robots-on-the-seabed/> (дата обращения: 01.04.2024).

7. Beaudoin G. Field design and operation of a novel deepwater, wide-azimuth node seismic survey / G. Beaudoin, A. A. Ross // The Leading Edge. — 2007. — Vol. 26. — Is. 4. — Pp. 494–503. DOI: 10.1190/1.2723213.

8. Ильинский Д. А. О создании цифровых донных сейсмических станций нового поколения: настоящее и взгляд в будущее / Д. А. Ильинский, А. А. Гинзбург, В. В. Воронин, О. Ю. Ганжа [и др.] // Геоэкология. Инженерная геология, гидрогеология, геокриология. — 2019. — № 2. — С. 87–101. DOI: 10.31857/S0869-78092019287-101.

9. Ильинский Д. А. Инновационный подход и мобильная технология реализации сейсморазведки в приливно-отливной зоне в труднодоступных районах Арктики / Д. А. Ильинский, А. Ю. Разумов, А. А. Корнеев, А. М. Русалин [и др.] // Сейсмические приборы. — 2013. — Т. 49. — № 2. — С. 58–70.

10. Рыжов В. А. Опыт проведения тестовых работ по технологии Низкочастотного сейсмического зондирования (НСЗ) на шельфе Охотского моря (о. Сахалин) / В. А. Рыжов, О. С. Жукова, А. И. Чернышков, А. В. Хаженец [и др.] // Тезисы докладов 19-ой международной научно-практической конференции «Гео-модель-2017». — Геленджик, 2017.

11. Ningthoujam L. S. Plume-ridge interactions in the Central Indian Ocean Basin: Insights from new wide-angle seismic and potential field modelling / L. S. Ningthoujam, D. K. Pandey, N. Nair, R. Yadav, S. Khogenkumar, S. S. Negi, A. Kumar // Tectonophysics. — 2022. — Vol. 824. — Pp. 229222. DOI: 10.1016/j.tecto.2022.229222.

12. Regone C. J. A modeling approach to wide-azimuth design for subsalt imaging / C. J. Regone // *The Leading Edge*. — 2006. — Vol. 25. — Is. 12. — Pp. 1467–1475. DOI: 10.1190/1.2405331.
13. Regone C. J. Using 3D finite-difference modeling to design wide-azimuth surveys for improved subsalt imaging / C. J. Regone // *Geophysics*. — 2007. — Vol. 72. — Is. 5. — Pp. SM231–SM239. DOI: 10.1190/1.2668602.
14. Ильинский Д. А. Сейсморазведка в транзитной зоне. Натурные испытания системы «КРАБ» (этап 1) / Д. А. Ильинский, К. А. Рогинский, О. Ю. Ганжа // *Вестник Государственного университета морского и речного флота имени адмирала С. О. Макарова*. — 2020. — Т. 12. — № 2. — С. 289–301. DOI: 10.21821/2309-5180-2020-12-2-289-301.
15. Ильинский Д. А. Сейсморазведка в транзитной зоне. Натурные испытания системы КРАБ (этап 2) / Д. А. Ильинский, К. А. Рогинский, О. Ю. Ганжа // *Вестник Государственного университета морского и речного флота имени адмирала С. О. Макарова*. — 2020. — Т. 12. — № 3. — С. 551–566. DOI: 10.21821/2309-5180-2020-12-3-551-566.
16. Рогинский К. А. Сейсморазведка в транзитной зоне. Опыт-промышленные испытания системы «КРАБ-400» (этап 3) / К. А. Рогинский, Д. А. Ильинский, О. Ю. Ганжа // *Вестник Государственного университета морского и речного флота имени адмирала С. О. Макарова*. — 2021. — Т. 13. — № 5. — С. 611–624. DOI: 10.21821/2309-5180-2021-13-5-611-624.
17. Казанин Г. С. Результаты испытаний отечественных 4-компонентных автономных донных станций «КМС» в юго-восточной части Баренцева моря / Г. С. Казанин, С. О. Базилевич, А. В. Зимовский, И. А. Матвеев [и др.] // *Новое в геологии и геофизике Арктики, Антарктики и Мирового Океана: материалы VI Международной конференции молодых ученых и специалистов, посвященной 70-летию основания НИИГА — ВНИИОкеангеология* / Отв. ред. А. С. Бич. — СПб.: ФГБУ «ВНИИОкеангеология», 2018. — С. 29–30.
18. Steen-Hansen P. The future is at the bottom of the sea / P. Steen-Hansen // *GeoExPro*. — 2017. — Vol. 14. — Is. 4. — Pp. 42–45.
19. Kombrink H. Dropping nodes from a supply vessel [Электронный ресурс] / H. Kombrink. — Режим доступа: <https://geoexpro.com/dropping-nodes-from-a-supply-vessel/> (дата обращения: 01.04.2024).
20. Ilinskiy D. A. Self-Popup Node Surveying Features and Application to Arctic Shelf Investigation / D. A. Ilinskiy, O. Y. Ganzha, A. I. Elnikov, K. A. Roginskiy // *Marine Technologies* 2019. — European Association of Geoscientists & Engineers, 2019. — Vol. 2019. — Pp. 1–10. DOI: 10.3997/2214-4609.201901820.

REFERENCES

1. Ilinskiy, Dmitry A., Konstantin A. Roginskiy, and Oleg Y. Ganzha. “Geophysical technologies for study of deep oil genesis.” *Vestnik Gosudarstvennogo universiteta morskogo i rechnogo flota imeni admiral S. O. Makarova* 10.5 (2018): 936–950. DOI: 10.21821/2309-5180-2018-10-5-936-950.
2. Górszczyk, Andrzej, Romain Brossier, and Ludovic Métivier. “Regional-scale FWI of wide-angle OBN data from a crude initial model using graph-space optimal transport.” *First International Meeting for Applied Geoscience & Energy*. Society of Exploration Geophysicists, 2021. 707–711. DOI: 10.1190/segam2021-3577774.1.
3. Vigh, Denes, Xin Cheng, Kevin Lyons, Nigel Seymour, Eray Kocel, and Zhenwen Pan. “Sparse-node regional study from acquisition to imaging.” *First International Meeting for Applied Geoscience & Energy*. Society of Exploration Geophysicists, 2021. 722–726. DOI: 10.1190/segam2021-3583372.1.
4. Yurov, Yu. G. “Opredelenie skorostnoi modeli sredy s pomoshch'yu nablyudenii otrazhennykh i prelomlennykh voln.” *Tekhnologii seismorazvedki* 3 (2009): 28–35.
5. Ray, Amal, Bertram Nolte, and Don Herron. “First nodal OBS acquisition from the Thunder Horse Field in the deep water of the Gulf of Mexico.” *SEG International Exposition and Annual Meeting*. SEG, 2004.
6. Brown, Iain. “Ocean Bottom Seismic: Robots on the Seabed.” Web. 1 Apr. 2024 <<https://geoexpro.com/ocean-bottom-seismic-robots-on-the-seabed/>>.
7. Beaudoin, Gerard, and Allan A. Ross. “Field design and operation of a novel deepwater, wide-azimuth node seismic survey.” *The Leading Edge* 26.4 (2007): 494–503. DOI: 10.1190/1.2723213.
8. Il'inskiy, D. A., A. A. Ginzburg, V. V. Voronin, O. Yu. Ganzha, A. B. Manukin, and K. A. Roginskiy. “Towards a design of new generation digital seismic seabed seismographs — current state and future outlook.” *Geokologiya. Inzhenernaya geologiya. Gidrogeologiya. Geokriologiya* 2 (2019): 87–101. DOI: 10.31857/S0869-78092019287-101.
9. Ilinski, D. A., A. U. Razumov, A. A. Korneev, A. M. Rusalin, and I. A. Gotz. “Application of new approach and mobile technology for offshore seismic acquisition project in the remote arctic transition areas.” *Seismic Instruments* 49.2 (2013): 58–70.

10. Ryzhov, V. A., O. S. Zhukova, A. I. Chernyshkov, A. V. Khazhenets, A. V. Kharakhinov, S. A. Feofilov, I. R. Sharapov, and D. A. Ilyinsky. "The Experience of Conduction of Low-Frequency Seismic Sounding Technology (LFS) Test Works on the Shelf of the Sea of Okhotsk (Sakhalin Island)." *19th Science and Applied Research Conference on Oil and Gas Geological Exploration and Development «Geomodel 2017» — Gelendzhik, Russia, 11–14 September 2017*. Gelendzhik.2017.
11. Ningthoujam, Lachit S., Dhananjai K. Pandey, Nisha Nair, Rahul Yadav, Shoraisam Khogenkumar, Sanjay S. Negi, and Amit Kumar. "Plume-ridge interactions in the Central Indian Ocean Basin: Insights from new wide-angle seismic and potential field modelling." *Tectonophysics* 824 (2022): 229222. DOI: 10.1016/j.tecto.2022.229222.
12. Regone, Carl J. "A modeling approach to wide-azimuth design for subsalt imaging." *The Leading Edge* 25.12 (2006): 1467–1475. DOI: 10.1190/1.2405331.
13. Regone, Carl J. "Using 3D finite-difference modeling to design wide-azimuth surveys for improved subsalt imaging." *Geophysics* 72.5 (2007): SM231–SM239. DOI: 10.1190/1.2668602.
14. Ilinskiy, Dmitry A., Konstantin A. Roginskiy, and Oleg Y. Ganzha. "Seismic survey in the transit zone. Fullscale tests of the KRAB system. Stage 1." *Vestnik Gosudarstvennogo universiteta morskogo i rechnogo flota imeni admirala S. O. Makarova* 12.2 (2020): 289–301. DOI: 10.21821/2309-5180-2020-12-2-289-301.
15. Ilinskiy, Dmitry A., Konstantin A. Roginskiy, and Oleg Y. Ganzha. "Seismic survey in transit zone. KRAB system full-scale tests. Stage 2." *Vestnik Gosudarstvennogo universiteta morskogo i rechnogo flota imeni admirala S. O. Makarova* 12.3 (2020): 551–566. DOI: 10.21821/2309-5180-2020-12-3-551-566.
16. Roginskiy, Konstantin A., Dmitry A. Ilinskiy, and Oleg Y. Ganzha. "Seismic survey in transit zone. Krab system full-scale tests (Stage 3)." *Vestnik Gosudarstvennogo universiteta morskogo i rechnogo flota imeni admirala S. O. Makarova* 13.5 (2021): 611–624. DOI: 10.21821/2309-5180-2021-13-5-611-624.
17. Kazanin, G. S., S. O. Bazilevich, A. V. Zimovskii, I. A. Matveev, D. G. Kuoma, D. A. Il'inskii, K. A. Roginskii, and O. Yu. Ganzha. "Rezul'taty ispytaniy otechestvennykh 4-komponentnykh avtonomnykh donnykh stantsii «KMS» v yugo-vostochnoi chasti Barentseva moray." *Materialy VI Mezhdunarodnoi konferentsii molodykh uchenykh i spetsialistov «Novoe v geologii i geofizike Arktiki, Antarktiki i Mirovogo Okeana», posvyashchennaya 70-letiyu osnovaniya NIIGA — VNIIOkeangeologiya*. Edited by A. S. Bich. SPb.: FGBU «VNIIOkeangeologiya», 2018. 29–30.
18. Steen-Hansen, Petter. "The future is at the bottom of the sea." *GeoExPro* 14.4 (2017): 42–45.
19. Kombrink, Henk. "Dropping nodes from a supply vessel." Web. 1 Apr. 2024 <<https://geoexpro.com/dropping-nodes-from-a-supply-vessel/>>.
20. Ilinskiy, D. A., O. Y. Ganzha, A. I. Elnikov, and K. A. Roginskiy. "Self-Popup Node Surveying Features and Application to Arctic Shelf Investigation." *Marine Technologies* 2019. Vol. 2019. European Association of Geoscientists & Engineers, 2019. 1–10. DOI: 10.3997/2214-4609.201901820.

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

Ильинский Дмитрий Анатольевич — кандидат физико-математических наук, ведущий научный сотрудник, технический директор Федерального государственного бюджетного учреждения науки «Институт океанологии им. П. П. Ширшова Российской академии наук» 117997, Российская Федерация, г. Москва, Нахимовский проспект, 36 ООО «Геовендор» 117449, Российская Федерация, г. Москва, ул. Шверника, д. 16, к. 2, помещ. 1 e-mail: dilinskiy61@mail.ru
Ганжа Олег Юрьевич — главный специалист Федерального государственного бюджетного учреждения науки «Институт океанологии им. П. П. Ширшова Российской академии наук» 117997, Российская Федерация, г. Москва, Нахимовский проспект, 36 e-mail: ganzhaoy@mail.ru

INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Ilyinsky, Dmitry A. — PhD, Senior Research Scientist, CTO P. P. Shirshov Institute of Oceanology of Russian Academy of Sciences 36, Nakhimovsky Ave., Moscow, 117997, Russian Federation Geovendor LLC 16/2 Shvernika Str., Moscow, 117449, Russian Federation e-mail: dilinskiy61@mail.ru
Ganzha, Oleg Yu. — Chief Specialist P. P. Shirshov Institute of Oceanology of Russian Academy of Sciences 36, Nakhimovsky Ave., Moscow, 117997, Russian Federation e-mail: ganzhaoy@mail.ru

Корнеев Антон Александрович —
генеральный директор
ООО «Геовендор»
117449, Российская Федерация, г. Москва,
ул. Шверника, д. 16, к. 2, помещ. 1
e-mail: red_77777@mail.ru

Korneev, Anton A. —
CEO
Geovendor LLC
16/2 Shvernika Str., Moscow, 117449,
Russian Federation
e-mail: red_77777@mail.ru

*Статья поступила в редакцию 20 марта 2024 г.
Received: March 20, 2024.*

DOI: 10.21821/2309-5180-2024-16-3-363-369

MATHEMATICAL MODEL OF THE VESSEL MOTION DURING A PLANNED GROUNDING

G. V. Maryasov, G. N. Sharlay

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

The problem of transport services to points with an unequipped coast, a significant part of which is located on the coast of the Arctic seas and the Far East, continues to remain relevant for decades. Unlike the usual practice of cargo operations at berths and roadsteads, in conditions of an unequipped shore, unloading and loading often have to be carried out when the ship touches the ground, and damage to the hull occurs. Sometimes in an emergency, to save the crew and the ship, it is necessary to force the ship to ground. As a result, a system for preliminary assessment of contact conditions during partial running aground is necessary. To achieve this, a mathematical model for the rigid hull of a ship running aground, where the ground penetration is small compared to the elevation of the bow, is presented in the paper. The ship is considered as an elastic beam. It is shown that the first contact between the bow and the ground leads to a high peak load. The vessel then slides partially up the slope, wherein inertial forces in the approximation are considered small compared to ground reaction forces and hydrostatic forces. In addition to force effects, the dynamic characteristics of the sagging body design are taken into account. The resulting solution to the system of nonlinear ordinary differential equations describing the vessel movement when running aground includes longitudinal, vertical and inclined components. The proposed solution will make it possible to calculate the contact forces arising at the moment of contact of the hull with the ground, taking into account the shock load and the design features of the vessel.

Keywords: unequipped shore, touching the ground, mathematical model, shock load, hydrodynamic forces.

For citation:

Maryasov, Georgy V., and Georgy N. Sharlay. "Mathematical model of the vessel motion during a planned grounding." *Vestnik Gosudarstvennogo universiteta morskogo i rechnogo flota imeni admirala S. O. Makarova* 16.3 (2024): 363–369. DOI: 10.21821/2309-5180-2024-16-3-363-369.

УДК 656.61

МАТЕМАТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ ДВИЖЕНИЯ СУДНА ПРИ ПРЕДУСМОТРЕННОЙ ПОСАДКЕ НА МЕЛЬ

Г. В. Марьясов, Г. Н. Шарлай

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

Темой исследования является анализ проблемы транспортного обслуживания пунктов с необорудованным берегом, расположенных в большинстве на побережье арктических морей и Дальнего Востока, которая является актуальной на протяжении нескольких десятилетий. Отмечается, что в отличие от обычной практики грузовых операций у причалов и на рейде в условиях необорудованного берега погрузка / выгрузка зачастую осуществляется в условиях касания судном грунта, при этом имеет место повреждение корпуса судна, а иногда в аварийной ситуации для спасения экипажа и судна необходима принудительная посадка судна на мель. Отмечается, что вследствие этого необходимо наличие системы предварительной оценки контактных условий при частичной посадке судна на грунт. В статье представлена математическая модель для жесткого корпуса судна, садящегося на мель, при этом проникновение в грунт мало по сравнению с возвышением носовой части (судно рассматривается как упругий брус). Показано, что первый контакт между носовой частью судна и грунтом приводит к высокому пику нагрузок, затем судно продолжает частичное скольжение вверх по уклону. При этом силы инерции в качестве аппроксимации рассматриваются как малые по сравнению с силами реакции грунта и гидростатическими силами. Помимо силовых воздействий учтены динамические характеристики конструкции прогибающегося корпуса. Полученное решение системы нелинейных обыкновенных дифференциальных уравнений,

описывающих движение судна при посадке на мель, включает продольную, вертикальную и наклонную составляющие. Предложенное решение позволит рассчитать контактные усилия, возникающие в момент соприкосновения корпуса с грунтом, с учетом ударной нагрузки и особенностей конструкции судна.

Ключевые слова: необорудованный берег, касание грунта, математическая модель, ударная нагрузка, гидродинамические силы, грузовые операции, динамика судна.

Для цитирования:

Марьясов Г. В. Математическая модель движения судна при предусмотренной посадке на мель / Г. В. Марьясов, Г. Н. Шарлай // Вестник Государственного университета морского и речного флота имени адмирала С. О. Макарова. — 2024. — Т. 16. — № 3. — С. 363–369. DOI: 10.21821/2309-5180-2024-16-3-363-369.

Введение (Introduction)

Обычной практикой в некоторых портах является выполнение грузовых операций на необорудованный берег при посадке судна на мель [1], но иногда в аварийной ситуации осуществляется принудительная посадка судна на мель для его спасения и, как следствие, для спасения членов его экипажа и пассажиров [2]. Таким образом, возникает потенциальная опасность того, что конструктивная прочность судна окажется недостаточной и будут получены повреждения, поскольку судно испытывает нагрузки, отличные от тех, которые действуют на плаву [3]–[6]. Российский морской регистр судоходства разработал нормативно-методические требования к судам, эксплуатация которых предусматривает посадку на грунт¹. На основе этих требований разработаны рекомендации по усилению конструкций днища и защите корпуса [7], [8]. Для того чтобы все участники грузовых операций при посадке судна на грунт имели представление о разумно обоснованной риск-ориентированной оценке планирования и выполнения таких операций, необходима математическая модель планируемой посадки судна на мель.

Посадка судна на грунт происходит на мелководье [4]. Поэтому силы гидродинамического давления на корпус судна играют важную роль, особенно в начальной фазе посадки на грунт. Для того, чтобы смоделировать эти силы, нужна надежная математическая модель. При гидродинамическом анализе мореходных качеств судов традиционно используются присоединенные массы и демпфирующие силы [9]. Из-за наличия свободной водной поверхности движение судна приводит к появлению поверхностных волн. Вследствие этого даже после остановки судна силы гидродинамического давления, вызванные ранее созданными волнами, продолжают свое воздействие. Поэтому динамика судна зависит не только от его текущего движения, но и от предыдущей истории движения [10].

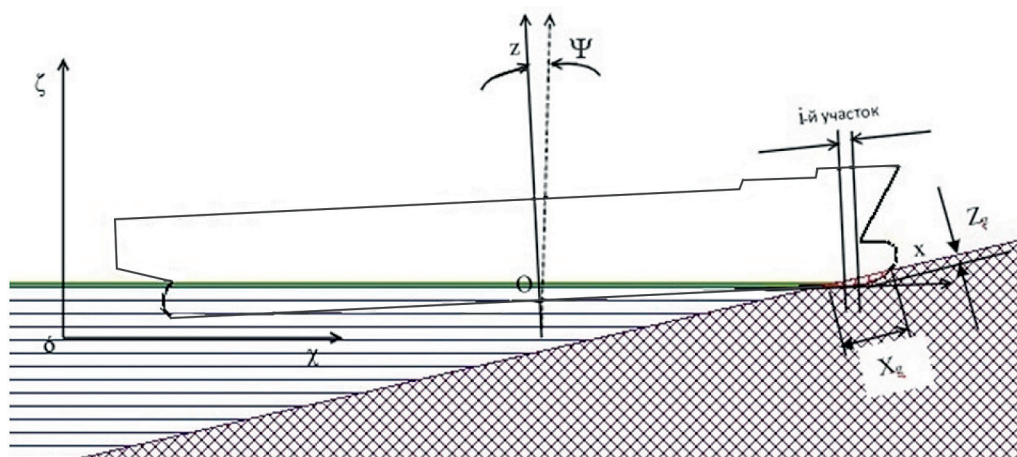
В настоящей работе использована математическая модель, которая включает переходные гидродинамические силы давления, действующие на подводную часть корпуса и зависящие от времени, а также динамические характеристики конструкции, возникающие вследствие изгиба судна [11]. В математической модели корпус судна представлен в виде упругого бруса, на который воздействуют внешние ударные силы. Такой подход обусловлен тем, что параметры мели, с которой контактирует судно, являются менее прогнозируемыми. Основные внешние силы определяются гидродинамическими переходными силами давления на поверхность корпуса [11], [12]. Решение системы нелинейных обыкновенных дифференциальных уравнений, описывающей движение судна, должно учитывать вертикальную качку, возвышение и наклонение при движении твердого тела.

Методы и материалы (Methods and Materials)

Принимается, что прочностные характеристики корпуса судна могут быть смоделированы на базе теории изгиба балок Тимошенко [13]. В дальнейшем будем считать, что геометрический центр структурных масс единицы длины эквивалентного бруса в сочетании с присоединенными массами для подъемного усилия с неопределенной периодичностью может быть аппроксимирован прямой

¹ НД № 2-020101-138. Правила классификации и постройки морских судов. Ч/ XVII : Дополнительные знаки символа класса и словесные характеристики, определяющие конструктивные или эксплуатационные особенности судна. СПб.: Российский морской регистр судоходства, 2021. 364 с.

линией. Этот центр тяжести выбирается по оси x координатной системы xOz , связанной с судном и берущей начало координат на миделе, как показано на рисунке. Система координат судна xOz движется в неподвижной системе координат $\chi\phi\zeta$. Боковым сносом и рысканием можно пренебречь.



Системы координат, используемые для судна, сажающегося на грунт
Coordinate systems used for a vessel running aground

Проблема вывода нелинейных уравнений движения состоит в определении гидродинамических сил, действующих на корпус судна. Для приближенного рассмотрения в данном исследовании принято, что гидродинамическое воздействие оказывается на твердое тело, плавающее на свободной поверхности. Когда участок в позиции x корпуса судна подвергается толчку бесконечно малой продолжительности, может быть применено представление о присоединенных массах [9]. Далее силы инерции, действующие на этот участок корпуса судна, могут быть сформулированы в векторной форме:

$$\bar{p}_i(x) = -\frac{\partial \bar{B}}{\partial t} - \bar{\omega} \bar{B}; \quad (1)$$

$$\bar{m}_i(x) = -\frac{\partial \bar{I}_0}{\partial t} - \bar{\omega} \bar{I}_0 - \bar{U} \bar{B}, \quad (2)$$

где $\bar{p}_i(x)$ — сила инерции, приложенная к центру тяжести сегмента корпуса $(x, y, z) = (x, 0, 0)$;

$\bar{B}$ — вектор количества движения, приложенной к сегменту корпуса;

$\bar{\omega} = (0, \dot{\psi}, 0)$ — текущий вектор угловой скорости сегмента корпуса относительно текущей системы координат, связанной судном;

ψ — угол дифферента судна.

$\bar{m}_i(x)$ — вектор вращающего момента, приложенный к центру тяжести сегмента корпуса $(x, y, z) = (x, 0, 0)$;

$\bar{I}_0$ — вектор момента импульса сегмента корпуса;

$\bar{U} = (\dot{u}, 0, \dot{w})$ — вектор поступательной скорости сегмента корпуса.

Если распределенную массу на единицу длины обозначить как $m(x)$, то присоединенная масса волнового воздействия для бесконечной угловой скорости ω в z -направлении представляется как $\mu_z = \lim_{\omega \rightarrow \infty} a_z(x)$. Отсюда следует выражение

$$\bar{B}(x) = [(m + \mu_x)\dot{u}, 0, (m + \mu_z)\dot{w}] dx. \quad (3)$$

При обозначении момента инерции на единицу длины конструктивной массы с присоединенной массой относительно центра тяжести поперечного разреза в направлении оси y как $j_y(x)$ получим

$$\bar{I}_0(x) = [0, j_y(x)\dot{\psi}, 0] dx. \quad (4)$$

При преобразовании уравнения (1) в скалярную форму с использованием уравнения (3) силы инерции поперечного сечения приводятся к виду:

$$p_x(x) = \{-(m + \mu_x)\ddot{u} - (m + \mu_z)\dot{\psi}\dot{w}\}dx; \quad (5)$$

$$p_z(x) = \{-(m + \mu_z)\ddot{w} + (m + \mu_x)\dot{\psi}\dot{u}\}dx. \quad (6)$$

В процессе дальнейшего преобразования уравнения (2) в скалярную форму с использованием уравнения (4) получим выражение для момента системы инерциальных сил поперечного сечения:

$$m_{yi}(x) = -j_y\ddot{\psi} + [(m + \mu_z)\dot{u}\dot{w} - (m + \mu_x)\dot{u}\dot{w}] = -j_y\ddot{\psi} + (\mu_z - \mu_x)\dot{u}\dot{w}. \quad (7)$$

Необходимо учесть гидродинамические силы, вызванные движением предыдущего сегмента корпуса. Эти «силы памяти» имеют вертикальное направление и могут быть представлены в форме:

$$p_{zm}(x, t) = -\int_0^\infty h_z(x, t)\dot{w}(x, t - \tau)d\tau; \quad (8)$$

$$h_z(x, t) = \frac{2}{\pi} \int_0^\infty b(x, \omega)\cos\omega t d\omega, \quad (9)$$

где $h(x, t)$ — передаточная функция сегмента;

$b(x, \omega)$ — двумерное демпфирование поперечного разреза при подъеме при частоте ω .

Если пренебречь взаимосвязью между продольной деформацией и вертикальным изгибом, то условие динамического равновесия в x -направлении описывается выражением

$$\frac{\partial}{\partial x} \left[EA \left(1 + \eta \frac{\partial}{\partial t} \right) \frac{\partial u}{\partial x} \right] = (m + \mu_x)\ddot{u} + (m + \mu_z)\dot{\psi}\dot{w} + \delta(x_c)X_{ground}, \quad (10)$$

где EA — продольное напряжение корпуса;

X_{ground} — горизонтальная компонента реакции грунта;

h — коэффициент трения при $x = x_c$ $h = 1$ (в любом другом случае $h = 0$).

С использованием уравнения пучка Тимошенко условия динамического равновесия в z -направлении следующие [12]:

$$\frac{\partial}{\partial x} \left[EI_y \left(1 + \eta \frac{\partial}{\partial t} \right) \frac{\partial \psi}{\partial x} \right] - k_z GA \left(1 + \eta \frac{\partial}{\partial t} \right) \left(\frac{\partial w}{\partial x} + \psi \right) = j_y\ddot{\psi} + (\mu_z - \mu_x)\dot{u}\dot{w} - \delta(x_c)M_{ground}; \quad (11)$$

$$\begin{aligned} & \frac{\partial}{\partial x} \left[k_z GA \left(1 + \eta \frac{\partial}{\partial t} \right) \left(\frac{\partial w}{\partial x} + \psi \right) \right] = \\ & = (m + \mu_z)\ddot{w} - (m + \mu_x)\dot{\psi}\dot{u} + \rho g B w - \delta(x_c)Z_{ground} + \int_0^\infty h_z(x, t)\dot{w}(x, t - \tau)d\tau, \end{aligned} \quad (12)$$

где $I_y = I_y(x)$ — момент инерции поперечного сечения;

$k_z A = k_z A(x)$ — площадь поперечного сечения;

$B = B(x)$ — ширина ватерлинии;

G — модуль поперечной упругости корпуса;

M_{ground} — вертикальный изгибающий момент, производимый реакцией грунта в координате $x = x_c$;

Z_{ground} — вертикальная компонента реакции грунта.

Граничные условия задаются нулевыми значениями продольных, перерезывающих сил и изгибающих моментов на конечных участках корпуса судна.

Решение системы дифференциальных уравнений (10)–(12) имеет следующую форму [14]:

$$\begin{cases} u(x, t) = \tilde{u}_0(t) + \sum_{i=1}^N g_i(t)\tilde{u}_i(x); \\ w(x, t) = \tilde{w}_0(t) - x\tilde{\psi}_0(t) + \sum_{i=1}^N f_i(t)\tilde{w}_i(x); \\ \psi(x, t) = \tilde{\psi}_0(t) + \sum_{i=1}^N f_i(t)\tilde{\psi}_i(x), \end{cases} \quad (13)$$

где $\tilde{u}_0(t)$, $\tilde{w}_0(t)$, $\tilde{\psi}_0(t)$ — функции, обозначающие продольное, вертикальное и наклонное движение твердого тела соответственно;

$\tilde{u}_i(x)$, $\tilde{w}_i(x)$, $\tilde{\psi}_i(x)$ — нормированные собственные функции, связанные со свободными вибрациями корпуса во внешней среде.

Собственные функции $\{\tilde{w}_i, \tilde{\psi}_i\}$ являются решением следующих дифференциальных уравнений [15]:

$$-(EI\tilde{\psi}')' + k_z GA(\tilde{w}' - \tilde{\psi}) = \Omega^2 j_y \tilde{\psi} - [k_z GA(\tilde{w}' - \tilde{\psi})]' = \Omega^2 (m + \mu_z) \tilde{w}, \quad (14)$$

с граничными условиями:

$$\begin{cases} (EI\tilde{\psi}')_{x=x_{off}} = (EI\tilde{\psi}')_{x=x_{forw}} = 0; \\ \left(k_z GA(\tilde{w}' - \tilde{\psi})\right)_{x=x_{off}} = \left(k_z GA(\tilde{w}' - \tilde{\psi})\right)_{x=x_{forw}} = 0. \end{cases} \quad (15)$$

Примечание. Здесь производная берется по x .

Поскольку уравнения (14) с условиями (15) являются самосопряженными, нормированные собственные функции $\{\tilde{w}_i, \tilde{\psi}_i\}$ и $\{\tilde{w}_j, \tilde{\psi}_j\}$ удовлетворяют следующим ортонормированным отношениям для $i \neq j$:

$$\begin{cases} \int_L \{\tilde{\psi}_i j_y(x) \tilde{\psi}_j + \tilde{w}_i (m + \mu_z) \tilde{w}_j\} dx = \delta_{ij}; \\ \int_L \left\{ \tilde{\psi}_i (EI\tilde{\psi}_j')' + \tilde{\psi}_i k_z GA(\tilde{w}_j - \tilde{\psi}_j) + \tilde{w}_i [k_z GA(\tilde{w}_j' - \tilde{\psi}_j')] \right\} dx = \Omega_i^2 \delta_{ij}, \end{cases} \quad (16)$$

где d_{ij} — дельта Кронекера, $i = 1, 2, \dots$

Собственные функции $\tilde{u}_i(x)$ определяются задачей отыскания собственных значений дифференциального уравнения [14]:

$$-(EA\tilde{u}')' = \Omega_a^2 (m + \mu_x) \tilde{u} \quad (17)$$

с граничными условиями

$$(EA\tilde{u}')_{x=x_{off}} = (EA\tilde{u}')_{x=x_{forw}} = 0. \quad (18)$$

Эти собственные функции могут быть нормированы так, чтобы удовлетворять условию ортонормированности:

$$\int_L \tilde{u}_i (m + \mu_x) \tilde{u}_j dx = \delta_{ij}, \quad (19)$$

где d_{ij} — дельта Кронекера, $i = 1, 2, \dots$

Таким образом полученные уравнения (10)–(12) представляют собой математическую модель взаимодействия судна и грунта, в которой учтены динамическое изменение характеристик судна при касании о грунт и гидродинамические силы, вызванные движением предыдущего сегмента корпуса. Решение этой математической модели предложено через функции (13), которые можно определить из уравнений (14) и (17). При этом они должны удовлетворять граничным условиям (15), (18) и условиям ортонормированности (16), (19).

Заключение (Conclusion)

На основании полученных результатов в случае, если предполагается выгрузка на необорудованный берег методом частичной посадки на грунт или принудительная посадка судна на мель, можно заранее рассчитать возможности такой выгрузки или посадки для конкретного судна

и грунта. Особенность методики расчета заключается в том, что она позволяет учесть ударную нагрузку, возникающую в момент контакта судна с грунтом, а также особенности конструкции судна и его динамические параметры движения. Согласно предложенной методике можно сформулировать рекомендации капитанам судов, учитывающие динамику процесса и позволяющие прогнозировать условия касания грунта, а также определять ударные нагрузки для минимизации негативных последствий при предусмотренной посадке судна на мель.

В ходе дальнейшего исследования данный подход может позволить определить контактные силы, возникающие в момент соприкосновения судна с грунтом, и их зависимость от плотности и пластических свойств грунта: сцепления и угла внутреннего трения, а также от формы корпуса судна.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Азовцев А. И. Развитие судов для условий грузовых операций на необорудованных берегах арктических и субарктических морей / А. И. Азовцев, В. А. Кулеш, А. С. Огай, В. А. Петров // Полярная механика. — 2016. — № 3. — С. 450–460.
2. Осипов В. И. Сравнение численных результатов метода расчета процесса продольного спуска судна на воду и метода посадки судна на мель / В. И. Осипов // Морские интеллектуальные технологии. — 2023. — № 1–1 (59). — С. 51–58. DOI: 10.37220/MIT.2023.59.1.004.
3. Петров В. А. Исследование технологических и правовых условий обеспечения безопасности грузовых операций для судов, эксплуатация которых предусматривает посадку на грунт / В. А. Петров, А. С. Огай. — М.: Русайнс, 2018. — 326 с.
4. Кулеш В. А. Актуальность и безопасность грузовых операций при посадке судов на грунт / В. А. Кулеш, В. А. Петров // Морские интеллектуальные технологии. — 2015. — № 3–1 (29). — С. 75–80.
5. Азовцев А. И. Предложения по развитию требований к судам, эксплуатация которых предусматривает посадку на грунт / А. И. Азовцев, В. И. Евенко, В. А. Кулеш, М. А. Кутейников // Научно-технический сборник Российского морского регистра судоходства. — 2016. — № 42–43. — С. 47–58.
6. Осипов В. И. Аналитическое сравнение продольного спуска судна на воду с посадкой на мель / В. И. Осипов // Морские интеллектуальные технологии. — 2021. — № 3–1 (53). — С. 41–46. DOI: 10.37220/MIT.2021.53.3.005.
7. Герман А. П. Разработка схем усиления судна для взаимодействия с грунтом / А. П. Герман, В. А. Кулеш, Фам Чунг Хиеп // Вестник Государственного университета морского и речного флота имени адмирала С. О. Макарова. — 2020. — Т. 12. — № 5. — С. 915–925. DOI: 10.21821/2309-5180-2020-12-5-915-925.
8. Кулеш В. А. Проект локальной внешней конструктивной защиты днища судна от грунта / В. А. Кулеш, М. А. Кутейников, О. Э. Суров, Ч. Х. Фам // Научно-технический сборник Российского морского регистра судоходства. — 2023. — № 72–73. — С. 39–47.
9. Короткин А. И. Присоединенные массы судна: справ. / А. И. Короткин. — Л.: Судостроение, 1986. — 312 с.
10. Кулеш В. А. Нагрузки взаимодействия при ударах корпуса судна о грунт / В. А. Кулеш // Морские интеллектуальные технологии. — 2016. — № 3–1 (33). — С. 71–76.
11. Кулеш В. А. Методика расчета параметров взаимодействия судов с грунтом / В. А. Кулеш, Ч. Х. Фам // Вестник Инженерной школы Дальневосточного федерального университета. — 2021. — № 3 (48). — С. 39–48. DOI: 10.24866/2227-6858/2021-3-5.
12. Елисеева О. П. Особенности применения модели С. П. Тимошенко в задаче определения прогибов балок при совместном учете изгиба и сдвига / О. П. Елисеева, К. В. Шадт, Н. С. Тимофеева, Е. Кононова, Р. А. Сабиров // Актуальные проблемы авиации и космонавтики. — 2011. — Т. 1. — № 7. — С. 91–93.
13. Тимошенко С. П. Статические и динамические проблемы теории упругости / С. П. Тимошенко. — Киев: Наукова Думка, 1975. — 563 с.
14. Корн Г. А. Справочник по математике для научных работников и инженеров / Г. А. Корн, Т. М. Корн. — СПб.: Лань, 2003. — 831 с.

REFERENCES

1. Azovtsev, A., V. Kulesh, A. Ogay, and V. Petrov. "Ship's construction development for cargo operations in condition of the unimproved port facilities in Arctic and Subarctic coast." *Polyarnaya mekhanika* 3 (2016): 450–460.

2. Osipov, V. I. "Comparison of the numerical results of the method for calculating the process of longitudinal descent of the ship on the water and the method of landing the vessel on the ground." *Marine Intelligent Technologies* 1–1(59) (2023): 51–58. DOI: 10.37220/MIT.2023.59.1.004
3. Petrov, V. A., and A. S. Ogai. *Issledovanie tekhnologicheskikh i pravovykh uslovii obespecheniya bezopasnosti gruzovykh operatsii dlya sudov, ekspluatatsiya kotorykh predusmatrivaet posadku na grunt*. M.: Rusains, 2018.
4. Kulesh, V. A., and V. A. Petrov. "Aktual'nost' i bezopasnost' gruzovykh operatsii pri posadke sudov na grunt." *Marine Intelligent Technologies* 3–1(29) (2015): 75–80.
5. Azovtsev, A. I., B. I. Evenko, V. A. Kulesh, M. A. Kuteinikov, A. S. Ogai, and B. A. Petrov. "Proposal for rule requirements development for ships operating in contact with ground." *Research Bulletin by Russian Maritime Register of Shipping* 42–43 (2016): 47–58.
6. Osipov, V. I. "Analytical comparison of longitudinal launching of a vessel into the water with grounding." *Marine Intelligent Technologies* 3–1(53) (2021): 41–46.
7. German, Andrey P., Victor A. Kulesh, and Pham Trung Hiep. "Development of the vessel strengthening schemes for ground contact." *Vestnik Gosudarstvennogo universiteta morskogo i rechnogo flota imeni admirala S. O. Makarova* 12.5 (2020): 915–925. DOI: 10.21821/2309-5180-2020-12-5-915-925.
8. Kulesh, V. A., M. A. Kuteynikov, O. E. Surov, and T. H. Pham. "Design of local external structural protection from ground for vessel's bottom." *Research Bulletin by Russian Maritime Register of Shipping* 72–73 (2023): 39–47.
9. Korotkin, A. I. *Prisoedinennye massy sudna*. L.: Sudostroenie, 1986.
10. Kulesh, Victor Anatolievich. "Contact loads of ship hull impact against ground." *Marine Intelligent Technologies* 3–1 (33) (2016): 71–76.
11. Kulesh, V., and T. H. Pham. "Method for calculating the parameters of vessels interaction with the ground." *FEFU: School of Engineering Bulletin* 3(48) (2021): 39–48. DOI: 10.24866/2227-6858/2021-3-5.
12. Eliseeva, O. P., K. V. Shadt, N. S. Timofeeva, E. Kononova, and R. A. Sabirov. "Osobennosti primeneniya modeli S. P. Timoshenko v zadache opredeleniya progibov balok pri sovместnom uchete izgiba i sdviga." *Aktual'nye problemy aviatsii i kosmonavтики* 1.7 (2011): 91–93.
13. Timoshenko, S. P. *Staticheskie i dinamicheskie problemy teorii uprugosti*. Kiev: NAUKOVA DUMKA, 1975.
14. Korn, G. A., and T. M. Korn. *Spravochnik po matematike dlya nauchnykh rabotnikov i inzhenerov*. SPb.: Lan', 2003.

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

Марьясов Георгий Валерьевич — аспирант
Научный руководитель:
Шарлай Георгий Николаевич
Морской государственный университет имени
адмирала Г. И. Невельского
690003, Российская Федерация, г. Владивосток,
ул. Верхнепортовая, 50а
e-mail: GeorgyMar94@gmail.com
Шарлай Георгий Николаевич —
кандидат технических наук, доцент
Морской государственный университет имени
адмирала Г. И. Невельского
690003, Российская Федерация, г. Владивосток,
ул. Верхнепортовая, 50а
e-mail: Gsharlay@msun.ru

INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Maryasov, Georgy V. — Postgraduate
Supervisor:
Sharlay, Georgy N.
Maritime State University Named
after Admiral G. I. Nevelskoy
50A Verkhneportovaya Str., Vladivostok,
690003, Russian Federation
e-mail: GeorgyMar94@gmail.com
Sharlay, Georgy N. —
PhD, associate professor
Maritime State University Named
after Admiral G. I. Nevelskoy
50A Verkhneportovaya Str., Vladivostok, 690003,
Russian Federation
e-mail: Gsharlay@msun.ru

Статья поступила в редакцию 22 апреля 2024 г.
Received: April 22, 2024.

DOI: 10.21821/2309-5180-2024-16-3-370-378

ENSURING THE SAFETY OF NAVIGATION ON THE INLAND WATERWAYS OF REGIONAL IMPORTANCE IN SAINT PETERSBURG

S. A. Ageev, V. V. Karetnikov, S. V. RudykhAdmiral Makarov State University of Maritime and Inland Shipping,
St. Petersburg, Russian Federation

The topic of this work is the study of issues related to ensuring the safety of navigation on inland waterways of regional importance located within the territorial borders of St. Petersburg. The issues of improving various regulatory legal acts that have made it possible to increase navigation safety on the Fontanka River, Moika River, Zhdanovka River, Griboyedov Canal, Kryukov Canal and Zimnaya Kanavka are discussed. It is emphasized that the level of navigation safety on those waterways of St. Petersburg, which have received a new status — waterways of regional importance, has been significantly increased due to the extension of navigation rules for ships to them. It is recognized that the decisions to transfer these waterways for maintenance to a state-owned enterprise with many years of experience, which is the Federal Budgetary Institution “Administration of the Volga-Baltic Basin of Inland Waterways” and the need to determine the optimal guaranteed dimensions of ship passages using modern mathematical modeling methods, is quite correct and well-founded. In order to increase the level of navigation safety, it is proposed to ensure compliance with all the requirements of existing regulatory legal documents in the field of navigation safety in relation to navigable bridge spans. It is indicated that it is necessary to determine the estimated navigable level or the maximum navigable water level for bridge crossings and install all necessary navigation signs in the navigable spans for the safe passage of ships.

Keywords: inland waterways, navigation safety, navigation and hydrographic support, navigable level, navigable bridge span.

For citation:

Ageev, Sergei A., Vladimir V. Karetnikov, and Sergei V. Rudykh. “Ensuring the safety of navigation on the inland waterways of regional importance in Saint Petersburg.” *Vestnik Gosudarstvennogo universiteta morskogo i rechnogo flota imeni admiral S. O. Makarova* 16.3 (2024): 370–378. DOI: 10.21821/2309-5180-2024-16-3-370-378.

УДК 656.62; 629.122

ОБЕСПЕЧЕНИЕ БЕЗОПАСНОСТИ СУДОХОДСТВА НА ВНУТРЕННИХ ВОДНЫХ ПУТЯХ РЕГИОНАЛЬНОГО ЗНАЧЕНИЯ САНКТ-ПЕТЕРБУРГА

С. А. Агеев, В. В. Каретников, С. В. РудыхФГБОУ ВО «ГУМРФ имени адмирала С. О. Макарова»,
Санкт-Петербург, Российская Федерация

Темой исследования является изучение вопроса регулярных ежегодных перевозок туристов на внутренних водных путях регионального значения, расположенных в территориальных границах Санкт-Петербурга, речными пассажирскими судами в рамках прогулочных, экскурсионных и культурных программ. Отмечается, что достаточно интенсивное пассажирское судоходство требует обеспечения высокого уровня безопасности. При этом подчеркивается, что задача обеспечения безопасных судоходных условий осложняется тем, что движение судов осуществляется в стесненных условиях, обусловленных не только шириной и глубиной водного пути, но и высотой судоходных пролетов мостов. В качестве объекта исследования выбраны наиболее привлекательные для туристического судоходства малые реки и каналы Санкт-Петербурга: Фонтанка, Мойка, Ждановка, Канал Грибоедова, Крюков канал и Зимняя канавка. Предметом исследований являются судоходные условия на указанных водных путях. В рамках настоящей работы выполнен анализ соответствия судоходных условий на внутренних водных путях действующим нормативно-правовым документам. Результаты исследований показали, что благодаря совершенствованию нормативно-правовых актов и проведению организационно-технических мероприятий отмечается по-

вышение уровня безопасности судоходства на внутренних водных путях регионального значения Санкт-Петербурга, однако при этом задача обеспечения безопасного прохождения судов под мостами остается решенной не полностью. Сделан вывод о том, что для обеспечения безопасного плавания судов под мостами через реки Фонтанку, Мойку и Ждановку, Канал Грибоедова, Крюков канал и Зимнюю канавку необходимо определить расчетный судоходный или максимальный судоходный уровень для каждой из переправ и привести в надлежащее состояние навигационную сигнализацию судоходных пролетов мостов.

Ключевые слова: внутренние водные пути, безопасность судоходства, гарантированные габариты, навигационно-гидрографическое обеспечение, судоходный пролет.

Для цитирования:

Агеев С. А. Обеспечение безопасности судоходства на внутренних водных путях регионального значения Санкт-Петербурга / С. А. Агеев, В. В. Каретников, С. В. Рудых // Вестник Государственного университета морского и речного флота имени адмирала С. О. Макарова. — 2024. — Т. 16. — № 3. — С. 370–378. DOI: 10.21821/2309-5180-2024-16-3-370-378.

Введение (Introduction)

Многочисленные ситуации навала судов на опоры мостов, повреждения пролетных строений мостов и надстроек судов вызывают серьезную обеспокоенность во всем мире как на морских [1], [2], так и на внутренних водных путях (ВВП) [3]. Для повышения уровня безопасности судоходства используются различные подходы, например, обработка информации от автоматической идентификационной системы [4]. Известно об использовании численных методов для оценки повреждений [5] опор мостов от навала судов. В Санкт-Петербурге ежегодно наблюдаются ситуации опасного сближения с опорами мостов, несоблюдения нормативных запасов по высоте в судоходных пролетах как на магистралях Северо-Западного бассейна, так и на малых реках. Для обеспечения безопасности плавания на р. Неве дополнительно привлекают лоцманов [6], но на малых реках и каналах, по которым судоходство осуществляют речные пассажирские мелкосидящие теплоходы, такая практика не применяется.

В навигационный период 2023 г. на малых реках и каналах Санкт-Петербурга: Фонтанке, Мойке, Ждановке, канале Грибоедова, Крюковом канале, Зимней канавке и в Кронверкском проливе (рис. 1) был установлен более высокий уровень безопасности судоходства, чем наблюдаемый в предыдущие десятилетия. Такая возможность появилась, во-первых, благодаря присвоению этим водным путям (ВП) нового статуса — *внутренних водных путей регионального значения* и, во-вторых, благодаря принятию вполне логичного и достаточно обоснованного решения о передаче их на обслуживание, включая выполнение навигационно-гидрографического обеспечения (НГО) условий плавания судов и производство путевых работ, в соответствии с Кодексом внутреннего транспорта Российской Федерации от 07.03.2001 № 24-ФЗ¹ (КВВТ), крупному государственному специализированному предприятию, имеющему многолетний опыт работы по созданию и поддержанию безопасных судоходных условий на ВВП — Федеральному бюджетному учреждению «Администрация Волго-Балтийского бассейна внутренних водных путей» (ФБУ «Администрация «Волго-Балт»). В рамках своей компетенции ФБУ «Администрация «Волго-Балт» наряду с обеспечением безопасных судоходных условий на ВВП осуществляет государственный портовый контроль, содержание судов технического флота и инфраструктуры ВВП, диспетчерское регулирование, управление и мониторинг движением судов, организацию технологической связи в границах бассейна и др.

Необходимо отметить, что решению о передаче ФБУ «Администрация «Волго-Балт» на обслуживание и обеспечение безопасности судоходства наиболее востребованных для движения судов по водным путям г. Санкт-Петербурга предшествовал долгий и непростой путь, потребовавший изменения значительного перечня нормативно-правовых актов (НПА), в той или иной мере затрагивающих безопасность судоходства на ВВП. Так, в начале XXI в. неоднократно предпринимались попытки изменить статус водных путей города с целью повышения безопасности судоходства.

¹ Федеральный закон от 7 марта 2001 г. № 24-ФЗ «Кодекс внутреннего водного транспорта Российской Федерации» [Электронный ресурс]. Режим доступа: <https://kvvt.ru/> (дата обращения: 29.01.2024).

Мотивированные обращения, подготовленные различными заинтересованными организациями, направлялись в федеральные компетентные органы, ответственные за развитие морского и внутреннего водного транспорта (ВВТ), однако включить ВП г. Санкт-Петербурга в реестр ВВП не удалось. Основной причиной, по-видимому, является то, что эти ВП до сих пор имеют значение только для туризма и рекреационных целей, а для транзитного судоходства никакой ценности не представляют ввиду малых габаритов судовых ходов, не позволяющих использовать современные крупнотоннажные суда транспортного и пассажирского флота.

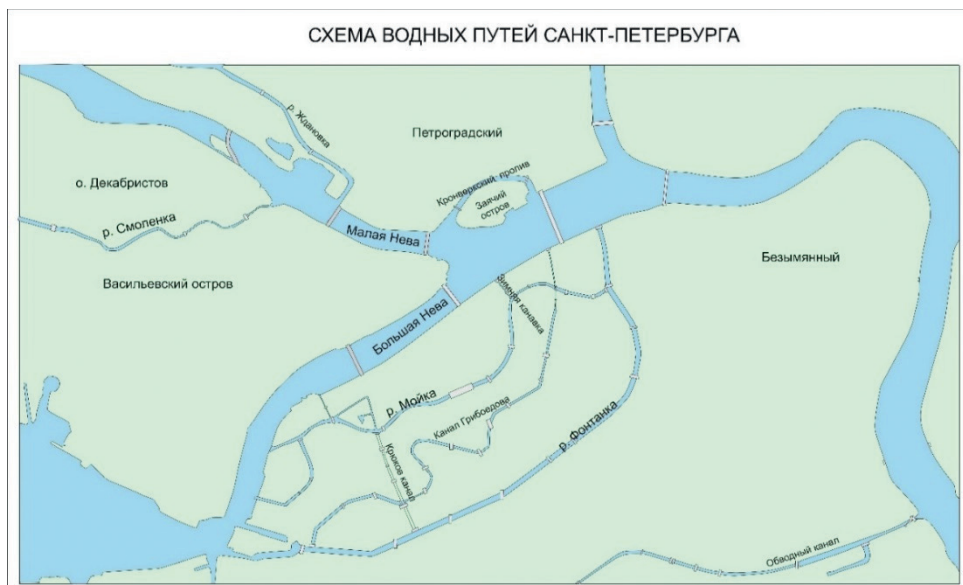


Рис. 1. Схема водных путей г. Санкт-Петербурга
Fig. 1. Scheme of St. Petersburg waterways

Поскольку ВП Санкт-Петербурга не относились к ВВП РФ, то, соответственно, на них не распространялось действие КВВТ и других подзаконных актов федерального уровня, относящихся к ВВП РФ. Обеспечить надлежащий уровень безопасности судоходства в таких условиях не представлялось возможным. При этом следует отметить, что г. Санкт-Петербург был не единственным российским регионом, ВП которого оказались в некотором «правовом вакууме». Кроме Санкт-Петербурга, еще в нескольких субъектах РФ, таких как республика Карелия, Красноярский край, Ханты-Мансийский автономный округ и некоторые другие, расположены участки ВП с незначительными габаритами, имеющие значение лишь для местного плавания судов, но практически непригодные для транзитного движения флота. На эти пути тоже не распространялись федеральные НПА, касающиеся безопасности судоходства, что также негативным образом сказывалось на безопасности плавания. Для решения возникших проблем подобного рода в первую очередь требовалось усовершенствование ряда НПА, касающихся безопасности судоходства.

Целью исследования является анализ соответствия судоходных условий на ВВП регионального значения г. Санкт-Петербурга действующим нормативно-правовым документам и поиск решений, направленных на повышение уровня безопасности судоходства.

Методы и материалы (Methods and Materials)

Вступление в силу Федерального закона «О внесении изменений в КВВТ и Федеральный закон «О приватизации государственного и муниципального имущества» от 03.07.2016 № 367-ФЗ позволило Правительству РФ при выполнении определенных условий причислить к ВВП регионального значения пригодные для судоходства ВП и не включенные в имеющийся реестр ВВП федерального значения. Более того, субъектам РФ позволили проводить софинансирование затрат на содержание не только региональных, но и федеральных ВВП. На основании изменений

КВВТ перечень ВВП, утвержденный Распоряжением Правительства РФ от 19 декабря 2002 г. № 1800-р, был дополнен разд. II ВВП регионального значения. Далее были разработаны и утверждены Постановлением Правительства РФ от 28 ноября 2017 г. № 1440 «Правила Формирования перечня ВВП РФ»¹. Подверглась изменениям также действующая классификация ВВП, она была не только дополнена определениями федеральных и региональных ВП, но и подразделена на семь различных категорий, каждая из которых теперь позволяет дать определение качественной характеристики габаритов судовых ходов и НГО условий плавания судов. Также были разработаны и утверждены Приказом Министерства транспорта (Минтранса) РФ от 08.04.2020 № 113 «Правила содержания судовых ходов и судоходных гидротехнических сооружений»². Прерогатива устанавливать для действующих федеральных и региональных ВВП ту или иную категорию была предоставлена «Росморречфлоту», являющемуся федеральным органом исполнительной власти, осуществляющим функции по оказанию государственных услуг, управлению государственным имуществом и выполняющим правоприменительные функции в сфере морского и речного транспорта.

После вступления в силу Распоряжения Правительства РФ от 16 апреля 2022 г. № 901-р³ реки Фонтанка, Мойка и Ждановка, канал Грибоедова, Крюков канал, Зимняя канавка и Кронверкский пролив были включены в перечень ВВП регионального значения в границах, указанных в табл. 1.

Таблица 1

Границы ВВП регионального значения г. Санкт-Петербурга

Наименование ВВП	Протяженность по оси судового хода, км	Верхняя граница ВВП с указанием координат	Нижняя граница ВВП с указанием координат
Река Фонтанка	6,87	Верхняя кромка Прачечного моста 59°56' 52,220" с. ш., 30°20' 10,116" в. д., 59°56' 52,740" с. ш., 30°20' 12,366" в. д.	Устье реки Нева в границах морского порта «Большой порт Санкт-Петербург» № 3729 и № 3730): 59°54' 59,805" с. ш., 30°15' 49,164" в. д., 59°54' 56,774" с. ш., 30°15' 47,266" в. д.
Река Мойка	4,69	Верхняя кромка 1-го Инженерного моста 59°56' 30,840" с. ш., 30°20' 15,936" в. д., 59°56' 30,200" с. ш., 30°20' 16,786" в. д.	Устье (р. Нева границы морского порта «Большой порт Санкт-Петербург» № 3657 и № 3658): 59°55' 35,132" с. ш., 30°16' 24,245" в. д., 59°55' 32,745" с. ш., 30°16' 21,997" в. д.
Канал Грибоедова	5,02	Верхняя кромка Театрального моста: 59°56' 29,809" с. ш., 30°19' 44,645" в. д., 59°56' 29,559" с. ш., 30°19' 45,085" в. д.	Нижняя кромка Мало-Калинкина моста: 59°55' 00,020" с. ш., 30°16' 52,876" в. д., 59°55' 00,060" с. ш., 30°16' 51,626" в. д.

¹ Постановление Правительства РФ от 28 ноября 2017 г. N 1440 «Об утверждении Правил формирования перечня внутренних водных путей Российской Федерации» [Электронный ресурс]. Режим доступа: <https://base.garant.ru/71821036/?ysclid=lrz5h0bilx866587404> (дата обращения: 29.01.2024).

² Приказ Министерства транспорта Российской Федерации от 08.04.2020 № 113 «Об утверждении правил содержания судовых ходов и судоходных гидротехнических сооружений» [Электронный ресурс]. Режим доступа: <https://base.garant.ru/74246284/?ysclid=lrz74ncdtv100406822> (дата обращения: 29.01.2024).

³ Распоряжение Правительства РФ от 16.04.2022 № 901-р «О внесении изменений в распоряжение Правительства РФ от 19.12.2002 № 1800-р» [Электронный ресурс]. Режим доступа: <http://government.ru/docs/all/140389/> (дата обращения: 29.01.2024).

Таблица 1
(Окончание)

Крюков канал	1,15	Верхняя кромка Матвеева моста: 59°55' 39,860" с. ш., 30°17' 36,896" в. д., 59°55' 39,960" с. ш., 30°17' 38,186" в. д.	Нижняя кромка Смежного моста 59°55' 05,080" с. ш., 30°18' 03,556" в. д., 59°55' 05,360" с. ш., 30°18' 04,636" в. д.
Зимняя канавка	0,25	Верхняя кромка Эрмитажного моста 59°56' 33,551" с. ш., 30°19' 00,657" в. д., 59°56' 33,741" с. ш., 30°19' 01,137" в. д.	Нижняя кромка 2-го Зимнего моста 59°56' 26,891" с. ш., 30°19' 10,476" в. д., 59°56' 27,331" с. ш., 30°19' 10,886" в. д.
Кронверкский пролив	1,26	Исток 59°57' 03,841" с. ш., 30°19' 30,737" в. д., 59°57' 00,890" с. ш., 30°19' 22,397" в. д.	Устье 59°56' 54,840" с. ш., 30°18' 24,216" в. д., 59°56' 53,310" с. ш., 30°18' 32,937" в. д.
Река Ждановка	2,26	Исток 59°57' 00,931" с. ш., 30°17' 12,614" в. д., 59°57' 02,108" с. ш., 30°17' 08,846" в. д.	Устье 59°57' 48,590" с. ш., 30°15' 49,688" в. д., 59°57' 47,859" с. ш., 30°15' 44,629" в. д.

Результаты (Results)

Приказом Минтранса РФ от 16 июня 2022 г. № 229¹ указанные в табл. 1 ВВП были включены в границы Волго-Балтийского бассейна, после чего обязанность их содержания была возложена на ФБУ «Администрация «Волго-Балт». После многочисленных переговоров Комитета по транспорту Правительства г. Санкт-Петербурга и «Росморречфлота» и обсуждения различных вариантов решения сторонам в рамках совместного сотрудничества удалось заключить соглашение, в котором на период навигации 2023 г. была установлена вторая категория ВВП, предусматривающая обеспечение гарантированных габаритов судовых ходов и наличие судоходной обстановки со светоотражательными навигационными знаками. Оказалось, что установить оптимальные габариты судовых ходов на ВВП регионального значения г. Санкт-Петербурга является непростой задачей, которую необходимо было решить в достаточно короткий срок. Для этого была проведена совместная работа инженеров-путейцев ФБУ «Администрация «Волго-Балт» и ученых Государственного университета морского и речного флота имени адмирала С. О. Макарова.

В ходе решения поставленной задачи были применены современные методы математического моделирования, в которых исходными данными являлись обработанные в ходе камеральной обработки данные высокоточных площадных промеров глубин, выполненных изыскательской партией Невско-Ладожского района водных путей и судоходства с помощью одного из наиболее современных комплексов телекоммуникационного оборудования, используемого для производства НГО на ВВП. В процессе выполнения промеров глубин применялся режим кинематики в реальном времени, хорошо зарекомендовавший себя при производстве гидрографических работ на ВВП. Подробно этот режим был рассмотрен в [7]–[9]. Исходными данными для математического моделирования также являлись материалы многолетних гидрологических наблюдений. Расчетные значения гарантированных габаритов судовых ходов, полученные в результате модельного эксперимента, приведены в табл. 2.

¹ Приказ Министерства транспорта Российской Федерации от 16.06.2022 № 229 «О внесении изменений в приложение к приказу Министерства транспорта Российской Федерации от 17 августа 2012 г. № 316 «Об определении бассейнов внутренних водных путей Российской Федерации». [Электронный ресурс]. Режим доступа: <http://publication.pravo.gov.ru/Document/View/0001202209010027?ysclid=lrz6pizqf6292647341> (дата обращения: 29.01.2024).

**Гарантированные габариты судовых ходов ВВП
регионального значения г. Санкт-Петербурга**

Наименование участка ВВП	Гарантированные габариты судового хода		
	Глубина, м	Ширина, м	Радиус закругления, м
р. Фонтанка	1,0	14	100
р. Мойка	1,0	14	50
Канал Грибоедова	1,0	10	40
Крюков канал	1,0	10	20
Зимняя канавка	1,0	6	20
Кронверкский пролив	1,0	14	50
р. Ждановка	1,0	14	40

Таким образом, благодаря многолетним усилиям специалистов различных министерств и ведомств удалось усовершенствовать основные НПА в области безопасности судоходства [10]. Вследствие этого появилась возможность распространить федеральное законодательство в части обеспечения безопасности судоходства ВВТ на ВВП регионального значения. В свою очередь применение научно-обоснованных решений помогло определить оптимальные габариты судовых ходов для р. Фонтанки, р. Мойки, р. Ждановки, канала Грибоедова, Крюкова канала и Зимней канавки. Комплекс проведенных организационно-правовых мероприятий и научных исследований обеспечил повышение уровня безопасности судоходства на указанных ВВП.

Обсуждение (Discussion)

Общий уровень безопасности судоходства на ВВП РЗ Санкт-Петербурга, без сомнения, был значительно повышен. Однако при этом осталась не до конца решенная задача обеспечения безопасного прохождения судами мостовых переходов. Так, практически на всех мостах, число которых превышает 60 единиц, отсутствует та или иная часть навигационных знаков. Кроме того, большая часть навигационных знаков, установленных на мостах, не соответствует действующим нормативным документам^{1, 2, 3}. Почти на всех мостах либо отсутствуют, либо имеют несоответствие следующие навигационные знаки судоходных пролетов мостов:

- соблюдение надводного габарита;
- указатели высоты подмостовых габаритов и кромок судового хода в судоходных пролетах мостов;
- положение расчетного судоходного уровня (РСУ) или максимального судоходного уровня воды на опорах мостов.

Известно, что подмостовой габарит судоходного пролета моста, как правило, представляет собой прямоугольное очертание пространства, свободное от каких-либо выступающих элементов конструкции или устройств и расположенное перпендикулярно оси судового хода или под некоторым углом, незначительно отличающимся от перпендикуляра. Большинство переправ через ВВП регионального значения Санкт-Петербурга выполнены в виде арочной конструкции из каменных материалов (рис. 2) либо имеют металлический нижний пояс в виде арочного или криволинейного очертания (рис. 3).

¹ Приказ Министерства транспорта РФ от 19 января 2018 г. № 19 «Об утверждении Правил плавания судов по внутренним водным путям» [Электронный ресурс]. Режим доступа: <http://publication.pravo.gov.ru/Document/View/0001201803070023> (дата обращения: 31.01.2024).

² ГОСТ 26775–97. Габариты подмостовые судоходных пролетов мостов на внутренних водных путях. Нормы и технические требования. М., 1997. 22 с.

³ ГОСТ 26600–98. Знаки навигационные внутренних судоходных путей. Общие технические условия. М.: Изд-во стандартов, 2001. 32 с.



Рис. 2. Казанский мост арочной конструкции через канал Грибоедова
(фото из личного архива авторов)

Fig. 2. Kazan Bridge of arched design across the Griboyedov Canal
(photo from the authors' personal archive)

На мостах такой конструкции обязательно должны устанавливаться навигационные знаки, обозначающие кромки подмостового габарита, которые позволяют судоводителям безошибочно визуальное определять границы судоходных пролетов мостов, безопасные для прохода судов. Цветовые схемы и размеры знаков, необходимых для установки в судоходных пролетах мостов, приведены в ГОСТе 26600–98. При этом до настоящего времени не установлены знаки указателей кромок, а знаки соблюдения надводных габаритов в нарушение действующих требований указывают не высоту подмостового габарита от РСУ или максимального судоходного уровня, а максимальную высоту арки моста от проектного уровня воды, что не обеспечивает безопасный проход судов. Кроме того, до сих пор не только не установлены знаки положения РСУ или максимального судоходного уровня, но и не определены отметки этих уровней.



Рис. 3. Первый Инженерный мост с металлическим нижним поясом арочного вида
(фото из личного архива авторов)

Fig. 3. The First Engineering Bridge with an arched metal lower chord
(photo from the authors' personal archive)

Заключение (Conclusion)

Несмотря на повышение уровня безопасности судоходства на ВВП РЗ в г. Санкт-Петербурге, связанного с изменением их статуса и распространением на них действующих НПА ВВТ, определением оптимальных габаритов судовых ходов и поддержанием их необходимого технического состояния в течение навигационного периода, проведением НГО, путевых и других видов работ в соответствии с действующими руководящими документами, организацией мониторинга и диспетчерского регулирования судов, государственного портового контроля, создания и обслуживания инфраструктуры ВВП, необходимо в полном объеме решить задачу обеспечения безопасного прохождения судов под мостами. Для этого в первую очередь следует определить РСУ или максимальный судоходный уровень для всех переправ, методика определения которых достаточно подробно изложена в ГОСТе 26775–97¹, и привести в надлежащее состояние навигационную сигнализацию судоходных пролетов мостов. Такая обязанность, в соответствии с п. 2 ст. 9 КВВТ, возложена на владельцев мостов.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Guo J. Probability Analysis of Aberrant Ship Collision with Sea-Crossing Bridges Considering Wind and Current / J. Guo, L. Qiu, J. Wu, J. Wang // *Journal of Bridge Engineering*. — 2022. — Vol. 27. — Is. 11. — Pp. 04022108. DOI: 10.1061/(ASCE)BE.1943-5592.0001958.
2. Pedersen P. T. Design of bridges against ship collisions / P. T. Pedersen, J. Chen, L. Zhu // *Marine Structures*. — 2020. — Vol. 74. — Pp. 102810. DOI: 10.1016/j.marstruc.2020.102810.
3. Mansuy M. Simulation study to assess the maximum dimensions of inland ships on the river Seine in Paris / M. Mansuy, M. Candries, K. Eloit, S. Page // *Smart Rivers*. — Singapore: Springer Nature Singapore, 2022. — Pp. 186–200. DOI: 10.1007/978-981-19-6138-0_17.
4. Wu X. Estimate travel time of ships in narrow channel based on AIS data / X. Wu, U. Roy, M. Hamidi, B. N. Craig // *Ocean Engineering*. — 2020. — Vol. 202. — Pp. 106790. DOI: 10.1016/j.oceaneng.2019.106790.
5. Gholipour G. Nonlinear numerical analysis and progressive damage assessment of a cable-stayed bridge pier subjected to ship collision / G. Gholipour, C. Zhang, A. A. Mousavi // *Marine Structures*. — 2020. — Vol. 69. — Pp. 102662. DOI: 10.1016/j.marstruc.2019.102662.
6. Биргер А. Я. Вопросы организации лоцманской проводки судов (составов) через разводные пролёты мостов Санкт-Петербурга во время их разводки / А. Я. Биргер, В. В. Каретников // *Вестник Государственного университета морского и речного флота имени адмирала С. О. Макарова*. — 2023. — Т. 15. — № 4. — С. 557–566. DOI: 10.21821/2309-5180-2023-15-4-557-566.
7. Леонов В. Е. Современные методы исследований и обработки экспериментальных данных для потребностей морского и внутреннего водного транспорта / В. Е. Леонов, В. И. Дмитриев. — М: ООО «МОР-КНИГА», 2021. — 337 с.
8. Каретников В. В. Использование современных телекоммуникационных средств для навигационно-гидрографического обеспечения судоходства на внутренних водных путях России / В. В. Каретников, С. В. Рудых, М. А. Петров // *Морская радиоэлектроника*. — 2016. — № 3 (57). — С. 12–15.
9. Миляков Д. Ф. Первый опыт использования высокоточных систем местоопределения на внутренних водных путях России / Д. Ф. Миляков, С. В. Рудых, И. В. Пашенко, В. В. Козлов // *Морская радиоэлектроника*. — 2018. — № 3 (65). — С. 14–17.
10. Пумбрасова Н. В. Маломерный речной транспорт в городских пассажирских перевозках как перспективное направление решения проблем городского общественного пассажирского транспорта / Н. В. Пумбрасова, Е. О. Дубова // *Научные проблемы водного транспорта*. — 2013. — № 35. — С. 299–303.

REFERENCES

1. Guo, Jian, Liqi Qiu, Jiyi Wu, and Jinhui Wang. “Probability Analysis of Aberrant Ship Collision with Sea-Crossing Bridges Considering Wind and Current.” *Journal of Bridge Engineering* 27.11 (2022): 04022108. DOI: 10.1061/(ASCE)BE.1943-5592.0001958.

¹ ГОСТ 26775–97. Габариты подмостовые судоходных пролетов мостов на внутренних водных путях. Нормы и технические требования. М., 1997. 22 с.

2. Pedersen, Preben Terndrup, Jun Chen, and Ling Zhu. "Design of bridges against ship collisions." *Marine Structures* 74 (2020): 102810. DOI: 10.1016/j.marstruc.2020.102810.
3. Mansuy, Marc, Maxim Candries, Katrien Eloot, and Sebastien Page. "Simulation study to assess the maximum dimensions of inland ships on the river Seine in Paris." *Smart Rivers*. Singapore: Springer Nature Singapore, 2022. 186–200. DOI: 10.1007/978-981-19-6138-0_17.
4. Wu, Xing, Uttara Roy, Maryam Hamidi, and Brian N. Craig. "Estimate travel time of ships in narrow channel based on AIS data." *Ocean Engineering* 202 (2020): 106790. DOI: 10.1016/j.oceaneng.2019.106790.
5. Gholipour, Gholamreza, Chunwei Zhang, and Asma Alsadat Mousavi. "Nonlinear numerical analysis and progressive damage assessment of a cable-stayed bridge pier subjected to ship collision." *Marine Structures* 69 (2020): 102662. DOI: 10.1016/j.marstruc.2019.102662.
6. Birger, Arkady Ya., and Vladimir V. Karetnikov. "Issues of organizing vessels pilotage through the draw-bridges spans in St. Petersburg." *Vestnik Gosudarstvennogo universiteta morskogo i rechnogo flota imeni admirala S. O. Makarova* 15.4 (2023): 557–566. DOI: 10.21821/2309-5180-2023-15-4-557-566.
7. Leonov, V. E., and V. I. Dmitriev. *Sovremennyye metody issledovaniy i obrabotki eksperimental'nykh daniy dlya potrebnostey morskogo i vnutrennego vodnogo transporta*. M: OOO "MORKNIGA", 2021.
8. Karetnikov, V. V., S. V. Rudykh, and M. A. Petrov. "The use of modern telecommunication equipments for shipping condition on the inland waterways of the Russian Federation." *Marine radio-electronics* 3(57) (2016): 12–15.
9. Milyakov, D. F., S. V. Rudykh, I. V. Paschenko, and V. V. Kozlov. "First experience of use of high-precise positioning systems for inland waters." *Marine radio-electronics* 3(65) (2018): 14–17.
10. Pumbrasova, N. V., and E. O. Dubova. "Small river transport in urban passenger transport, as a promising solutions to the problems of urban public passenger transport." *Bulletin of VSAWT* 35 (2013): 299–303.

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

Агеев Сергей Александрович —
доктор технических наук,
старший научный сотрудник
ФГБОУ ВО «ГУМРФ имени адмирала
С. О. Макарова»
198035, Российская Федерация, Санкт-Петербург,
ул. Двинская, 5/7
e-mail: ageevsa@gumrf.ru

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

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

INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Ageev, Sergei A. —
Dr. of Technical Sciences,
Senior Researcher
Admiral Makarov State University of Maritime
and Inland Shipping
5/7 Dvinskaya Str., St. Petersburg 198035,
Russian Federation
e-mail: ageevsa@gumrf.ru

Karetnikov, Vladimir 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: karetnikovvv@gumrf.ru

Rudykh, Sergei V. —
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: rudyhsv@gumrf.ru

Статья поступила в редакцию 18 апреля 2024 г.
Received: April 18, 2024.

DOI: 10.21821/2309-5180-2024-16-3-379-390

SIMULATION MODEL OF PRESTACKING AT THE SEAPORT CONTAINER TERMINAL

T. E. Malikova¹, E. E. Petrova²

¹ — Maritime State University named after Admiral G. I. Nevelskoi,
Vladivostok, Russian Federation

² — Far Eastern State Technical Fisheries University, Vladivostok, Russian Federation

Automation and digitalization of both the entire process and components of technological operations of the terminal are one of the conditions for the balanced development of the port infrastructure of the Russian Federation. Container transshipment in the warehouse area is the most labor-intensive and frequently performed auxiliary operation of the technological process of any container terminal. That is why development of advanced driver assistance systems for mobile reloading equipment based on a digital twin of this operation is in high demand from the point of view of the terminal digitalization. The object of the study is the technological process of containers transshipment in the operating areas of the terminal with formation of auxiliary stacks to speed up the transfer of goods by the different transport means, as well as carrying out other auxiliary operations. The reloader performs the operation of partially dismantling the operational stack with removal from it of a certain number of target containers that make up the logistics flow of cargo moved to the auxiliary stack with the subsequent return of the blocking containers back to their previous stacks of the operational stack. The research method is the modeling of scenarios depending on the sequence of possible states of the simulated technological process. The used mathematical apparatus is automatic programming. The modeling tools are deterministic finite state machine. The main goal of developing the model is to convert the loader control function when performing a selective search operation for containers in an operational stack into a digital code, i. e. mapping the sequence of its possible states into a sequence of characters in the control line of the machine. The result of the study is a digital simulation model of the operation of selective removal of containers from the operational stack with implementation of the work scheme based on the principle of complete disassembly of blocking stacks and removal of containers only from the nearest row, as well as proof of the adequacy of the transition diagram of the finite state machine to the functioning mechanism of the simulated operation. The virtual environment of the automated control system for a mobile loader operating in the rear zone is the place where the digital model of selective removal of containers is used in the architecture of the digital twin of the container terminal. The main advantage of using this version of the finite state machine as an element of the automated control system is that there is no need to urgently interrupt the technological process to adjust operation of the loader at work positions.

Keywords: Digitalization of cargo operations, technological process, simulation modeling, container movement, digital twin, control system.

For citation:

Malikova, Tatiana E., and Ekaterina E. Petrova. "Simulation model of prestacking at the seaport container terminal." *Vestnik Gosudarstvennogo universiteta morskogo i rechnogo flota imeni admirala S. O. Makarova* 16.3 (2024): 379–390. DOI: 10.21821/2309-5180-2024-16-3-379-390.

УДК 519.711.3:656.073.28

ИМИТАЦИОННАЯ МОДЕЛЬ ПРЕСТАКИНГА НА КОНТЕЙНЕРНОМ ТЕРМИНАЛЕ МОРСКОГО ПОРТА

Т. Е. Маликова¹, Е. Е. Петрова²

¹ — Морской государственный университет имени адмирала Г. И. Невельского,
г. Владивосток, Российская Федерация

² — Дальневосточный государственный технический рыбохозяйственный университет,
г. Владивосток, Российская Федерация

Темой исследования является одно из условий сбалансированного развития портовой инфраструктуры Российской Федерации: автоматизация и цифровизация как терминального процесса в целом, так

и отдельных составляющих его технологических операций. Отмечается, что перевалка контейнеров в складской зоне является самой трудоемкой и часто выполняемой вспомогательной операцией технологического процесса любого контейнерного терминала. Поэтому разработка наиболее часто используемых систем помощи водителю мобильной перегрузочной техники на основе цифрового двойника данной операции является востребованной с точки зрения цифровизации терминала. Объектом исследования является технологический процесс перевалки контейнеров в операционных зонах терминала с формированием вспомогательных штабелей для ускорения операции передачи грузов различными видами транспорта, а также осуществления других вспомогательных операций. При этом перегружатель выполняет операцию частичного расформирования операционного штабеля с изъятием из него некоторого числа целевых контейнеров, составляющих перемещаемый во вспомогательный штабель логистический поток груза, с последующим возвратом блокирующих контейнеров назад в их прежние стеки операционного штабеля. Методом исследования в работе является моделирование сценариев в зависимости от последовательности возможных состояний моделируемого технологического процесса, используемым математическим аппаратом — автоматное программирование, инструментом моделирования — детерминированный конечный автомат. Основной целью разработки модели служит преобразование функции управления погрузчиком при выполнении операции селективного поиска контейнеров в операционном штабеле в цифровой код, т. е. отображение последовательности его возможных состояний в последовательность символов управляющей строки автомата. Результатом исследования являются цифровая имитационная модель операции селективной выемки контейнеров из операционного штабеля с реализацией схемы работы по принципу полного разбора блокирующих стеков и выемки контейнеров только из ближнего ряда, а также доказательство адекватности диаграммы переходов конечного автомата к механизму функционирования моделируемой операции. Местом использования цифровой модели операции селективной выемки контейнеров в архитектуре цифрового двойника контейнерного терминала выбрана виртуальная среда системы автоматизированного управления мобильным перегружателем, работающим в тыловой зоне. Основным преимуществом использования данного варианта конечного автомата как элемента автоматизированной системы управления мобильным перегружателем является отсутствие необходимости экстренного прерывания технологического процесса для отладки работы последнего на рабочих позициях.

Ключевые слова: цифровизация грузовой операции, технологический процесс, имитационное моделирование, перемещение контейнеров, цифровой двойник, система управления.

Для цитирования:

Маликова Т. Е. Имитационная модель престакинга на контейнерном терминале морского порта / Т. Е. Маликова, Е. Е. Петрова // Вестник Государственного университета морского и речного флота имени адмирала С. О. Макарова. — 2024. — Т. 16. — № 3. — С. 379–390. DOI: 10.21821/2309-5180-2024-16-3-379-390.

Введение (Introduction)

Необходимым условием сбалансированного развития портовой инфраструктуры Российской Федерации является сквозная цифровизация транспортной цепочки доставки грузов и роботизация логистических операций, а также автоматизация и цифровизация терминальных операционных процессов [1]. Перевалка контейнеров в складской зоне с формированием вспомогательных штабелей для грузопотоков морского и сухопутного грузовых фронтов является самой трудоемкой и часто выполняемой вспомогательной операцией технологического процесса любого контейнерного терминала [2], [3]. Поэтому разработка продвинутых систем помощи водителю мобильной перегрузочной техники на основе цифрового двойника данной операции наиболее востребована с точки зрения цифровизации транспортной цепочки доставки грузов.

Актуальность и необходимость выполнения научных исследований в области автоматизация и цифровизация терминальных операционных процессов подтверждена результатами исследований [4]–[10], анализ которых убедительно доказал, что все существующие немногочисленные сценарии обработки операционного штабеля характеризуются общими недостатками: достаточно ограниченной функциональностью, повышенной трудоемкостью, обусловленной наличием непроизводительных операций, и, соответственно, большой продолжительностью выполнения операций транспортирования контейнеров между операционными зонами контейнерного терминала [11]–[13].

В связи с объективной необходимостью цифровизации операционных процессов контейнерного терминала в работе решена техническая задача, заключающаяся в разработке цифровой модели престакинга [14], [15] для слоя *виртуальное пространство цифрового двойника* [16], операции поиска и выемки целевых контейнеров в операционном штабеле.

Методы и материалы (Methods and Materials)

Методом исследования является моделирование сценариев в зависимости от последовательности возможных состояний моделируемого технологического процесса. Используемым математическим аппаратом в работе служит автоматное программирование, инструментом моделирования — детерминированный конечный автомат (ДКА). Основной целью разработки ДКА является преобразование функции управления погрузчиком при выполнении операции селективного поиска контейнеров в операционном штабеле в цифровой код [17], т. е. отображение последовательности его возможных состояний в последовательность символов управляющей строки из языка программирования его системы управления.

Известный способ выполнения операции престакинга [18], принятый за прототип, заключается в том, что с помощью строки символов (цифрового кода) управления ДКА первоначально задают местоположение погрузчика возле штабеля и целевых контейнеров, затем определяют число и местоположение блокирующих контейнеров, производят перемещение погрузчика к заданному стеку, вынимают блокирующие, вынимают и вывозят целевые контейнеры, возвращают блокирующие контейнеры в исходный стек. При этом в блоке управления погрузчиком как технологическим автоматом [19] запрограммирован цифровой код схемы работы с частичной разборкой штабеля и выемкой целевого контейнера через ряды. Данная схема предполагает использование ричстакера, требует формирования ступенчатого штабеля с уменьшающимся количеством ярусов по мере удаления ряда с целевым контейнером из-за длины вылета стрелы (рис. 1).

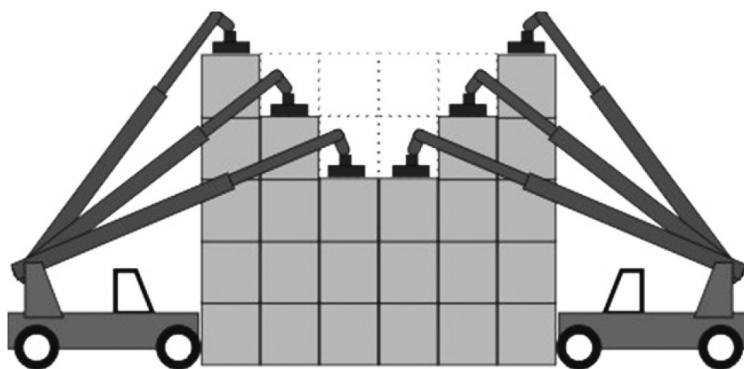


Рис. 1. Формирование штабеля под схему работы ричстакера через ряды (ступенчатая форма штабеля)

Fig. 1. Formation of a stack according to the reach-stacker operating scheme through rows (stepped stack shape)

В работе [20] доказано, что выемка целевых контейнеров из глубины штабеля посредством грузовой стрелы погрузчика в ряде случаев (при большом весе контейнера с грузом) опасна ввиду возможного смещения центра тяжести погрузчика и создания тем самым аварийной ситуации. При подъеме из глубины штабеля условно тяжелого контейнера происходит срабатывание механизмов защиты ричстакера, и операция прекратится на этапе захвата груза, т. е. отрыв груза спредером не будет выполнен. Прерывание операции выемки контейнеров через ряды на любом из ее этапов требует отладки работы погрузчика на рабочей позиции, что приводит к нарушению одного из важных принципов автоматизации — принципа «безотладочной» технологии.

В случае экстренной остановки на рабочей позиции выемка тяжелого контейнера, например, из второго поперечного ряда, погрузчику необходимо выполнить полный разбор первого

поперечного ряда блокирующих контейнеров, т. е. перейти к схеме работы с ближним рядом с полным разбором блокирующих стеков. Кроме того, при разборе штабеля из четырех поперечных рядов требуется наличие двух погрузчиков для одновременной работы с обеих его сторон (см. рис. 1), однако при этом не обеспечивается возможность выемки целевого контейнера при количестве поперечных рядов пять и более, что существенно ограничивает функциональность способа выполнения операции престакинга под управлением ДКА с цифровым кодом схемы операции «частичный разбор штабеля и выемка целевого контейнера через ряды».

Интерпретация символов кортежа ДКА

Множество	Элемент	Интерпретация
Q	q_1	Погрузчик перемещается вдоль рядов штабеля (продольных вправо)
	q_2	Погрузчик разбирает продольный ряд
	q_3	Погрузчик продвигается вглубь штабеля
	q_4	Погрузчик разбирает поперечный ряд
	q_5	Контейнер вывезен
	q_6	Погрузчик возвращает контейнер в поперечный ряд
	q_7	Погрузчик перемещается на один шаг назад
	q_8	Погрузчик возвращает контейнер в продольный ряд
Σ	●	Переместиться на один ряд вправо
	×	Снять контейнер в продольном ряду
	◇	Переместиться на один шаг вглубь штабеля
	∨	Снять контейнер из поперечного ряда
	▢	Вывести контейнер во вспомогательный штабель
	○	Вернуть контейнер в поперечный ряд
	◎	Переместиться на один шаг назад
	★	Вернуть контейнер в продольный ряд
	q_0	Нахождение погрузчика возле первого левого ряда (автомат в начальной вершине графа q_1)
F	f_1	Погрузчик перемещается на один ряд
	f_2	Погрузчик вынимает один контейнер из продольного ряда штабеля
	f_3	Погрузчик продвигается на один шаг вглубь штабеля
	f_4	Погрузчик вынимает один контейнер из поперечного ряда штабеля
	f_5	Вывоз контейнера во вспомогательный штабель
	f_6	Погрузчик возвращает один контейнер в поперечный ряд штабеля
	f_7	Погрузчик перемещается на один шаг назад
	f_8	Погрузчик возвращает один контейнер в продольный ряд штабеля

Для устранения указанных недостатков предлагается изменить цифровой код ДКА, принятого за прототип [18], на код (схему работы) операции «полный разбор блокирующих стеков и выемка контейнеров только из ближнего ряда, иными словами, расширить множество входных символов Σ , а также изменить последовательность состояний Q в функции переходов δ ДКА (рис. 2 и таблица). Вносимые дополнения в цифровую модель ДКА выделены в таблице фоном.

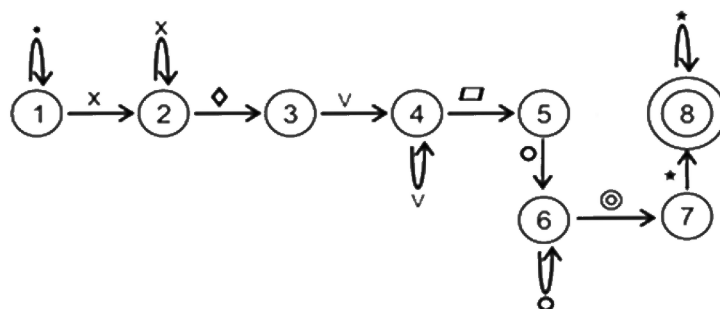


Рис. 2. Диаграмма переходов технологической схемы работы перегружателя с полным разбором блокирующих стеков
Fig. 2. Transition diagram of the technological scheme of the reloader operation with a complete disassembly of blocking stacks

Преобразование функции управления погрузчиком при выполнении операции селективного поиска контейнеров в операционном штабеле в цифровой код предложено осуществлять с использованием ДКА схемы операции полного разбора блокирующих стеков и выемки контейнеров только из ближнего ряда, заданного диаграммой переходов δ , приведенной на рис. 2, а также кортежем, состоящим из четырех множеств:

- множества состояний $Q\{q_1; q_2; q_3; q_4; q_5; q_6; q_7; q_8\}$;
- множества входных символов $\Sigma\{\bullet; \times; \diamond; \nabla; \square; \circ; \odot; \star\}$;
- начального состояния q_0 ;
- множества допускающих состояний $F\{f_1; f_2; f_3; f_4; f_5; f_6; f_7; f_8\}$.

Интерпретация символов каждого из указанных множеств приведена таблице.

Результаты (Results)

Оценка адекватности диаграммы переходов ДКА. Выполним оценку адекватности диаграммы переходов ДКА операции выемки контейнеров с полным разбором стеков, т. е. проверим качественную адекватность: соответствие отображения (см. рис. 2) механизму функционирования погрузчика, полностью разбирающего блокирующие стеки и вынимающего контейнеры только из ближнего к его передней колесной паре ряда.

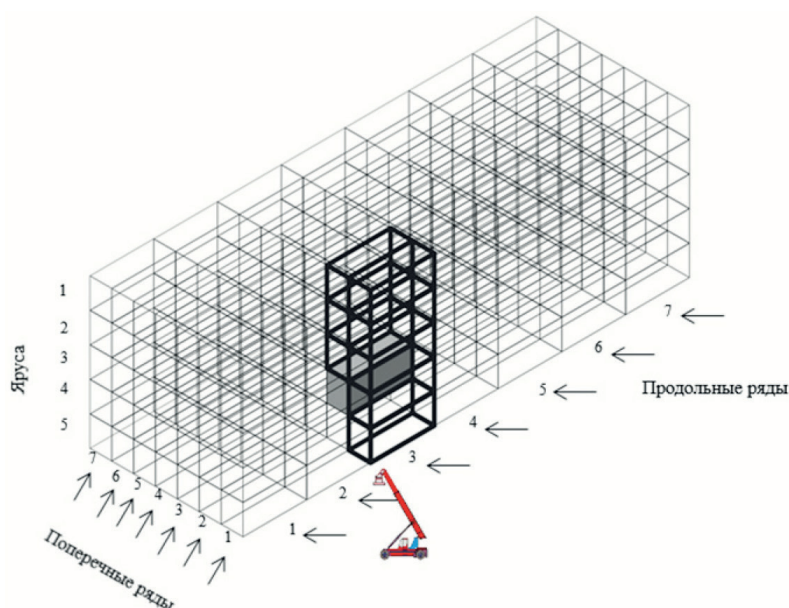


Рис. 3. Расположение целевого и блокирующих контейнеров в штабеле
Fig. 3. Location of target and blocking containers in a stack

Пусть целевой контейнер расположен в третьем продольном ряду и в четвертом ярусе второго поперечного ряда штабеля (рис. 3), т. е. координаты его местоположения в штабеле записываются как (3, 4, 2). Необходимо под управлением ДКА выполнить следующие действия:

- полностью разобрать стек с блокирующими контейнерами (обозначен на рис. 3 жирными линиями);
- снять три блокирующих контейнера, расположенных над целевым контейнером (показаны на рис. 3 жирными линиями);
- снять и вывести целевой контейнер во вспомогательный штабель;
- вернуть три контейнера на их прежнее место во второй поперечный ряд;
- вернуть пять контейнеров в третий продольный ряд, т. е. восстановить стек из пяти блокирующих контейнеров с учетом их прежнего местоположения в штабеле.

Для выполнения поставленной задачи в автомат подается последовательность входных символов $s_1, s_2, \dots, s_n$. Обозначим эту последовательность как строку S_{ijk} , где i -й индекс соответствует порядковому номеру продольного ряда ($i = \overline{1; n}$), j -й индекс — порядковому номеру яруса штабеля ($j = \overline{1; 5}$), k -й индекс — порядковому номеру поперечного ряда ($k = \overline{1; 2}$). Таким образом, в автомат будет подаваться строка управления S_{342} (рис. 4).

S	3	4	2	●	●	×	×	×	×	×	◇	V	V	V	V	▱	○	○	○	◎	★	★	★	★	★
---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---

Рис. 4. Строка управления S_{342} , составленная из элементов множества входных символов Σ конечного автомата

Fig. 4. Control line S_{342} , composed of elements of the set of input symbols Σ of the finite machine

Начальное состояние автомата q_0 определено как «нахождение погрузчика возле первого продольного ряда (автомат находится в начальной вершине графа q_1)», т. е. в первой вершине графа (см. рис. 2). Для того, чтобы погрузчик мог осуществить выемку целевого контейнера из четвертого яруса второго поперечного ряда, необходимо сначала убрать блокирующие контейнеры, показанные на рис. 3 жирными линиями. Полностью разбираем стек с блокирующими контейнерами. При обработке первых двух символов (см. рис. 4) ДКА два раза пройдет по петле вершины q_1 и в результате останется в этой вершине (см. рис. 2). За один проход автомата по петле с символом ● погрузчик перемещается на один ряд вправо (см. таблицу). Таким образом, за два прохода по данной петле погрузчик переместится и займет положение напротив третьего продольного ряда штабеля (рабочее положение погрузчика для разбора стека с блокирующими контейнерами).

После обработки следующего символа строки управления $s_3 = \times$ автомат перейдет по ребру во вторую вершину диаграммы переходов (см. рис. 2), а погрузчик выполнит выемку верхнего блокирующего контейнера, расположенного в первом продольном ряду (см. рис. 3). При последовательной обработке последующих символов строки управления $s_{4-7} = \times$ ДКА выполнит четыре прохода по петле вершины q_2 и останется в этой вершине (см. рис. 2), а погрузчик, согласно соответствующим командам строки управления (см. рис. 4), снимет второй – пятый блокирующие контейнеры в продольном ряду (см. табл. 1). Стек с блокирующими контейнерами разобран (см. рис. 3). Удалим три блокирующих контейнера в стеке, где размещен целевой контейнер. После обработки следующего символа строки управления $s_8 = \diamond$ автомат совершит переход по ребру в третью вершину графа (см. рис. 2), а погрузчик переместится на один ряд вглубь штабеля (см. табл. 1), т. е. займет рабочую позицию — *разбор второго (ближнего) поперечного ряда штабеля*.

Следующий символ строки управления $s_9 = V$ даст автомату команду перейти по ребру в четвертую вершину (см. рис. 2), а погрузчик выполнит снятие первого блокирующего контейнера (см. таблицу), расположенного в первом продольном ряду и в первом ярусе второго поперечного ряда (см. рис. 3). При последовательной обработке следующих двух символов строки управления

$s_{10-11} = V$ ДКА пройдет два раза по петле вершины q_4 и останется в четвертой вершине. При этом погрузчик выполнит выемку второго и третьего блокирующих контейнеров (см. таблицу), расположенных во втором поперечном ряду первого продольного ряда. Теперь блокирующие контейнеры удалены, и доступ к целевому контейнеру открыт (см. рис. 3).

Вывоз целевого контейнера во вспомогательный штабель. При обработке следующего символа строки управления $s_{12} = V$ автомат еще раз пройдет по петле и останется в вершине q_4 , а погрузчик, согласно данной команде (см. таблицу), выполнит выемку целевого контейнера из штабеля. При обработке символа $s_{13} = \square$ автомат перейдет по ребру в вершину q_5 (см. рис. 2), в результате чего будет выполнена операция вывоза целевого контейнера во вспомогательный штабель.

Вернем блокирующие контейнеры в стек целевого контейнера, т. е. во второй поперечный ряд, соблюдая обратный порядок по отношению к операции их выемки. Обработав следующий управляющий символ $s_{14} = \bigcirc$ автомат перейдет в вершину q_6 , а погрузчик выполнит возврат третьего блокирующего контейнера из стека целевого контейнера во второй поперечный ряд данного стека. Обработка последовательности управляющих символов $s_{15-16} = \bigcirc$ заставит автомат совершать два прохода по петле и остаться в вершине q_6 , при этом погрузчик выполнит операцию возврата второго и первого блокирующих контейнеров данного стека во второй поперечный ряд. Стек целевого контейнера восстановлен (см. рис. 3).

Вернем контейнеры в блокирующий целевой контейнер стек, т. е. в третий продольный ряд (см. рис. 3), соблюдая обратный порядок по отношению к операции их выемки. Обработав символ $s_{17} = \odot$ автомат перейдет в вершину q_7 (см. рис. 2), при этом погрузчик переместится на один шаг назад, освободив место для размещения в штабеле блокирующего стека. Обработка управляющего символа $s_{18} = \star$ приведет автомат в вершину q_8 , а погрузчик выполнит операцию возврата пятого контейнера на его место в блокирующем стеке. Обработка последовательности символов строки управления $s_{19-22} = \star$ заставит автомат выполнить четыре прохода по петле и остаться в конечной вершине q_8 диаграммы переходов, а погрузчик выполнит возврат четвертого, третьего, второго и первого блокирующих контейнеров в стек, расположенный в первом поперечном ряду и первом продольном ряду штабеля (см. рис. 3). Операция возврата блокирующих контейнеров на их прежние места в операционный штабель завершена.

Таким образом, входная последовательность строки управления (см. рис. 4) была воспринята ДКА как допустимая, т. е. соответствующая его «языку» (символам кортежа) — см. таблицу. В свою очередь погрузчик под управлением ДКА выполнил частичный разбор штабеля и смог достать заблокированный целевой контейнер, расположенный в третьем продольном ряду, в четвертом ярусе и во втором поперечном ряду. Следовательно, отображение (см. рис. 2) соответствует модели структуры и механизму функционирования операции полного разбора блокирующих стеков и выемки контейнеров только из ближнего ряда, т. е. доказана качественная адекватность работы детерминированного конечного автомата с диаграммой переходов δ и «языком» (см. таблицу).

Обсуждение (Discussion)

Применение ДКА с диаграммой переходов (см. рис. 2) и цифровым кодом (см. таблицу) в блоке управления погрузчиком как технологическим автоматом имеет следующие преимущества:

- устранен риск аварийного прерывания технологической операции, так как перегружатель берет максимальный заявленный изготовителем вес только в том случае, если он касается колесной парой стека, в котором размещен поднимаемый в данный момент времени контейнер;
- универсален — пригоден для автоматизации процесса управления действиями как рич-стакера, так и погрузчика со спредером верхнего захвата;
- не имеет технологических ограничений на емкость (высоту и ширину, конфигурацию (см. рис. 1)) формируемых в зоне хранения штабелей при сохранении технических ограничений, а именно допустимой нагрузки на покрытие площадки.

Недостатком использования данного кода ДКА является увеличение количества непроизводительных операций при выемке целевых контейнеров, так как блокирующие стеки разбираются полностью, а не частично как в коде ДКА, представленного в работе [18]. Так как у каждого из разработанных ДКА имеются свои преимущества и недостатки, решение вопроса выбора одного из них в качестве цифровой модели престакинга для слоя *виртуальное пространство цифрового двойника операции поиска и выемки целевых контейнеров в операционном штабеле* напрямую зависит от технологического процесса конкретного контейнерного терминала. Иными словами, оба ДКА могут применяться для разработки цифровой имитационной модели блока управления технологического автомата только с учетом ограничительных особенностей их функционирования.

Аппаратная реализация ДКА как блока автоматического управления действиями погрузчика может быть выполнена двумя способами. Первый способ — написать собственный программный продукт, используя предназначенные для этой цели языки программирования. Второй способ — использовать готовые запрограммированные алгоритмы программных платформ, разработанных специально для инженеров и ученых (например, MATLAB) и успешно применяемых при решении, в частности, задач управления работой флота и порта [21], [22].

Способ имплементации конечных автоматов на различных языках программирования с обоснованием выбора последних в качестве инструментария реализации ДКА представлен в статье [23]. Возможности пакетов прикладных программ Stateflow и Xilinx System Generator платформы Matlab/Simulink, предназначенных для проектирования конечных автоматов совместно с методикой их последующей реализации в базе ПЛИС Xilinx подробно описаны в [24]. Главным аргументом в пользу выбора пакета прикладных программ MATLAB является то, что для его использования не обязательно быть профессиональным программистом. Если сравнить синтаксис команд языка MATLAB с синтаксисом любого из языков программирования, то первый намного проще и понятнее для простого пользователя. Кроме того, компьютерную программу, написанную на языке MATLAB, легко с помощью опции MatLab Coder импортировать в код языка программирования C/C++.

Таким образом, если реализацию ДКА в виде компьютерной программы будет выполнять программист, то рекомендуем выбрать один из языков программирования, например, таких как C, Java, Python. В противном случае целесообразно воспользоваться пакетом уже готовых прикладных программ, поддерживающих опцию проектирования конечных автоматов.

Выводы (Conclusion)

В результате проведенного исследования можно сделать следующие выводы:

1. Разработана цифровая модель для слоя виртуальное пространство цифрового двойника операции селективной выемки контейнеров из операционного штабеля с использованием мобильного перегружателя типа ричстакер или погрузчик со спредером верхнего захвата на языке ДКА.
2. Доказана адекватность работы диаграммы переходов ДКА к механизму функционирования моделируемой операции полного разбора блокирующих стеков с выемкой контейнеров только из ближнего ряда.
3. Отличительная особенность разработанной цифровой модели операции селективной выемки контейнеров из операционного штабеля от других известных моделей [17], [18] состоит в том, что ее ДКА реализует механизм работы перегружателя по схеме «полный разбор блокирующих стеков и выемка контейнеров только из ближнего ряда». Главное преимущество использования данного варианта конечного автомата в виртуальной среде системы автоматизированного управления мобильным перегружателем в тыловой зоне контейнерного терминала состоит в том, что не нужно экстренно прерывать технологический процесс для отладки работы погрузчика на рабочих позициях.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Транспортная стратегия Российской Федерации до 2030 года с прогнозом на период до 2035 года [Электронный ресурс]. — Режим доступа: <https://docs.cntd.ru/document/727294161> (дата обращения: 06.10.2023).

2. Кузнецов А. Л. Планирование имитационных экспериментов в задачах исследования операционных стратегий контейнерных терминалов / А. Л. Кузнецов, А. В. Кириченко, А. Д. Семенов, А. А. Радченко // Вестник Астраханского государственного технического университета. Серия: Морская техника и технология. — 2020. — № 4. — С. 105–112. DOI: 10.24143/2073-1574-2020-4-105-112.

3. Маликова Т. Е. Организация таможенного контроля на контейнерных терминалах в морских пунктах пропуска / Т. Е. Маликова // Проблемы транспорта Дальнего Востока: FERBAT-13: материалы юбилейной десятой международной научно-практической конференции, посвященной 200-летию адмирала Г. И. Невельского. — Владивосток: Российская академия транспорта, Дальневосточное отделение, 2013. — С. 81–83.

4. Кузнецов А. Л. Дискретно-событийное моделирование грузовых фронтов контейнерного терминала / А. Л. Кузнецов, А. В. Галин, Г. Б. Попов // Вестник Государственного университета морского и речного флота имени адмирала С. О. Макарова. — 2023. — Т. 15. — № 4. — С. 589–602. DOI: 10.21821/2309-5180-2023-15-4-589-602.

5. Король Р. Г. Проектирование динамической имитационной модели мультимодальной транспортно-логистической системы Дальнего Востока / Р. Г. Король, А. С. Акельев // Транспорт Азиатско-Тихоокеанского региона. — 2023. — № 4 (37). — С. 43–50.

6. Эглит Я. Я. Цифровизация контейнерных перевозок и их влияние на логистику / Я. Я. Эглит, О. Ю. Огальцова, А. В. Андорская, М. А. Шаповалова // Системный анализ и логистика. — 2019. — № 4 (22). — С. 40–46.

7. Zhou P. Anisotropic Q-learning and waiting estimation based real-time routing for automated guided vehicles at container terminals / P. Zhou, L. Lin, K. H. Kim // Journal of Heuristics. — 2023. — Vol. 29. — Pp. 207–228. DOI: 10.1007/s10732-020-09463-9.

8. Cuong T. N. Container throughput analysis and seaport operations management using nonlinear control synthesis / T. N. Cuong, H. S. Kim, X. Xu, S. S. You // Applied Mathematical Modelling. — 2021. — Vol. 100. — Pp. 320–341. DOI: 10.1016/j.apm.2021.07.039.

9. Yu H. Yard operations and management in automated container terminals: A review / H. Yu, Y. Deng, L. Zhang, X. Xiao, C. Tan // Sustainability. — 2022. — Vol. 14. — Is. 6. — Pp. 3419. DOI: 10.3390/su14063419.

10. Тимошек Е. С. Аналитический обзор моделей и методов в управлении работой флота / Е. С. Тимошек, Т. Е. Маликова // Эксплуатация морского транспорта. — 2021. — № 4 (101). — С. 38–51. DOI: 10.34046/aumsuomtl01/7.

11. Соловьева Е. Е. Оптимизация работы тыловых грузовых фронтов морских контейнерных терминалов: технологический аспект / Е. Е. Соловьева // Актуальные проблемы развития судоходства и транспорта: Материалы Национальной научно-технической конференции с международным участием. — Владивосток: Дальневосточный государственный технический рыбохозяйственный университет, 2022. — С. 146–153.

12. Кузнецов А. Л. Влияние каргоплана судна-контейнеровоза на складские операции терминала / А. Л. Кузнецов, А. Д. Семенов, Н. Оја // Вестник Государственного университета морского и речного флота имени адмирала С. О. Макарова. — 2021. — Т. 13. — № 2. — С. 157–168. DOI: 10.21821/2309-5180-2021-13-2-157-168.

13. Соловьева Е. Е. Исследование подходов в разработке алгоритмов управления автоматизированной системой организации поиска и выемки контейнеров / Е. Е. Соловьева // Техническая эксплуатация водного транспорта: проблемы и пути развития: Материалы Пятой международной научно-технической конференции. — Петропавловск-Камчатский: Камчатский государственный технический университет, 2022. — С. 70–74.

14. Кузнецов А. Л. Анализ оптимизационных стратегий складирования контейнеров / А. Л. Кузнецов, А. Д. Семенов, А. З. Боревищ // Вестник Государственного университета морского и речного флота имени адмирала С. О. Макарова. — 2019. — Т. 11. — № 5. — С. 803–812. DOI: 10.21821/2309-5180-2019-11-5-803-812.

15. Кузнецов А. Л. Селективность контейнеров в различных транспортно-технологических схемах / А. Л. Кузнецов, А. Д. Семенов, А. А. Радченко // Вестник Государственного университета морского и речного флота имени адмирала С. О. Макарова. — 2020. — Т. 12. — № 4. — С. 672–682. DOI: 10.21821/2309-5180-2020-12-4-672-682.

16. Grieves M. Digital twin: manufacturing excellence through virtual factory replication. 2014. [Электронный ресурс] / M. Grieves. — Режим доступа: https://www.researchgate.net/publication/275211047_Digital_Twin_Manufacturing_Excellence_through_Virtual_Factory_Replication (дата обращения: 06.10.2023).

17. Радочинская А. Ж. Модель формирования для таможенных целей вспомогательного штабеля контейнеров на языке конечных автоматов / А. Ж. Радочинская, Т. Е. Маликова // Эксплуатация морского транспорта. — 2021. — № 2 (99). — С. 59–66.

18. Маликова Т. Е. Детерминированный конечный автомат поиска контейнеров в штабеле / Т. Е. Маликова, Е. Е. Соловьева, А. Ж. Радочинская // Эксплуатация морского транспорта. — 2022. — № 4 (105). — С. 91–100.

19. Соловьева Е. Е. Алгоритм управления действиями погрузчика при выборке контейнеров из операционного штабеля морского терминала / Е. Е. Соловьева, Т. Е. Маликова // Волновая электроника и инфокоммуникационные системы: Сборник статей XXVI Международная научная конференция. В 3-х частях. — СПб.: Санкт-Петербургский государственный университет аэрокосмического приборостроения, 2023. — Т. Часть 3. — С. 127–132.

20. Ганнесен В. В. Обоснование схемы технологической операции расформирования контейнерного штабеля при автоматизации рабочего цикла автопогрузчика / В. В. Ганнесен, Т. Е. Маликова, Е. Е. Петрова // Вестник Государственного университета морского и речного флота имени адмирала С. О. Макарова. — 2023. — Т. 15. — № 4. — С. 603–616. DOI: 10.21821/2309-5180-2023-15-4-603-616.

21. Тимошек Е. С. Оптимизация процесса обработки транспортных судов на рейде средствами линейного программирования MATLAB / Е. С. Тимошек, Т. Е. Маликова // Вестник Государственного университета морского и речного флота имени адмирала С. О. Макарова. — 2021. — Т. 13. — № 6. — С. 771–781. DOI: 10.21821/2309-5180-2021-13-6-771-781.

22. Радочинская А. Ж. Моделирование процесса обработки импортного грузопотока на контейнерном терминале в среде MATLAB / А. Ж. Радочинская, А. А. Янченко, Т. Е. Маликова // Аэрокосмическое приборостроение и эксплуатационные технологии: Сборник докладов Второй Международной научной конференции. — СПб.: Санкт-Петербургский государственный университет аэрокосмического приборостроения, 2021. — С. 144–149. DOI: 10.31799/978-5-8088-1554-4-2021-2-144-149.

23. Розов Н. В. Обзор способов реализации конечного автомата на различных языках программирования / Н. В. Розов, А. И. Мартышкин // Фундаментальные и прикладные научные исследования: актуальные вопросы, достижения и инновации: сборник статей XXIV Международной научно-практической конференции: в 3 ч. — Пенза: Наука и Просвещение (ИП Гуляев Г. Ю.), 2019. — Т. Часть 2. — С. 56–60.

24. Строгонов А. Проектирование конечных автоматов с использованием пакетов расширения Stateflow и Xilinx System Generator системы Matlab/Simulink / А. Строгонов, С. Цыбин, П. Городков // Компоненты и технологии. — 2015. — № 8 (169). — С. 41–48.

REFERENCES

1. Transportnaya strategiya Rossiiskoi Federatsii do 2030 goda s prognozom na period do 2035 goda. Web. 6 Oct. 2023 <<https://docs.cntd.ru/document/727294161>>.

2. Kuznetsov, Aleksandr L., Aleksandr V. Kirichenko, Anton D. Semenov, and Anna A. Radchenko. “Planning simulation experiments in problems of studying operational strategies of container terminals.” *Vestnik of Astrakhan State Technical University. Series: Marine engineering and technologies* 4 (2020): 105–112. DOI: 10.24143/2073-1574-2020-4-105-112.

3. Malikova, T.E. “Organizatsiya tamozhennogo kontrolya na konteinernykh terminalakh v morskikh punktakh propuska.” *Problemy transporta Dal'nego Vostoka. Doklady desyatoi yubileinoi mezhdunarodnoi nauchno-prakticheskoi konferentsii*. Vladivostok: DVO RAT, 2013. 81–83.

4. Kuznetsov, Aleksandr L., Aleksandr V. Galin, and German B. Popov. “Discrete-event modelling of container terminal cargo fronts.” *Vestnik Gosudarstvennogo universiteta morskogo i rechnogo flota imeni admirala S. O. Makarova* 15.4 (2023): 589–602. DOI: 10.21821/2309-5180-2023-15-4-589-602.

5. Korol, Roman G., and Andrey S. Akeliev. “Designing a dynamic simulation model of a multimodal transport and logistics system of the Far East.” *Transport of the Asia-Pacific Region* 4(37) (2023): 43–50.

6. Eglit, Ya. Ya., O. Yu. Ogaltcova, A. V. Andorskaya, and M. A. Shapovalova. “Digitalization of container transportation and its impact on logistics.” *Sistemnyi analiz i logistika* 4(22) (2019): 40–46.

7. Zhou, Pengfei, Li Lin, and Kap Hwan Kim. “Anisotropic Q-learning and waiting estimation based real-time routing for automated guided vehicles at container terminals.” *Journal of Heuristics* 29 (2023): 207–228. DOI: <https://doi.org/10.1007/s10732-020-09463-9>.

8. Cuong, Truong Ngoc, Hwan-Seong Kim, Xiao Xu, and Sam-Sang You. "Container throughput analysis and seaport operations management using nonlinear control synthesis." *Applied Mathematical Modelling* 100 (2021): 320–341. DOI: 10.1016/j.apm.2021.07.039.
9. Yu, Hang, Yiyun Deng, Leijie Zhang, Xin Xiao, and Caimao Tan. "Yard operations and management in automated container terminals: A review." *Sustainability* 14.6 (2022): 3419. DOI: 10.3390/su14063419.
10. Timoshek, E.S., and T. E. Malikova. "Analytical review of models and methods in fleet management." *Ekspluatatsiya morskogo transporta* 4(101) (2021): 38–51. DOI 10.34046/aumsuomtl01/7.
11. Solovyova, Ekaterina E. "Optimization of operation of rear cargo fronts of sea container terminals: technological aspect." *Aktual'nye problemy razvitiya sudohodstva i transporta: Materialy Nacional'noj nauchno-tehnicheskoy konferencii s mezhdunarodnym uchastiem*. Vladivostok: Dal'nevostochnyj gosudarstvennyj tekhnicheskij rybohozyajstvennyj universitet, 2022. 146–153.
12. Kuznetsov, Aleksandr L., Anton D. Semionov, and Hannu Oja. "Influence of a cargo plan on port operations." *Vestnik Gosudarstvennogo universiteta morskogo i rechnogo flota imeni admirala S. O. Makarova* 13.2 (2021): 157–168. DOI: 10.21821/2309-5180-2021-13-2-157-168.
13. Soloveva, E.E. "Research of approaches in the algorithms development for managing an automated system for organizing the search and seizure of containers." *Tekhnicheskaya ekspluatatsiya vodnogo transporta: problemy i puti razvitiya: Materialy Pyatoy mezhdunarodnoj nauchno-tehnicheskoy konferencii*. Petropavlovsk-Kamchatskij: Kamchatskij gosudarstvennyj tekhnicheskij universitet, 2022. 70–74.
14. Kuznetsov, Aleksandr L., Anton D. Semenov, and Albert Z. Borevich. "Analysis of optimization container stacking strategies." *Vestnik Gosudarstvennogo universiteta morskogo i rechnogo flota imeni admirala S. O. Makarova* 11.5 (2019): 803–812. DOI: 10.21821/2309-5180-2019-11-5-803-812.
15. Kuznetsov, Aleksandr L., Anton D. Semenov, and Anna A. Radchenko. "Box selectivity in different container cargo-handling systems." *Vestnik Gosudarstvennogo universiteta morskogo i rechnogo flota imeni admirala S. O. Makarova* 12.4 (2020): 672–682. DOI: 10.21821/2309-5180-2020-12-4-672-682.
16. Grieves, Michael. Digital twin: manufacturing excellence through virtual factory replication. 2014. Web. 6 Oct. 2023 <https://www.researchgate.net/publication/275211047_Digital_Twin_Manufacturing_Excellence_through_Virtual_Factory_Replication>.
17. Radochinskaia, A. Zh., and T. E. Malikova. "The model of a subsidiary container stack formation for customs purposes using finite-state machine description language." *Ekspluatatsiya morskogo transporta* 2(99) (2021): 59–66.
18. Malikova, T.E., E. E. Soloveva, and A. Zh. Radochinskaia. "Deterministic finite state machine for search of containers in stack." *Ekspluatatsiya morskogo transporta* 4(105) (2022): 91–100.
19. Solovieva, E.E., and T. E. Malikova. "The algorithm for controlling the loader operations when selecting containers from the marine terminal operational stack." *Volnovaya elektronika i infokommunikatsionnye sistemy: Sbornik statei XXVI Mezhdunarodnaya nauchnaya konferentsiya*. Vol. 3. SPb.: Sankt-Peterburgskii gosudarstvennyi universitet aerokosmicheskogo priborostroeniya, 2023. 127–132.
20. Gannesen, Vitalii V., Tatiana E. Malikova, and Ekaterina E. Petrova. "Justification of the container stack unpacking technological operation scheme in the automation of the loader work cycle." *Vestnik Gosudarstvennogo universiteta morskogo i rechnogo flota imeni admirala S. O. Makarova* 15.4 (2023): 603–616. DOI: 10.21821/2309-5180-2023-15-4-603-616.
21. Timoshek, Elena S., and Tatiana E. Malikova. "Optimization of the handling process of transport vessels on the raid by means of linear programming MATLAB." *Vestnik Gosudarstvennogo universiteta morskogo i rechnogo flota imeni admirala S. O. Makarova* 13.6 (2021): 771–781. DOI: 10.21821/2309-5180-2021-13-6-771-781.
22. Radochinskaia, A. Zh., A. A. Yanchenko, and T. E. Malikova. "Simulation of the import bound cargo traffic processing at a container terminal in MATLAB environment." *Aerokosmicheskoe priborostroenie i ekspluatatsionnye tekhnologii: Sbornik dokladov Vtoroi Mezhdunarodnoi nauchnoi konferentsii*. SPb.: Sankt-Peterburgskii gosudarstvennyi universitet aerokosmicheskogo priborostroeniya, 2021. 144–149. DOI: 10.31799/978-5-8088-1554-4-2021-2-144-149.
23. Rozov, N.V., and A. I. Martyshkin. "Overview of implement a finite state machine in various programming languages." *Fundamental'nye i prikladnye nauchnye issledovaniya: aktual'nye voprosy, dostizheniya i innovatsii: sbornik statei XXIV Mezhdunarodnoi nauchno-prakticheskoi konferentsii*. Vol. 2. Penza: Nauka i Prosveshchenie (IP Gulyaev G. Yu.), 2019. 56–60.
24. Strogonov, A., S. Tsybin, and P. Gorodkov. "Proektirovanie konechnykh avtomatov s ispol'zovaniem paketov rasshireniya Stateflow i Xilinx System Generator sistemy Matlab/Simulink." *Komponenty i tekhnologii* 8(169) (2015): 41–48.

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

Маликова Татьяна Егоровна —

доктор технических наук, доцент
Морской государственный университет
имени адмирала Г. И. Невельского
690059, Российская Федерация, г. Владивосток,
ул. Верхнепортовая, 50 а
e-mail: Malikova@msun.ru

Петрова Екатерина Евгеньевна —

старший преподаватель
Дальневосточный государственный технический
рыбохозяйственный университет
690087, Российская Федерация, г. Владивосток,
ул. Луговая, д. 52-Б
e-mail: pillers@mail.ru

INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Malikova, Tatiana E. —

Dr. of Technical Sciences, associate professor
Maritime State University named
after Admiral G. I. Nevelskoi
50a Verkhneportovaya Str., Vladivostok, 690059,
Russian Federation
e-mail: Malikova@msun.ru

Petrova, Ekaterina E. —

Senior Lecturer
Far Eastern State Technical
Fisheries University
52-B Lugovaya Str., Vladivostok, 690087,
Russian Federation
e-mail: pillers@mail.ru

Статья поступила в редакцию 22 апреля 2024 г.

Received: April 22, 2024.

DOI: 10.21821/2309-5180-2024-16-3-391-402

ALGORITHM FOR CONSTRUCTING AN ARBITRARY ROUTE ON A DISCRETE PLANE AND ITS EXECUTABLE DESCRIPTION

A. L. Kuznetsov, V. Yu. Gryzlov, Uami Abdeljalil

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

² — JSC “Petersburg Oil Terminal”, St. Petersburg, Russian Federation

Nowadays, modeling, in particular simulation, is becoming one of the most common methods of analysis and design in the field of transport. A large number of tasks in this area are related to the construction and study of the characteristics of routes on a plane. The use of computers as a tool for this first and foremost requires the creation of adequate and efficient ways to represent these routes in waters and territories in a computing environment. The classic representation of this kind is discrete space, in which each element of the physical surface is one-to-one mapped to the element in the computer memory. As a result, a rectangular array of data is correlated with the real physical space, each element of which contains certain properties of the original object selected for modeling, the composition of which is determined by the specifics of the task. This method of representation is considered to be the most efficient from a computational point of view. At the same time, it has a significant drawback, which is explained by the different nature of the properties of the original object and its computer model, namely, the continuity and discreteness of the basic representations. Any curves and even straight lines that are not orthogonal to the coordinate system are depicted in the form of stepped fragments, which can sometimes lead to the loss of the most basic characteristics. The most obvious example is the difference in these representations of distances, or proximity metrics: Euclidean and Manhattan. In addition, the digitization of curvilinear objects, understood as their transfer from a continuous geometric plane to a discrete space, is a complex and ambiguously solvable task. An efficient and objective algorithm used to solve this problem is described in the paper.

Keywords: transport, routes, discrete space, simulation modeling, container and raw materials transportation, optimization criteria, service organization schemes.

For citation:

Kuznetsov, Aleksandr L., Vladimir Yu. Gryzlov, and Uami Abdeljalil. “Algorithm for constructing an arbitrary route on a discrete plane and its executable description.” *Vestnik Gosudarstvennogo universiteta morskogo i rechnogo flota imeni admirala S. O. Makarova* 16.3 (2024): 391–402. DOI: 10.21821/2309-5180-2024-16-3-391-402.

УДК 656.614.3

АЛГОРИТМ ПОСТРОЕНИЯ ПРОИЗВОЛЬНОГО МАРШРУТА НА ДИСКРЕТНОЙ ПЛОСКОСТИ И ЕГО ПОКООРДИНАТНОЕ ОПИСАНИЕ

А. Л. Кузнецов, В. Ю. Грызлов, Уами Абделжалли

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

² — АО «Петербургский нефтяной терминал», Санкт-Петербург, Российская Федерация

Темой исследования является имитационное моделирование, которое в настоящее время является одним из наиболее распространенных методов анализа и проектирования в сфере транспорта. Большинство задач в этой области связано с построением и исследованием характеристик маршрутов на плоскости. Отмечается, что использование компьютеров в качестве инструмента для этого в первую очередь требует создания адекватных и эффективных способов представления этих маршрутов на акваториях и территориях в вычислительной среде. Классическим представлением подобного рода является дискретное пространство, в котором каждому элементу физической поверхности взаимно-однозначно сопоставлен элемент в памяти компьютера. Как следствие, реальному физическому пространству ставится в соответствие прямоугольный массив данных, каждый элемент которого содержит те или иные выбранные для моделирования свойства исходного объекта. Состав массива данных определяется спецификой задачи.

Такой способ представления, являющийся наиболее эффективным с вычислительной точки зрения, имеет в то же время значительный недостаток, объясняемый различной природой свойств исходного объекта и его компьютерной модели, а именно непрерывности и дискретности базовых представлений. При его использовании любые кривые и даже прямые линии, не ортогональные системе координат, изображаются в виде ступенчатых фрагментов, что иногда может приводить к потере основных характеристик. Отмечается, что оцифровка криволинейных объектов, понимаемая как их перенесение с непрерывной геометрической плоскости в дискретное пространство, является сложной и неоднозначно решаемой задачей. В настоящей статье описывается эффективный и объективный алгоритм, используемый для решения этой задачи.

Ключевые слова: транспорт, судоходные маршруты, дискретное пространство, имитационное моделирование, контейнерные и сырьевые перевозки, критерии оптимизации, схемы организации сервисов.

Для цитирования:

Кузнецов А. Л. Алгоритм построения произвольного маршрута на дискретной плоскости и его по- координатное описание / А. Л. Кузнецов, В. Ю. Грызлов, Уами Абделжалил // Вестник Государствен- ного университета морского и речного флота имени адмирала С. О. Макарова. — 2024. — Т. 16. — № 3. — С. 391–402. DOI: 10.21821/2309-5180-2024-16-3-391-402.

Введение (Introduction)

Современные внешнеполитические процессы обусловили постепенное прекращение торгово-экономических отношений с рядом промышленно развитых стран и, соответственно, кардинальное снижение грузооборота с ранее стабильными зарубежными контрагентами. Так, для Балтийского бассейна в этом качестве традиционно выступали страны Западной Европы. Новые экономические условия обусловили потребность разработки в кратчайшие сроки новых маршрутов, причем как для контейнерных (транспорт общего пользования), так и для сырьевых (торгово-промышленное судоходство) перевозок. Таким образом, существует проблема оператив- ного проектирования оптимальных судоходных маршрутов, решение которой в настоящее время оказывается неочевидным. В работе [1] выполнено исследование задачи проектирования контей- нерных линий. Выполненный анализ наглядно демонстрирует следующие особенности организа- ции регулярных контейнерных перевозок:

- ограничения и критерии оптимизации;
- разновидности вариантов схем организации сервисов;

В качестве основных отмечены такие ограничения и критерии оптимизации, как ограниче- ние времени транзита, стоимость транспортировки, отклоненные потребности грузоотправите- лей, оптимизация скорости.

В исследовании [2] подробно рассмотрены разновидности вариантов схем организации ли- нейных сервисов, а именно: простого сервиса, сервиса «бабочка», сервиса «маятник», сложного сервиса. Также отмечается применяемый при несбалансированном контейнеропотоке усложнен- ный асимметричный вариант конфигурации указанных схем. Аналогичный подход, заключаю- щийся в использовании многоуровневого графа для моделирования сложных сервисов, также ис- пользовался ранее в исследованиях [3] и [4]. При этом следует отметить, что сложность подзадачи возрастает с увеличением количества уровней (слоев). Так, в исследовании [5] введено ограниче- ние в два уровня в определенном графе.

Общей целью во многих существующих моделях является минимизация расходов линей- ного контейнерного сервиса, достигаемая минимизацией пробегов судов. В общем виде задача маршрутизации судов сводится к задаче коммивояжера. Таким образом, за границами исследова- ния остаются как траектории, так и скорости движения судов, в том числе экономические, кото- рые имеют существенное значение при планировании рейсов. Кроме того, не рассмотрены необ- ходимые ротации зафрахтованных судов, связанные с их более выгодной бункеровкой, сменами экипажей и иными вспомогательными операциями. В целях устранения этих «лакун» в теории и практике, указанных в работах [6]–[9], в данном исследовании воспользуемся подходом, описан- ным в [10], предполагающим переход от непрерывного восприятия исследуемых (организуемых) графов к дискретному.

Методы и материалы (Methods and Materials)

Пусть на плоскости имеется некоторый отрезок прямой с начальной точкой (X_0, Y_0) и конечной точкой (X_1, Y_1) . На плоскости нанесена сетка, соответствующая целым значениям координат, как показано на рис. 1.

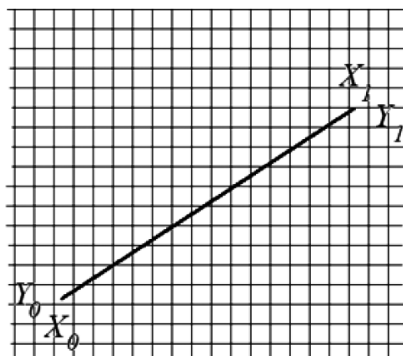


Рис. 1. Отрезок прямой на дискретной сетке
Fig. 1. Straight line segment on a discrete grid

При изображении линии не в векторной, а в растровой графике каждый квадрат сетки («дискрет»), через который проходит данный отрезок, представлен в виде единицы. С уменьшением масштаба ортогональные скачки линий делаются все менее заметными, приближая дискретное изображение к своему исходному непрерывному оригиналу (рис. 2).

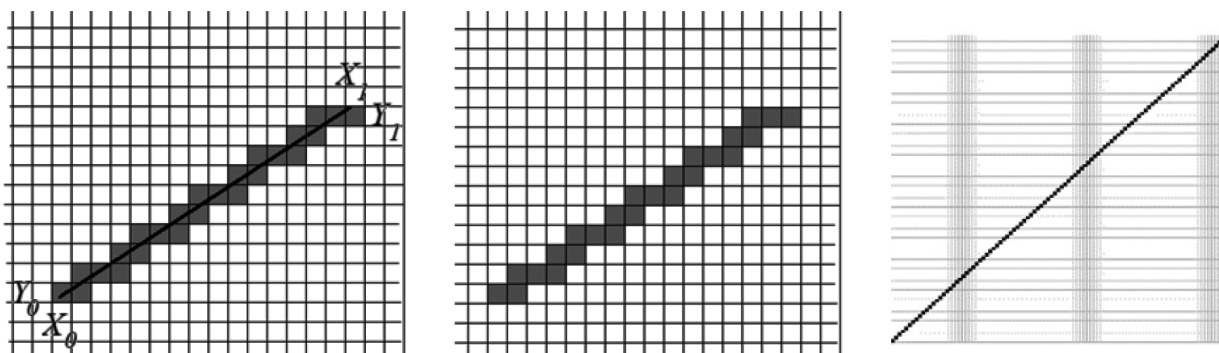


Рис. 2. Изображение отрезка линии в растровой графике
Fig. 3. Image of a line segment in raster graphics

Для человека с его глобальным зрительным восприятием изображения заполнение «задетых» дискретов сетки единицами не представляет труда. Компьютеру, с его «локальным» представлением, для решения этой задачи необходимо сформулировать определенный алгоритм.

Заметим, что в алгебраической форме рассматриваемая линия описывается уравнением $Y = Y(X) = \frac{Y_1 - Y_0}{X_1 - X_0} (X - X_0) + Y_0$, где область определения функции есть отрезок (X_0, X_1) . С точки зрения организации вычислительного процесса этот вывод справедлив только для отрезка, приведенного на рис. 1. Если $X_0 > X_1$, то областью определения функции становится отрезок (X_1, X_0) . Это соответствует случаю, когда начальная точка отрезка прямой лежит правее его конечной точки. В общем случае областью определения рассматриваемой функции является отрезок $[\min(X_0, X_1), \max(X_0, X_1)]$ (см. [11]–[14]). Аналогично областью значений функции является интервал $[\min(Y_0, Y_1), \max(Y_0, Y_1)]$, определяемой направлением отрезка: вверх или вниз.

Сопоставим границы определенной таким образом области задания функции интервалу $[X_{\text{л}}, X_{\text{пр}}]$, а границы интервала значений функции в виде $[Y_{\text{в}}, Y_{\text{н}}]$. Очевидно, что весь отрезок прямой содержится в определенном таким образом прямоугольнике с координатами диагонали $(X_{\text{л}}, Y_{\text{н}})$ и $(X_{\text{п}}, Y_{\text{в}})$ — рис. 3, а.

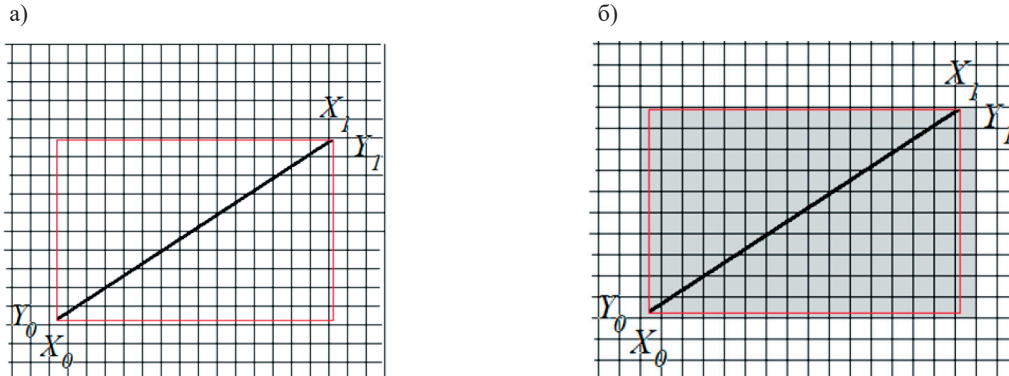


Рис. 3. Описывающие прямоугольники: а — of a vector function; б — дискретной функции
Fig. 3. Outlining rectangles: а — векторной функции; б — of a discrete function

Очевидно, что отрезок рассматриваемой векторной линии содержится в «расширенном» прямоугольнике, округляющем значения до целых, т. е. определяемых границами $(X_{\text{лев}}, Y_{\text{нижн}})$ и $(X_{\text{прав}} + 1, Y_{\text{нижн}} + 1)$. Здесь обозначена функция выделения целой части числа «антье». Это расширение показано на рис. 3, б.

Если произвольная точка на плоскости задается координатами (X, Y) , то она содержится в клетке сетки (прямоугольнике) с векторными координатами по горизонтали от X до $X+1$ и по вертикали от Y до $Y+1$.

Введем адресацию дискретов описывающего прямоугольника в виде пары целочисленных координат (x, y) , где $x = X$ и $y = Y$. Например, если взять точку $(X = 3,14, Y = 2,71)$, то соответствующий ей дискрет будет иметь координаты $(x = 3, y = 2)$, а диагональ соответствующего этому дискрету прямоугольника — «непрерывные» координаты нижнего левого угла $(X = 3, Y = 2)$ и верхнего правого угла $(X = 4, Y = 3)$.

Отрезок прямой с начальной (X_0, Y_0) и конечной (X_1, Y_1) точками будет заключен в описывающем дискретном прямоугольнике, приведенном на рис. 4, с определенными таким образом координатами нижнего левого угла (x_0, y_0) и верхнего правого угла (x_1, y_1) .

Рассмотрим произвольный дискрет, входящий в этот описывающий прямоугольник с координатами (x, y) , нижняя грань которого представляет собой горизонтальный отрезок, расположенный на высоте $Y = y$. Его верхней гранью является такой же отрезок, расположенный на высоте $Y = y + 1$. Аналогично его левая грань является вертикальным отрезком от Y до $Y + 1$, имеющим горизонтальную координату x , а правая грань — таким же вертикальным отрезком, но с координатой $x + 1$.

Рассмотрим верхнюю грань, представляющую собой отрезок от $X = x$ до $X = x + 1$ на высоте $y + 1$. Условием пересечения прямой $Y = F(X) = \frac{Y_1 - Y_0}{X_1 - X_0}(X - X_0) + Y_0$ с этим отрезком является то, что точка $X = F^{-1}(Y)$ лежит его пределах. Эта точка вычисляется через обратную функцию

$$X = F^{-1}(Y) = \frac{(Y - Y_0)}{(Y_1 - Y_0)}(X_1 - X_0) + X_0.$$

Аналогичным условием пересечения для нижней грани будет нахождение внутри отрезка от $X = x$ до $X = x + 1$ точки $X = F^{-1}(Y) = \frac{(y - Y_0)}{(Y_1 - Y_0)}(X_1 - X_0) + X_0$.

Рассмотрим теперь левую грань, представляющую собой вертикальный отрезок от $Y = y$ до $Y = y + 1$ с абсциссой x . Очевидно, что условием его пересечения с отрезком прямой

$Y = F(X) = \frac{Y_1 - Y_0}{X_1 - X_0} X + Y_0$ является то, что значение $Y = F(x)$ находится в пределах этого отрезка.

Аналогичное условие пересечения для правой грани будет нахождение внутри отрезка от $Y = y$ значения $Y = F(x + 1)$.

Ранее изложенное является достаточно очевидными и формальными рассуждениями, но именно эта особенность позволяет построить алгоритм для решения поставленной задачи: найти изображение каждого дискрета на двоичной плоскости $D(x, y)$ в виде «1» или «0». Пример построения изображения элементарного отрезка с помощью данного алгоритма приведен на рис. 4.

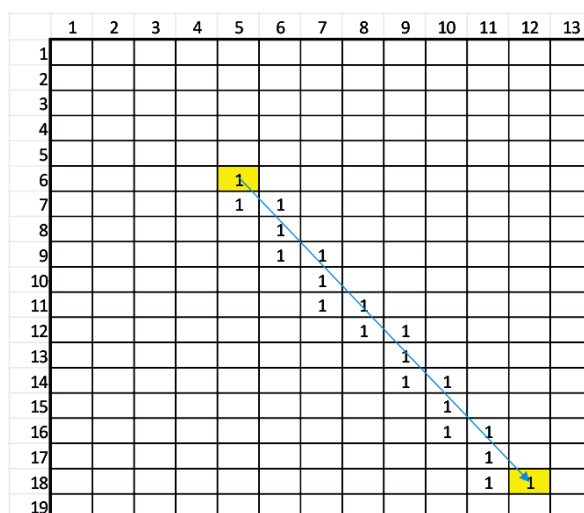


Рис. 4. Пример работы алгоритма отображения для элементарного отрезка
Fig. 4. An example of the mapping algorithm operation for an elementary segment

Из этого рисунка видно, что формально построенное растровое изображение значительно отличается от исходного векторного.

Обсуждение (Discussion)

Алгоритм построения маршрута имеет конечной целью не просто получение отображения непрерывной ломаной кривой на дискретной плоскости, а построение упорядоченной последовательности координат, изображающей перемещение рабочей точки из начала в конец соответствующего пути. С этой целью полученные ранее алгебраические и геометрические соотношения должны быть переведены в наиболее подходящие вычислительные процедуры, исходными данными для которых служат не массивы заполненных в дискретном пространстве ячеек, а сама последовательность их заполнения. По этой причине движение вдоль элементарного отрезка прямой линии $(X_0, Y_0):(X_1, Y_1)$ различается в зависимости от того, в какой квадрант от начала происходит перемещение (рис. 5).

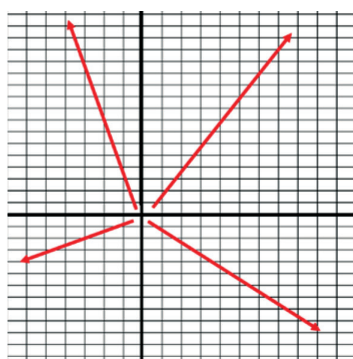


Рис. 5. Направление движения по отрезку
Fig. 5. Direction of movement along the segment

Как следствие, при реализации алгоритма необходимо рассмотреть следующие четыре отдельных случая.

Первый квадрант ($X_0 < X_1$, $Y_0 < Y_1$).

Уравнение прямой линии $Y = F(X)$ в первом квадранте

$$Y = \frac{Y_1 - Y_0}{X_1 - X_0}(X - X_0) + Y_0.$$

Уравнение обратной функции $X = F^{-1}(Y)$

$$X = \frac{(Y - Y_0)}{(Y_1 - Y_0)}(X_1 - X_0) + X_0.$$

Рассмотрим произвольный дискрет, входящий в этот описывающий прямоугольник, с координатами (x, y) , нижняя грань которого представляет собой открытый слева горизонтальный отрезок $[X = x - 1; X = x]$, имеющий ординату $Y = y - 1$. Его верхней гранью является отрезок $[X = x - 1; X = x]$, имеющий ординату $Y = y$, левой гранью — вертикальный отрезок $[Y = y - 1; Y = y]$, имеющий абсциссу $X = x - 1$, правой гранью — отрезок $[Y = y - 1; Y = y]$, имеющий абсциссу $X = x$.

Условием пересечения наклонной линии $Y = F(X)$ с нижней гранью является то, что точка $X = F^{-1}(y)$ лежит в пределах этого отрезка, или $x - 1 < \frac{(y - Y_0)}{(Y_1 - Y_0)}(X_1 - X_0) + X_0 \leq x$.

Условием пересечения наклонной линии $Y = F(X)$ с верхней гранью является то, что точка $X = F^{-1}(y)$ лежит в пределах отрезка, или $x - 1 < \frac{(y + 1 - Y_0)}{(Y_1 - Y_0)}(X_1 - X_0) + X_0 \leq x$.

Условием пересечения наклонной линии $Y = F(X)$ с левой гранью является то, что точка $Y = F(x)$ лежит в пределах отрезка, или $y - 1 < \frac{Y_1 - Y_0}{X_1 - X_0}(x - X_0) + Y_0 \leq y$.

Условием пересечения наклонной линии $Y = F(X)$ с правой гранью является то, что точка $Y = F(x + 1)$ лежит в пределах отрезка, или $y - 1 < \frac{Y_1 - Y_0}{X_1 - X_0}(x + 1 - X_0) + Y_0 \leq y$.

Если линия горизонтальна, т. е. $Y = F(X) = \text{const} = Y_0 = Y_1$, то условием пересечения левой и правой грани служит $y - 1 < Y_0 \leq y$.

Если линия вертикальна, то условием пересечения верхней и нижней грани служит неравенство $x - 1 < X_0 \leq x$.

Второй квадрант ($X_0 > X_1$, $Y_0 < Y_1$).

Уравнение прямой линии $Y = F(X)$ во втором квадранте

$$Y = \frac{Y_1 - Y_0}{X_0 - X_1}(X_0 - X) + Y_0.$$

Уравнение обратной функции $X = F^{-1}(Y)$

$$X = X_0 - \frac{(Y - Y_0)}{(Y_1 - Y_0)}(X_0 - X_1).$$

Рассмотрим произвольный дискрет, входящий в этот описывающий прямоугольник, с координатами (x, y) . Его нижняя грань представляет собой открытый с левого конца горизонтальный отрезок $[X = x - 1; X = x]$, имеющий ординату $Y = y - 1$. Его верхней частью является отрезок $[X = x - 1; X = x]$, имеющий ординату $Y = y$. Его левая грань есть вертикальный отрезок $[Y = y - 1; Y = y]$, имеющий абсциссу $X = x - 1$, а правая часть — отрезок $[Y = y - 1; Y = y]$, имеющий абсциссу $X = x$.

Условием пересечения наклонной линии $Y = F(X)$ с нижней гранью является то, что точка $X = F^{-1}(y)$ лежит в пределах этого отрезка, или $x-1 < \frac{(y-Y_0)}{(Y_1-Y_0)}(X_1-X_0)+X_0 \leq x$. Если линия горизонтальна, т. е. $Y = F(X) = \text{const} = Y_0 = Y_1$, то условием пересечения наклонной линии $Y = F(X)$ с верхней гранью является точка $X = F^{-1}(y)$, которая лежит в пределах отрезка, или $x-1 < \frac{(y+1-Y_0)}{(Y_1-Y_0)}(X_1-X_0)+X_0 \leq x$.

Условием пересечения наклонной линии $Y = F(X)$ с левой гранью является то, что точка $Y = F(x)$ лежит в пределах отрезка, или $y-1 < \frac{Y_1-Y_0}{X_1-X_0}(E-X_0)+Y_0 \leq y$.

Условием пересечения наклонной линии $Y = F(X)$ с правой гранью является то, что точка $Y = F(x+1)$ лежит в пределах отрезка, или $y-1 < \frac{Y_1-Y_0}{X_1-X_0}(E+1-X_0)+Y_0 \leq y$.

Если линия горизонтальна, т. е. $Y = F(X) = \text{const} = Y_0 = Y_1$, то условием пересечения левой и правой грани служит $y-1 < Y_0 \leq y$. Если линия вертикальна, то условием пересечения верхней и нижней грани служит неравенство $x-1 < X_0 \leq x$.

Третий квадрант ($X_0 > X_1$, $Y_0 > Y_1$).

Уравнение прямой линии $Y = F(X)$ в третьем квадранте

$$Y = -\frac{Y_0-Y_1}{X_0-X_1}(X_0-X)+Y_0.$$

Уравнение обратной функции $X = F^{-1}(Y)$

$$X = \frac{(Y-Y_0)}{(Y_0-Y_1)}(X_0-X_1)+X_0.$$

Рассмотрим произвольный дискрет, входящий в этот описывающий прямоугольник, с координатами (x, y) , верхняя грань которого представляет собой открытый с левого конца горизонтальный отрезок $[X = x-1; X = x]$, имеющий ординату $Y = y-1$. Его нижняя грань есть отрезок $[X = x-1; X = x]$, имеющий ординату $Y = y$, левая грань — вертикальный отрезок $[Y = y; Y = y-1]$, имеющий абсциссу $X = x-1$, правая грань — отрезок $[Y = y-1; Y = y]$, имеющий абсциссу $X = x$.

Условием пересечения наклонной линии $Y = F(X)$ с нижней гранью является то, что точка $X = F^{-1}(y)$ лежит в пределах этого отрезка, или $x-1 < \frac{(y-Y_0)}{(Y_0-Y_1)}(X_1-X_0)+X_0 \leq x$.

Условием пересечения наклонной линии $Y = F(X)$ с верхней гранью является то, что точка $X = F^{-1}(y)$ лежит в пределах отрезка, или $x-1 < \frac{(y+1-Y_0)}{(Y_1-Y_0)}(X_1-X_0)+X_0 \leq x$.

Условием пересечения наклонной линии $Y = F(X)$ с левой гранью является то, что точка $Y = F(x)$ лежит в пределах отрезка, или $y-1 < \frac{Y_1-Y_0}{X_1-X_0}(E-X_0)+Y_0 \leq y$.

Условием пересечения наклонной линии $Y = F(X)$ с правой гранью является то, что точка $Y = F(x+1)$ лежит в пределах отрезка, или $y-1 < \frac{Y_1-Y_0}{X_1-X_0}(E+1-X_0)+Y_0 \leq y$.

Если линия горизонтальна, т. е. $Y = F(X) = \text{const} = Y_0 = Y_1$, то условием пересечения левой и правой грани служит $y-1 < Y_0 \leq y$.

Если линия вертикальна, то условием пересечения верхней и нижней грани служит неравенство $x-1 < X_0 \leq x$.

Четвертый квадрант ($X_0 < X_1, Y_0 > Y_1$).

Уравнение прямой линии $Y = F(X)$ в первом квадранте

$$Y = \frac{Y_0 - Y_1}{X_1 - X_0}(X - X_0) + Y_0$$

Уравнение обратной функции $X = F^{-1}(Y)$

$$X = \frac{(Y - Y_0)}{(Y_0 - Y_1)}(X_1 - X_0) + X_0.$$

Рассмотрим произвольный дискрет, входящий в этот описывающий прямоугольник, с координатами (x, y) . Его верхняя грань представляет собой открытый с левого конца горизонтальный отрезок $[X = x - 1; X = x]$, имеющий ординату $Y = y - 1$, нижняя грань есть отрезок $[X = x - 1; X = x]$, имеющий ординату $Y = y$, левая грань — вертикальный отрезок $[Y = y; Y = y - 1]$, имеющий абсциссу $X = x - 1$, правая грань — отрезок $[Y = y - 1; Y = y]$, имеющий абсциссу $X = x$.

Условием пересечения наклонной линии $Y = F(X)$ с нижней гранью является то, что точка $X = F^{-1}(y)$ лежит в пределах этого отрезка, или $x - 1 < \frac{(y - Y_0)}{(Y_0 - Y_1)}(X_1 - X_0) + X_0 \leq x$.

Условием пересечения наклонной линии $Y = F(X)$ с верхней гранью является то, что точка $X = F^{-1}(y)$ лежит в пределах отрезка, или $x - 1 < \frac{(y + 1 - Y_0)}{(Y_1 - Y_0)}(X_1 - X_0) + X_0 \leq x$.

Условием пересечения наклонной линии $Y = F(X)$ с левой гранью является то, что точка $Y = F(x)$ лежит в пределах отрезка, или $y - 1 < \frac{Y_1 - Y_0}{X_1 - X_0}(x - X_0) + Y_0 \leq y$.

Условием пересечения наклонной линии $Y = F(X)$ с правой гранью является то, что точка $Y = F(x + 1)$ лежит в пределах отрезка, или $y - 1 < \frac{Y_1 - Y_0}{X_1 - X_0}(x + 1 - X_0) + Y_0 \leq y$.

Если линия горизонтальна, т. е. $Y = F(X) = \text{const} = Y_0 = Y_1$, то условием пересечения левой и правой грани служит $y - 1 < Y_0 \leq y$.

Если линия вертикальна, то условием пересечения верхней и нижней грани служит неравенство $x - 1 < X_0 \leq x$.

Результаты (Results)

Рассмотрим некоторый возможный обобщенный маршрут, соединяющий вершины $A-C-D-B-A$ (рис. 6), конкретная топографическая конфигурация которого представлена на рис. 7, и описание которого приведено на рис. 8.

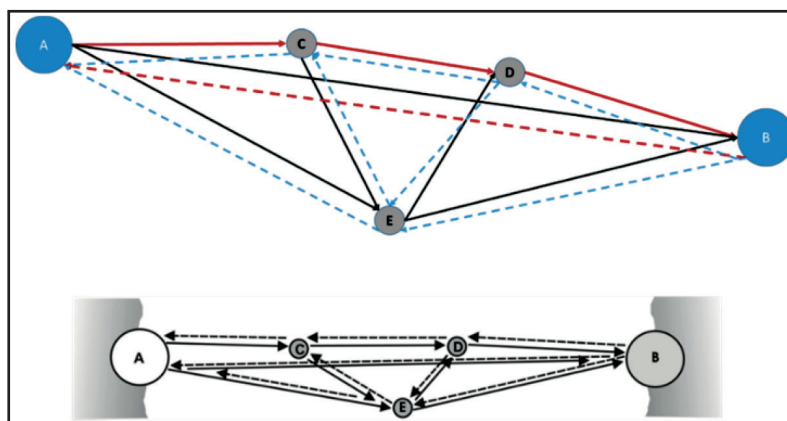


Рис. 6. Обобщенный граф возможных маршрутов
Fig. 6. Generalized graph of possible routes

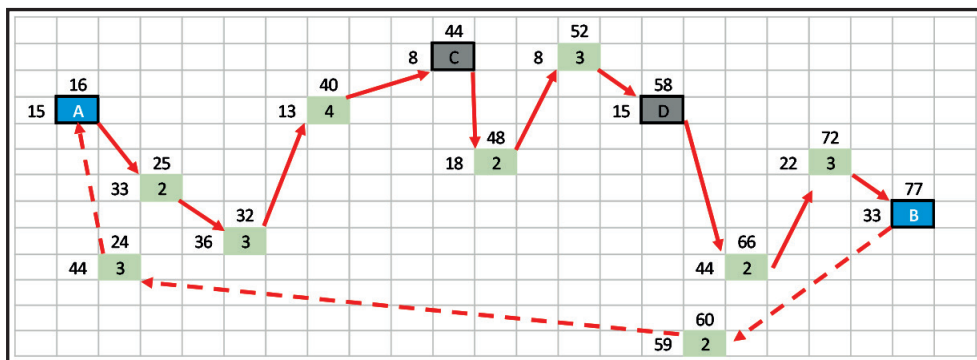


Рис. 7. Топографическая конфигурация выбранного маршрута
Fig. 7. Topographic configuration of the selected route

Начало	Конец		1	2	3	4	5	6
A	C	y	15,5	33,5	36,5	13,5	8,5	
		x	16,5	25,5	32,5	40,5	44,5	
C	D	y	8,5	18,5	8,5	15,5		
		x	44,5	48,5	52,5	58,5		
D	B	y	15,5	44,5	22,5	33,5		
		x	58,5	66,5	72,5	77,5		
B	A	y	33,5	59,5	44,5	17,5		
		x	77,5	60,5	24,5	15,5		

Рис. 8. Описание конфигурации кругового маршрута
Fig. 8. Description of the circular route configuration

На рис. 9 показана экранная форма результата работы описанного алгоритма построения маршрута.

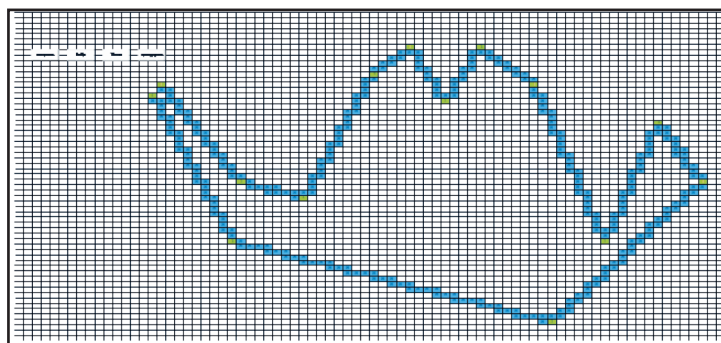


Рис. 9. Экранная форма алгоритма построения произвольного маршрута
Fig. 9. Screen form of the algorithm for constructing an arbitrary route

Сформированное по координатное описание движения по построенному маршруту приведено на рис. 10.

Ребро																																																																
Нач	Кон																																																															
A	C	y																																																														
		x																																																														
C	D	y																																																														
		x																																																														
D	B	y																																																														
		x																																																														
B	A	y																																																														
		x																																																														

Рис. 10. По координатное описание движения по маршруту (фрагмент)
Fig. 10. Coordinate-by-coordinate description of movement along the route (fragment)

Следует особо отметить, что основной целью описываемого алгоритма является покоординатное описание передвижения по маршруту, используемое в различных методах визуализации и моделирования.

Заключение (Conclusion)

Задача построения дискретной модели непрерывного геометрического маршрута возникает во многих транспортных задачах. Противоречие между непрерывностью и дискретностью представлений оригинала и модели делает эту задачу сложной и неоднозначной, что зачастую приводит к утрате необходимых для отражения важных свойств моделируемого маршрута, включая метрики расстояния.

В данном исследовании представлен рациональный способ перехода от векторного представления к дискретному, который находится в основе растровой графики. Формализация правил перехода позволяет получать однозначное и равномерное представление, необходимое для исключения возможной неоднозначности представления графики. Полученное с помощью алгоритма покоординатное описание передвижения по маршруту может быть использовано в различных методах визуализации и моделирования. Предполагается, что указанный подход позволит оперативно проектировать новые судоходные маршруты в условиях происходящего в нашей стране переориентирования рынков.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Галин А. В. Задача проектирования контейнерной линии в современной транспортной системе России / А. В. Галин, П. С. Рудный // Вестник Государственного университета морского и речного флота имени адмирала С. О. Макарова. — 2024. — Т. 16. — № 1. — С. 64–73. DOI: 10.21821/2309-5180-2024-16-1-64-73.
2. Christiansen M. Liner shipping network design / M. Christiansen, E. Hellsten, D. Pisinger, D. Sacramento, C. Vilhelmsen // European Journal of Operational Research. — 2020. — Vol. 286. — Is. 1. — Pp. 1–20. DOI: 10.1016/j.ejor.2019.09.057.
3. Guericke S. Liner shipping cargo allocation with service levels and speed optimization / S. Guericke, K. Tierney // Transportation Research Part E: Logistics and Transportation Review. — 2015. — Vol. 84. — Pp. 40–60. DOI: 10.1016/j.tre.2015.10.002.
4. Bellman R. On a routing problem / R. Bellman // Quarterly of Applied Mathematics. — 1958. — Vol. 16. — Is. 1. — Pp. 87–90. DOI: 10.1090/qam/102435.
5. Thun K. Analyzing complex service structures in liner shipping network design / K. Thun, H. Andersson, M. Christiansen // Flexible Services and Manufacturing Journal. — 2017. — Vol. 29. — Pp. 535–552. DOI: 10.1007/s10696-016-9262-6.
6. Dijkstra E. W. A note on two problems in connexion with graphs // Numerische Mathematik / E. W. Dijkstra. — 1959. — Vol. 1. — Pp. 269–271. DOI: 10.1007/BF01386390.
7. Евстигнеев В. А. Итеративные алгоритмы глобального анализа графов. Пути и покрытия / В. А. Евстигнеев; под ред. А. П. Ершова. — М.: Наука, 1985. — 352 с.
8. Chen D. Z. Developing algorithms and software for geometric path planning problems / D. Z. Chen // ACM Computing Surveys (CSUR). — 1996. — Vol. 28. — Is. 4es. — Pp. 18-es. DOI: 10.1145/242224.242246.
9. Галкина В. А. Построение кратчайших путей в ориентированном графе // Дискретная математика. Комбинаторная оптимизация на графах / В. А. Галкина. — М.: Издательство «Гелиос АРВ», 2003. — 232 с.
10. Кузнецов А. Л. Матричный метод поиска путей на взвешенных ориентированных графах в задачах сетевого планирования при проектировании и эксплуатации морских портов / А. Л. Кузнецов // Вестник Государственного университета морского и речного флота имени адмирала С. О. Макарова. — 2020. — Т. 12. — № 2. — С. 230–238. DOI: 10.21821/2309-5180-2020-12-2-230-238.
11. Kröger M. Shortest multiple disconnected path for the analysis of entanglements in two-and three-dimensional polymeric systems / M. Kröger // Computer physics communications. — 2005. — Vol. 168. — Is. 3. — Pp. 209–232. DOI: 10.1016/j.cpc.2005.01.020.
12. Алексеев В. Е. Глава 3.4. Нахождения кратчайших путей в графе / В. Е. Алексеев, В. А. Таланов // Графы. Модели вычислений. Структуры данных. — Нижний Новгород: Изд-во Нижегородского гос. университета, 2005. — С. 236–237.

13. Abraham I. Highway dimension, shortest paths, and provably efficient algorithms / I. Abraham, A. Fiat, A. V. Goldberg, R. F. Werneck // *Proceedings of the twenty-first annual ACM-SIAM symposium on Discrete Algorithms*. — Society for Industrial and Applied Mathematics, 2010. — Pp. 782–793. DOI: 10.1137/1.9781611973075.6.

14. Lee C. Y. An algorithm for path connections and its applications / C. Y. Lee // *IRE transactions on electronic computers*. — 1961. — № 3. — Pp. 346–365. DOI: 10.1109/TEC.1961.5219222.

REFERENCES

1. Galin, Aleksandr V., and Pavel S. Rudny. “Liner shipping network design problem in modern transportation system of Russia.” *Vestnik Gosudarstvennogo universiteta morskogo i rechnogo flota imeni admirala S. O. Makarova* 16.1 (2024): 64–73. DOI: 10.21821/2309-5180-2024-16-1-64-73.

2. Christiansen, Marielle, Erik Hellsten, David Pisinger, David Sacramento, and Charlotte Vilhelmsen. “Liner shipping network design.” *European Journal of Operational Research* 286.1 (2020): 1–20. DOI: 10.1016/j.ejor.2019.09.057.

3. Guericke, Stefan, and Kevin Tierney. “Liner shipping cargo allocation with service levels and speed optimization.” *Transportation Research Part E: Logistics and Transportation Review* 84 (2015): 40–60. DOI: 10.1016/j.tre.2015.10.002.

4. Bellman, Richard. “On a routing problem.” *Quarterly of applied mathematics* 16.1 (1958): 87–90. DOI: 10.1090/qam/102435.

5. Thun, Kristian, Henrik Andersson, and Marielle Christiansen. “Analyzing complex service structures in liner shipping network design.” *Flexible Services and Manufacturing Journal* 29 (2017): 535–552. DOI: 10.1007/s10696-016-9262-6.

6. Dijkstra, E.W. “A note on two problems in connexion with graphs.” *Numerische Mathematik* 1 (1959): 269–271. DOI: 10.1007/BF01386390.

7. Evstigneev, V. A. *Iterativnye algoritmy global'nogo analiza grafov. Puti i pokrytiya*. Edited by A. P. Ershov. M.: Nauka. Glavnaya redaktsiya fiziko-matematicheskoi literatury, 1985.

8. Chen, Danny Z. “Developing algorithms and software for geometric path planning problems.” *ACM Computing Surveys (CSUR)* 28.4es (1996): 18-es. DOI: 10.1145/242224.242246.

9. Galkina, V. A. *Postroenie kratchaishikh putei v orientirovannom grafe // Diskretnaya matematika. Kombinatornaya optimizatsiya na grafakh*. M.: Izdatel'stvo “Gelios ARV”, 2003.

10. Kuznetsov, Aleksandr L. “Matrix method for finding the paths on weighted oriented graphs in the tasks of port net operational planning.” *Vestnik Gosudarstvennogo universiteta morskogo i rechnogo flota imeni admirala S. O. Makarova* 12.2 (2020): 230–238. DOI: 10.21821/2309-5180-2020-12-2-230-238.

11. Kröger, Martin. “Shortest multiple disconnected path for the analysis of entanglements in two- and three-dimensional polymeric systems.” *Computer physics communications* 168.3 (2005): 209–232. DOI: 10.1016/j.cpc.2005.01.020.

12. Alekseev, V.E., and V. A. Talanov. “Glava 3.4. Nakhozhdeniya kratchaishikh putei v grafe.” *Grafy. Modeli vychislenii. Struktury dannykh*. Nizhnii Novgorod: Izdatel'stvo Nizhegorodskogo gos. universiteta, 2005. 236–237.

13. Abraham, Ittai, Amos Fiat, Andrew V. Goldberg, and Renato F. Werneck. “Highway dimension, shortest paths, and provably efficient algorithms.” *Proceedings of the twenty-first annual ACM-SIAM symposium on Discrete Algorithms*. Society for Industrial and Applied Mathematics, 2010. 782–793. DOI: 10.1137/1.9781611973075.6.

14. Lee, Chin Yang. “An algorithm for path connections and its applications.” *IRE transactions on electronic computers* 3 (1961): 346–365. DOI: 10.1109/TEC.1961.5219222.

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

Грызлов Владимир Юрьевич —
генеральный директор
АО «Петербургский нефтяной терминал»
198096, Российская Федерация, Санкт-Петербург,
Элеваторная площадка, д. 32
e-mail: office@pnt.spb.ru
Уами Абделжалил — аспирант
Научный руководитель:
Кузнецов Александр Львович
ФГБОУ ВО «ГУМРФ имени адмирала
С. О. Макарова»
198035, Российская Федерация, Санкт-Петербург,
ул. Двинская, 5/7
e-mail: kaf_pgt@gumrf.ru

Gryzlov, Vladimir Yu. —
CEO
JSC “Petersburg Oil Terminal”
32 Elevatornaya Ploshadka, St. Petersburg, 198096,
Russian Federation
e-mail: office@pnt.spb.ru
Uami, Abdeljalil — Postgraduate
Supervisor:
Kuznetsov, Aleksandr L.
Admiral Makarov State University of Maritime
and Inland Shipping
5/7 Dvinskaya Str., St. Petersburg, 198035,
Russian Federation
e-mail: kaf_pgt@gumrf.ru

*Статья поступила в редакцию 6 мая 2024 г.
Received: May 6, 2024.*

DOI: 10.21821/2309-5180-2024-16-3-403-412

OPTIMIZATION OF OIL TANKERS HANDLING AT EXPORT OIL TERMINALS

A. V. Galin, G. M. Khvatov

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

The problem of optimizing the process of loading a tanker with oil products is examined in the paper. A common oil terminal layout is briefly described. The handling time for all scheduled vessels (minimization of this indicator is required) and the total time of vessels in queue (minimization is also required) are selected as optimality criteria. It is noted that this problem is interconnected with the problem of berth allocation, known in the international scientific literature as the berth allocation problem (BAP). The current state of the BAP is considered, and the development of this problem is analyzed. It is noted that research on this topic mainly focuses on container terminals and, to a lesser extent, on terminals specialized for bulk cargo. The number of BAP studies for oil terminals is not large. The task of developing a spreadsheet-based mathematical model, which would make it possible to compare berth allocation options at an oil terminal and select the optimal one, is set in the paper. The main variables of the model, their relationships, accepted assumptions and scenarios are described. Simulation results are presented and they clearly demonstrate the difference between the conditional option of the complete absence of dispatching at the terminal and the option of rational dispatching, i. e. rational distribution of vessels among berths. It is noted that even with an insignificant difference in the moment of completing the handling of all scheduled vessels, there is a significant difference between the total duration of vessel downtime. Conclusions and main possible directions for further research on this topic are formulated.

Keywords: berth allocation, oil tanker handling time, oil terminals, cargo handling, mathematical modelling, spreadsheets, rational dispatching.

For citation:

Galina, Aleksandr V., and Grigoriy M. Khvatov. "Optimization of oil tankers handling at export oil terminals." *Vestnik Gosudarstvennogo universiteta morskogo i rechnogo flota imeni admirala S. O. Makarova* 16.3 (2024): 403–412. DOI: 10.21821/2309-5180-2024-16-3-403-412.

УДК 656.6

ОПТИМИЗАЦИЯ ПОГРУЗКИ НЕФТЕНАЛИВНЫХ ГРУЗОВ НА ТАНКЕРНОМ ФЛОТЕ

А. В. Галин, Г. М. Хватов

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

В настоящей статье рассмотрена задача оптимизации процесса загрузки танкера нефтеналивными грузами. Приведено краткое описание широко распространенной конфигурации нефтеналивных терминалов. В качестве критериев оптимальности выбраны такие параметры, как время завершения грузовых операций со всеми запланированными судами (необходима минимизация этого показателя) и суммарное время судов в очереди на обработку (также необходима минимизация). Отмечается, что рассматриваемая в работе задача взаимосвязана с задачей назначения причалов судам, известной в международной научной литературе, как Berth Allocation Problem. Исследовано текущее состояние проблемы Berth Allocation Problem и выполнен анализ ее разработанности. Отмечается, что исследования по данной теме в основном сфокусированы на контейнерных терминалах и в меньшей степени на терминалах, специализированных для навалочных грузов, а также, что количество исследований задачи Berth Allocation Problem для нефтеналивных терминалов невелико. В статье ставится задача разработки математической модели на основе средств работы с электронными таблицами, которая позволит сравнивать варианты назначения причалов для судов нефтеналивного терминала, выбирая оптимальный. Описаны основные переменные модели, их взаимосвязь, принятые допущения и сценарии, на основе которых выполнено сравнение вариантов назначения причалов для танкеров. Приведены результаты

моделирования, наглядно демонстрирующие разницу между условным вариантом полного отсутствия диспетчеризации на терминале и вариантом рациональной диспетчеризации, т. е. рационального распределения судов по причалам. Отмечается, что даже при незначительной разнице в сроках окончания обработки всех запланированных судов имеется существенная разница между суммарной продолжительностью простоев судов в ожидании погрузки. Сформулированы выводы и основные возможные направления дальнейших исследований по данной теме.

Ключевые слова: назначение причалов, время стоянки танкера, нефтеналивные терминалы, грузовые операции, математическое моделирование, электронные таблицы, рациональная диспетчеризация.

Для цитирования:

Галин А. В. Оптимизация погрузки нефтеналивных грузов на танкерном флоте / А. В. Галин, Г. М. Хватов // Вестник Государственного университета морского и речного флота имени адмирала С. О. Макарова. — 2024. — Т. 16. — № 3. — С. 403–412. DOI: 10.21821/2309-5180-2024-16-3-403-412.

Введение (Introduction)

Морские терминалы по перегрузке нефти и нефтепродуктов являются одним из ключевых звеньев в транспортной цепи при реализации сырья и могут быть разделены на три зоны:

- зону приема груза: железнодорожный грузовой фронт и / или автомобильный грузовой фронт (АГФ);
- зону накопления судовых партий и временного хранения грузов (емкостной парк терминала);
- зону отгрузки нефтепродуктов на суда: морской грузовой фронт, представленный одним или несколькими причалами для перегрузки погрузки нефтепродуктов в суда.

Указанные зоны связаны между собой технологическим трубопроводом, по которому осуществляется перемещение нефтепродуктов при помощи насосов, установленных в насосных станциях. В данной статье рассмотрены вопросы оптимизации работы морского грузового фронта терминала, оснащенного причалами для перегрузки нефти. Научная новизна исследования, изложенного в настоящей статье, заключается в применении методов математического моделирования для сравнения вариантов назначения причалов заходящим в нефтеналивной порт танкерам, что может быть полезным при принятии решений о назначении того или иного причала для обработки некоторого судна.

Целью исследования является разработка простого и доступного прототипа на основе средств работы с электронными таблицами, который может быть использован для оптимизации процессов погрузки нефтеналивных грузов в танкеры на причалах морских терминалов.

Методы и материалы (Methods and Materials)

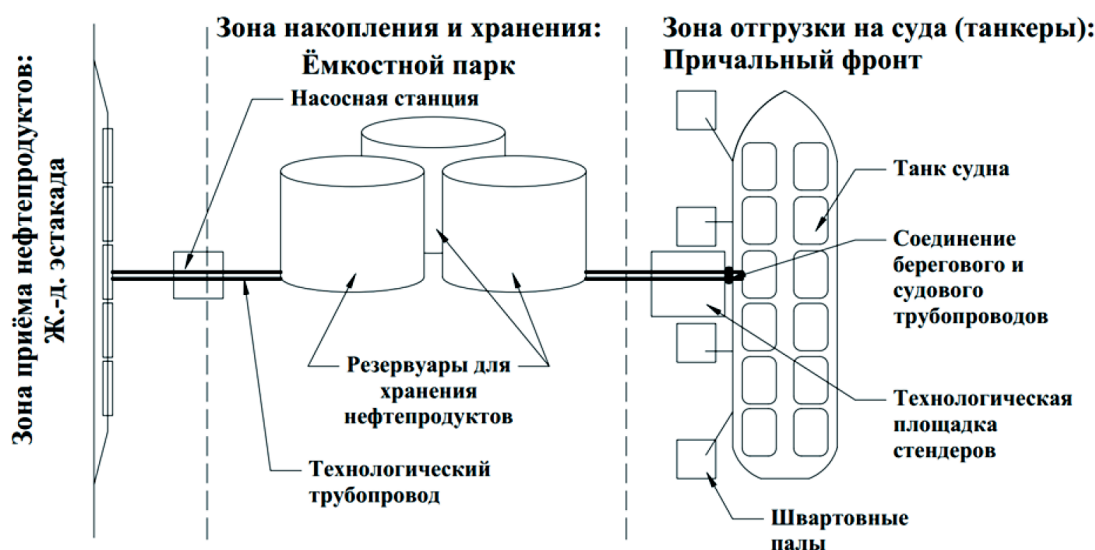
Причалы как гидротехнические сооружения проектируются с учетом различных нагрузок и заданных типоразмеров судов. Причалы для перегрузки нефти сооружаются в виде пирсов, расположенных параллельно, перпендикулярно или под углом к берегу [1].

Технологическое проектирование причалов нефти и нефтепродуктов регламентировано СП 350.1326000.2018 «Нормы технологического проектирования морских портов»¹. Данный нормативный документ устанавливает, в частности, рекомендуемые проектные нормы времени стоянки танкеров по операциям слива и налива. Кроме того, в прил. Г данного документа регламентировано рекомендуемое значение коэффициента занятости причала для терминалов, специализированных для наливных грузов на уровне 0,45–0,55.

В предлагаемом исследовании рассматривается задача оптимизации погрузки нефтепродуктов в морские танкеры на причалах нефтеналивных терминалов, условная схема одного из которых приведена на рисунке. Критерием оптимальности выбрана продолжительность обработки группы танкеров за определенный промежуток времени (в данном случае за месяц). Чем продолжительность меньше, тем более эффективна работа системы причалов на погрузку нефтепродук-

¹ СП 350.1326000.2018. Нормы технологического проектирования морских портов. М.: Стандартинформ, 2018. 218 с.

тов в танкеры. Кроме того, рассматривается суммарное время ожидания судов в очереди на рейде, возникающее при том или ином распределении судов между причалами. Время ожидания судов также должно быть минимизировано.



Условная схема нефтеналивного терминала
Schematic diagram of the oil terminal

Поставленная задача достаточно близка к задаче оптимизации назначения причалов для судов, известной в международной научной литературе под названием Berth Allocation Problem (BAP). Первые исследования по данной теме начались еще в 1990-е гг. и были представлены рядом статей, касающихся назначения причалов для судов на контейнерных терминалах [2], [3]. С момента первых публикаций до настоящего времени формулировка задачи, методы ее решения, а также классификация подвидов существенно усложнились. Авторы исследования [4] приводят библиометрический анализ исследований задачи назначения причалов (BAP), выделяя в его рамках следующие подвиды задачи по критерию времени прибытия судов в порт: статическую, динамическую, стохастическую, цикличную, со строгим расписанием.

По критерию времени обслуживания судов в порту выделяют следующие подвиды:

- с фиксированным временем обслуживания;
- с зависимостью времени обслуживания от размещения судов;
- с учетом назначения причальных перегружателей (Quay Cranes (QC));
- с учетом планирования работы причальных перегружателей QC;
- стохастическая.

По способу представления причальной стенки выделяют задачу с причальной стенкой с дискретными причалами, с непрерывной причальной стенкой, с гибридной причальной стенкой (часть причалов дискретная, часть — непрерывная).

Предложенная в исследовании [4] классификация демонстрирует сохранившуюся специфику задачи BAP. В первую очередь рассматривается задача назначения причалов на специализированных контейнерных терминалах, так как большинство исследований задачи BAP касается именно этого типа морских терминалов. Многие современные исследования рассматривают задачу BAP в совокупности с задачей планирования работы причальных перегружателей [5], [6]. Некоторые исследования учитывают особенности работы конкретных портов. Например, авторы статьи [7] учитывают ограничения, накладываемые подходным каналом к морскому порту. Существуют работы, касающиеся проблемы назначения причалов также для специализированных терминалов навалочных грузов. Авторы статьи [8] описывают математические модели для задачи BAP на навалочных терминалах.

Наиболее близкая задача к определенной в настоящем исследовании описана в статье [9]. В этом исследовании рассматривается задача назначения причалов для танкеров на экспортном нефтеналивном терминале с применением смешанного целочисленного программирования (Mixed-Integer Linear Programming, MILP) для поиска оптимальных решений.

Модель, предлагаемая в настоящем исследовании, выполнена в виде расчетного листа электронной таблицы с поддержкой макросов. Описание модели приведено в табл. 1.

Таблица 1

Основные параметры модели обработки танкерного флота у причалов терминала

Параметр	Обозначение	Ед. изм.	Описание
Производительность налива	P	м ³ / ч	Производительность налива основного объема судовой партии продуктов
Пониженная производительность в начале и конце налива	$P_{нк}$	м ³ / ч	Пониженная производительность в начале и конце налива продуктов в танкер для безопасности проведения погрузочных операций
Объем в начале и конце налива	$V_{нк}$	м ³	Объем, для которого снижается производительность в начале и конце налива продуктов в танкер
Средняя плотность продуктов	ρ	т / м ³	Условная средняя плотность наливаемых нефтепродуктов
Уникальный идентификатор судозахода	i	–	Уникальное значение, присваиваемое каждому судозаходу в модели для его идентификации
Дедвейт i -го судна	DWT_i	т	Дедвейт судна i . В модели рассчитывается на основе стенированной загрузки судна и служит для определения продолжительности вспомогательных операций танкера, не совмещаемых с грузовыми.
Загрузка i -го судна	D_i	м ³	Судовая партия нефтепродуктов для судна i . Генерируется случайным образом в заданном диапазоне
Продолжительность грузовых операций	$t_{гр.i}$	ч	Чистое время налива продуктов в танкер. Зависит от судовой партии D_i и производительности налива танкера ($P, P_{нк}, V_{нк}$)
Продолжительность технологических операций	$t_{тх.i}$	ч	Время операций шлангования танкера, замеров и подсчетов груза в танкере.
Продолжительность вспомогательных операций	$t_{всп.i}$	ч	Время швартовых операций, досмотров, комиссий и т. д. Зависит от дедвейта судна (DWT_i) и регламентируется нормами
Всего продолжительность занятости причала танкером	$t_{ст.i}$	ч	Суммарное время грузовых, технологических и вспомогательных операций, т. е. время, в течение которого причал порта будет занят обработкой танкера
Момент времени захода i -го судна в порт	τ_i	ч	Момент времени, в который судно i совершает судозаход в порт
Порядковый номер судна в потоке судов, заходящих в порт	k	–	Номер судна по порядку в общем потоке судов, заходящих в порт
Номер причала	j	–	Номер причала, входящего в причальный фронт терминала
Порядковый номер судна в очереди обработки судов у причала j	m	–	Номер судна по порядку внутри очереди обработки судов у причала j . Назначается после распределения судов по причалам
Продолжительность ожидания i -го судна	$t_{ож.mj}$	ч	Длительность ожидания судна m в очереди на обработку у причала j
Время освобождения причала j от обработки судна	$\tau_{осв.mj}$	ч	Момент времени, когда причал j освобождается от обработки судна m в очереди к этому причалу

Работу модели можно разделить на четыре основных блока:

- 1-й блок — генерация параметров судозаходов;
- 2-й блок — сортировка судозаходов по времени захода в порт (τ_i);
- 3-й блок — назначение причалов для заходящих в порт судов;
- 4-й блок — определение времени ожидания судов в очереди и времени освобождения причалов от обработки судов.

Генерация судозаходов осуществляется в виде случайной генерации судовой партии i -го судозахода в установленном диапазоне D_i , на основе которого определяется дедвейт судна (для дальнейшего определения времени вспомогательных операций) по формуле

$$DWT_i = [(D_i \rho) / 0,9]$$

Округление дедвейта происходит в большую сторону до тысяч тонн. 0,9 — коэффициент перехода от грузоподъемности судна, выраженной в тоннах, к дедвейту. На основе полученного значения DWT_i подбирается значение $t_{вспi}$ с учетом рекомендаций СП 350.1326000.2018 (прил. Ц табл. 3). Время вспомогательных операций усредняется между значениями для налива танкеров в весенне-летний и осенне-зимний периоды времени.

Чистое время грузовых операций с судном определяется по формуле

$$t_{гр.i} = (D_i - 2V_{нк}) / P + 2V_{нк} / P_{нк}.$$

Таким образом, учитывается необходимость снижения производительности налива продуктов в суда в начале и конце погрузки, для безопасности осуществления грузовых операций.

Продолжительность технологических операций (шлангование, замеры, подсчет груза) устанавливается оператором модели и в работе реального терминала должна определяться на основе статистики по таймшитах обработки судов. В приведенных далее примерах расчета на модели время технологических операций принято $t_{тхi} = 4,7$ ч.

Промежуток времени, в течение которого происходят судозаходы танкеров в порт, выбран в модели равным 1 мес. или 732 ч. Для каждого судозахода i генерируется случайным образом τ_i — момент времени, когда судно заходит в порт и готово к обслуживанию у причалов. Значения этого параметра находятся в диапазоне $0 < \tau_i \leq 732$.

Суда, заходящие в порт, сортируются на основе времени их захода τ_i от меньшего к большему значению. Таким образом, устанавливается хронологическая последовательность сгенерированных судозаходов. После сортировки каждому судозаходу присваивается порядковый номер в потоке судов, заходящих в порт (k).

В модели принят ряд допущений. В модели отсутствуют повторяющиеся заходы одних и тех же судов, несмотря на то, что реальности такие судозаходы обычно встречаются. Производительность налива грузов (P) задается одним значением для всех причалов. В реальности производительность налива продуктов определяется мощностью насосов, расположенных в насосных станциях терминала. Трубопровод разных причалов может быть подключен к разным насосным станциям с разной мощностью насосов. Кроме того, производительность налива может отличаться для разных грузов, а сами грузы могут быть разделены на группы, перекачиваемые по разному технологическому трубопроводу. В модели рассматривается один условный груз, наливаемый во все танкеры, при этом любое судно любых размеров может быть поставлено к любому причалу. Время прибытия судна в порт и время готовности судна к постановке к причалам с точки зрения модели представлены одной и той же переменной τ_i . В реальности судно, прибывшее на якорную стоянку порта, может быть не сразу готово к постановке к причалу. Соответствующая информация подается капитаном судна в виде нотиса о готовности.

После сортировки судозаходов по времени готовности судов к постановке к причалу и присваиванию порядкового номера каждому судозаходу назначается причал для каждого заходящего судна. Назначение причала судну является вопросом диспетчеризации входящего потока судов.

В реальной деятельности терминала этим вопросом занимаются специалисты диспетчерской службы оператора терминала по согласованию со службой управления движением судов (СУДС) порта. Решение о назначении данного причала судну осуществляется с учетом многих факторов. В приведенном далее примере выполнено сравнение двух сценариев назначения причалов судам: «случайного» — по сути, представляющего собой полное отсутствие диспетчеризации и случайное назначение причалов судам, и «рационального» — подбора причалов для судов исходя из информации о количестве причалов, их занятости и времени подхода судов.

Пример результата первых трех шагов модели (генерации параметров судозаходов, сортировки судозаходов и назначения причалов судам) приведен в табл. 2. В модели принято наличие трех причалов на терминале.

Таблица 2

**Пример генерации,
сортировки судозаходов и назначения причалов судам**

Номер судна	Дедвейт судна	Загрузка судна	Продолжительность операций			Продолжительность занятости причала танкером	Момент времени захода в порт	Порядковый номер судозахода	Номер назначаемого причала
			грузовых	технологических	вспомогательных				
i	$DWT_i, \text{ т}$	$D_i, \text{ м}^3$	$t_{гр}, \text{ ч}$	$t_{тх}, \text{ ч}$	$t_{всп}, \text{ ч}$	$t_{ст}, \text{ ч}$	$\tau_i, \text{ ч}$	k	j
24	38000	33814	17,3	4,7	8,75	30,7	2	1	1
14	53000	46854	23,8	4,7	10,5	39,0	15	2	2
32	25000	21790	11,3	4,7	7,75	23,7	16	3	3
31	47000	41443	21,1	4,7	8,75	34,5	21	4	1

На основе номера назначаемого причала j формируются таблицы очереди судов на обслуживание для каждого причала в отдельности. Каждому судну, попадающему в очередь обработки к причалу j , назначается порядковый номер m . Таким образом, каждый судозаход в модели можно идентифицировать по значению одной из трех переменных:

- уникальному идентификационному номеру судозахода i , присваиваемому при генерации судозаходов;
- порядковому номеру судозахода k , присваиваемому после сортировки судозаходов по времени прибытия в порт (также уникален для каждого судна).
- порядковому номеру судозахода внутри очереди к каждому из причалов m , присваиваемому после назначения причалов судам и являющемуся уникальным только в рамках очереди к конкретному причалу.

Для каждого судозахода, обрабатываемого на причале j , рассчитывается продолжительность ожидания судна в очереди на обработку $t_{ожmj}$ и момент времени освобождения причала от обработки судна $\tau_{освmj}$. Продолжительность ожидания судна с порядковым номером m у причала j определяется по следующей формуле:

$$t_{ожmj} = \max(\tau_{осв(m-1)j} - \tau_m; 0). \quad (1)$$

Если судно с порядковым номером m готово встать к причалу j в момент времени после того, как судно с порядковым номером $(m-1)$ уже закончило обработку у причала j , то выражение $\tau_{осв(m-1)j} - \tau_m$ будет отрицательным, что в реальности невозможно. В реальности это означает, что судну с порядковым номером m нет необходимости ждать, оно сразу может встать к причалу, т. е. его время ожидания равно нулю, что отображено в правой части формулы (1) после точки с запятой. Если же судно $(m-1)$ еще не закончило обработку у причала j , к моменту, когда судно m готово встать к причалу, то продолжительность ожидания судна m будет являться разницей

между моментом освобождения причала от обработки судна $(m-1)$ и моментом готовности судна m к постановке к причалу: $\tau_{осв(m-1)j} - \tau_m$.

Момент освобождения причала j от обработки судна m определяется на основе информации о моменте готовности судна m к постановке к причалу (τ_m), времени ожидания судна m в очереди к причалу j ($t_{ожmj}$) и времени, необходимом для обработки судна m у причала j ($t_{стmj}$):

$$\tau_{освmj} = \tau_m + t_{ожmj} + t_{стmj}. \quad (2)$$

Поскольку любое судно может быть идентифицировано по его порядковому номеру внутри очереди к причалу m , на основе которого может быть определен общий порядковый номер судозахода k и уникальный идентификационный номер судозахода i , продолжительность обработки судна у причала $t_{стmj}$ может быть определена как соответствующая ей величина $t_{сти}$ для подстановки в формулу (2). В табл. 3 приведен пример определения описанных величин для одного из причалов модели.

Таблица 3

Пример очереди судов в модели

Причал 1						
m	i	k	τ_m	$t_{стmj}$	$t_{ожmj}$	$\tau_{освmj}$
1	24	1	2	30,7	0,0	32,7
2	31	4	21	34,5	11,7	67,2
3	40	7	81	35,1	0,0	116,1

Далее для всех судозаходов у всех причалов определяется суммарное ожидания судов в очереди на обработку:

$$t_{ож} = \sum_{j=1}^J \sum_{m=1}^M t_{ожmj}. \quad (3)$$

Также определяется момент окончания обработки всех сгенерированных судов во всех очередях ко всем причалам:

$$T = \max(\tau_{освmj}). \quad (4)$$

Величина T , определяемая по формуле (4), является *критерием оптимальности предлагаемого распределения танкеров по причалам* и должна быть минимальной. Помимо нее размер величины $t_{ож}$, определяемой по формуле (3), также свидетельствует о качестве предоставляемых портом услуг: чем выше значение этой переменной, тем дольше суда вынуждены простаивать в ожидании постановки к причалу. Эта величина также требует минимизации.

Результаты

Выполнено три повтора генерации судозаходов, имеющих следующие значения параметров:

- количество генерируемых судозаходов — 50 ед.;
- продолжительность моделируемого периода — 1 мес. (732 ч);
- количество причалов нефтеналивного терминала — 3 ед.;
- производительность налива — 2000 м³/ч;
- производительность начальных и конечных промежутков налива — 500 м³/ч;
- объем налива с пониженной производительностью в начале и конце налива — 125 м³;
- загрузка судна 10 000–50 000 м³;
- средняя плотность нефтепродуктов — 1,0 т/м³.

Получены следующие результаты, представленные в табл. 4.

Таблица 4

Результаты моделирования

Показатель	Обозначение	Ед. изм.	Значение варианта генерации		
			1	2	3
Загрузка максимального судна	$\max(D_i)$	м ³	49844	48772	49741
Время обработки максимального судна	$t_{ст\ i}$	ч	40,5	39,9	40,4
Загрузка последнего по прибытию судна	D_{50}	м ³	48605	29653	44823
Момент прибытия последнего судна	τ_{50}	ч	731,0	708,0	705,0
Время обработки последнего судна	$t_{ст50}$	ч	39,8	28,6	36,2
Теоретически оптимальное значение момента окончания обработки судов	$T_{теор}$	ч	770,8	736,6	741,2
Момент окончания обработки судов по «случайному» сценарию	$T_{случ}$	ч	803,1	783,1	784,2
Момент окончания обработки судов по «рациональному» сценарию	$T_{рац}$	ч	780,8	763,9	741,2
Превышение теоретического оптимума по «случайному» сценарию	$T_{случ} / T_{теор}$	—	104,2 %	106,3 %	105,8 %
Превышение теоретического оптимума по «рациональному» сценарию	$T_{рац} / T_{теор}$	—	101,3 %	103,7 %	100 %
Суммарная продолжительность ожидания судов в очереди по «случайному» сценарию	$t_{ож.случ}$	ч	1101,6	1330,9	946,2
Суммарная продолжительность ожидания судов в очереди по «рациональному» сценарию	$t_{ож.рац}$	ч	224,0	219,9	244,9
Отношение суммарного ожидания судов по «случайному» сценарию к суммарному ожиданию судов по «рациональному» сценарию	$t_{ож.случ} / t_{ож.рац}$	—	492 %	605 %	386 %

Для оценки оптимальности результатов введена величина $T_{теор}$ — теоретическое оптимальное значение момента окончания обработки судов. Значение этой величины складывается из значения момента времени прибытия последнего по порядку судна ($k = 50$) и времени его обработки ($t_{ст50}$):

$$T_{теор} = \tau_{50} + t_{ст50}.$$

Значения момента окончания обслуживания судов по сценарию «случайный» ($T_{случ}$) и сценарию «рациональный» ($T_{рац}$) сравниваются со значением этого теоретического минимума. Чем ближе полученные отношения к 100 %, тем рациональнее полученное решение. Кроме того, сравниваются величины продолжительности стоянки судов в очереди на обслуживание ($t_{ож.случ} / t_{ож.рац}$). Поскольку теоретически оптимальное значение времени ожидания судов в очереди на обслуживание равно нулю, сравнивать эти значения с ним нет смысла. Чем ниже значение выражения $t_{ож.случ} / t_{ож.рац}$, тем более рациональным является найденное решение.

Обсуждение (Discussion)

Полученные результаты показывают, что при случайном назначении причалов момент окончания обработки судов превышает теоретический минимум на 4–6 %, в то время как при рациональном назначении причалов эта величина составляет 0–4 %. Согласно варианту 3 генерации судозаходов (см. табл. 4), модель смогла найти оптимальный вариант назначения причалов судам с точки зрения момента завершения их обслуживания (отношение $T_{рац} / T_{теор} = 100 \%$, т. е. момент окончания обработки судов по «рациональному» сценарию совпадает с теоретическим минимумом). При этом важно отметить, что данный показатель не является единственным критерием оптимальности.

В модели могут быть сгенерированы ситуации, когда большое количество судов заходит в порт в начале моделируемого периода, а самый последний судозаход сильно отстоит от остальных по времени и происходит в конце моделируемого периода. В таком случае вероятность того, что $T_{\text{рац}} / T_{\text{теор}} = 100 \%$ и даже $T_{\text{случ}} / T_{\text{теор}} = 100 \%$, достаточно велика. Однако между случайным и рациональным назначением причалов судам и рациональным будет также наблюдаться существенная разница в суммарном времени ожидания судов, поскольку нерациональное распределение их по причалам вызывает существенные простои. Это подтверждается результатами моделирования: отношение $t_{\text{ож.случ}} / t_{\text{ож.рац}}$ достигает 300–600 %, т. е. суммарное время ожидания судов при случайном назначении причалов в 3–6 раз превышает тот же показатель при рациональном распределении судов.

Выводы (Symmaru)

На основании выполненного исследования можно сделать следующие выводы:

1. Разработана математическая модель назначения причалов заходящим в порт судам, которая учитывает специфику нефтеналивных терминалов. Модель позволяет быстро оценить влияние принимаемого решения о назначении судну данного причала. Доступен ручной ввод назначаемых причалов судам. Из результатов моделирования, приведенных в табл. 4, видно, что основная задача данного исследования достигнута: модель является эффективным инструментом сравнения различных сценариев назначения причалов судам, имея при этом модель имеет ряд допущений.
2. Информация о моментах захода судов генерируется в модели предварительно, до моделирования, т. е. модель является *статической*. Чтобы сделать модель динамической, информация о судозаходах должна быть неизвестна до начала моделирования, что является более приближенной к реальности ситуацией.
3. Причалы в модели идентичны по своим характеристикам друг другу: производительности перекачки нефтепродуктов на различных причалах в реальности могут отличаться, а также могут существовать ограничения на постановку судов определённого размера (и дедвейта) к конкретным причалам.
4. Добавление алгоритма оптимизации позволит не только сравнивать различные варианты (сценарии) назначения причалов судам, но и автоматически оптимизировать распределение судов по причалам.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Кириченко А. В. Технологические процессы морских нефтеналивных терминалов: монография / А. В. Кириченко, О. А. Изотов, В. А. Гай, С. В. Латухов, В. А. Никитин; под общ. ред. д-ра техн. наук, проф. А. В. Кириченко. — СПб.: Изд-во МАНЭБ, 2015. — 192 с.
2. Lai K. K. A study of container berth allocation / K. K. Lai, K. Shih // Journal of advanced transportation. — 1992. — Vol. 26. — Is. 1. — Pp. 45–60. DOI: 10.1002/atr.5670260105.
3. Imai A. Efficient planning of berth allocation for container terminals in Asia / A. Imai, K. I. Nagaiwa, C. W. Tat // Journal of Advanced transportation. — 1997. — Vol. 31. — Is. 1. — Pp. 75–94. DOI: 10.1002/atr.5670310107.
4. Dragovic B. A comprehensive bibliometric analysis and assessment of high-impact research on the berth allocation problem / B. Dragovic, N. Zrnic, A. Dragovic, E. Tzannatos, M. A. Dulebenets // Ocean Engineering. — 2024. — Vol. 300. — Pp. 117163. DOI: 10.1016/j.oceaneng.2024.117163.
5. Rodrigues F. Berth allocation and quay crane assignment/scheduling problem under uncertainty: A survey / F. Rodrigues, A. Agra // European Journal of Operational Research. — 2022. — Vol. 303. — Is. 2. — Pp. 501–524. DOI: 10.1016/j.ejor.2021.12.040.
6. Tang M. Discretization-strategy-based solution for berth allocation and quay crane assignment problem / M. Tang, B. Ji, X. Fang, S. S. Yu // Journal of Marine Science and Engineering. — 2022. — Vol. 10. — Is. 4. — Pp. 495. DOI: 10.3390/jmse10040495.
7. Corry P. The berth allocation problem with channel restrictions / P. Corry, C. Bierwirth // Transportation Science. — 2019. — Vol. 53. — No. 3. — Pp. 708–727. DOI: 10.1287/trsc.2018.0865.

8. Ernst A. T. Mathematical models for the berth allocation problem in dry bulk terminals / A. T. Ernst, C. Oğuz, G. Singh, G. Taherkhani // *Journal of Scheduling*. — 2017. — Vol. 20. — Pp. 459–473. DOI: 10.1007/s10951-017-0510-8.

9. Alfares H. K. Berth Allocation for Loading Tankers at an Oil Export Terminal / H. K. Alfares // *Applied Optimization in the Petroleum Industry*. — Cham: Springer International Publishing, 2023. — Pp. 237–259. DOI: 10.1007/978-3-031-24166-6_10.

REFERENCES

1. Kirichenko, A.V., O. A. Izotov, V. A. Gai, S. V. Latukhov, and V. A. Nikitin. *Tekhnologicheskie protsessy morskikh nefteanalivnykh terminalov*. Edited by A. V. Kirichenko. SPb.: Izd-vo MANEB, 2015.

2. Lai, K. K., and Katharine Shih. “A study of container berth allocation.” *Journal of advanced transportation* 26.1 (1992): 45–60. DOI: 10.1002/atr.5670260105.

3. Imai, Akio, Ken'ichiro Nagaiwa, and Chan Weng Tat. “Efficient planning of berth allocation for container terminals in Asia.” *Journal of Advanced transportation* 31.1 (1997): 75–94. DOI: 10.1002/atr.5670310107.

4. Dragović, Branislav, Nenad Zrnić, Andro Dragović, Ernestos Tzannatos, and Maxim A. Dulebenets. “A comprehensive bibliometric analysis and assessment of high-impact research on the berth allocation problem.” *Ocean Engineering* 300 (2024): 117163. DOI: 10.1016/j.oceaneng.2024.117163.

5. Rodrigues, Filipe, and Agostinho Agra. “Berth allocation and quay crane assignment/scheduling problem under uncertainty: A survey.” *European Journal of Operational Research* 303.2 (2022): 501–524. DOI: 10.1016/j.ejor.2021.12.040.

6. Tang, Min, Bin Ji, Xiaoping Fang, and Samson S. Yu. “Discretization-strategy-based solution for berth allocation and quay crane assignment problem.” *Journal of Marine Science and Engineering* 10.4 (2022): 495. DOI: 10.3390/jmse10040495.

7. Corry, Paul, and Christian Bierwirth. “The berth allocation problem with channel restrictions.” *Transportation Science* 53.3 (2019): 708–727. DOI: 10.1287/trsc.2018.0865.

8. Ernst, Andreas T., Ceyda Oğuz, Gaurav Singh, and Gita Taherkhani. “Mathematical models for the berth allocation problem in dry bulk terminals.” *Journal of Scheduling* 20 (2017): 459–473. DOI: 10.1007/s10951-017-0510-8.

9. Alfares, Hesham K. “Berth Allocation for Loading Tankers at an Oil Export Terminal.” *Applied Optimization in the Petroleum Industry*. Cham: Springer International Publishing, 2023. 237–259. DOI: 10.1007/978-3-031-24166-6_10.

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

Галин Александр Валентинович —
доктор технических наук, профессор
ФГБОУ ВО «ГУМРФ имени адмирала
С. О. Макарова
198035, Российская Федерация, г. Санкт-Петербург,
ул. Двинская 5/7
e-mail: galin2403@gmail.com, kaf_top@gumrf.ru
Хватов Григорий Михайлович — аспирант
Научный руководитель:
Галин Александр Валентинович
ФГБОУ ВО «ГУМРФ имени адмирала
С. О. Макарова
198035, Российская Федерация, г. Санкт-Петербург,
ул. Двинская 5/7
e-mail: Gregorykhvatov@gmail.com

INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Galin, 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: galin2403@gmail.com, kaf_top@gumrf.ru
Khvatov, Grigoriy M. — Postgraduate
Supervisor:
Galin, Aleksandr V.
Admiral Makarov State University of Maritime
and Inland Shipping
5/7 Dvinskaya Str., St. Petersburg, 198035,
Russian Federation
e-mail: Gregorykhvatov@gmail.com

Статья поступила в редакцию 22 апреля 2024 г.

Received: April 22, 2024.

DOI: 10.21821/2309-5180-2024-16-3-413-420

MULTI-CRITERIA ASSESSMENT OF THE COMBINED SHIPMENTS CONTAINER TRANSPORTATION POSSIBILITY

O. A. Izotov

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

The topic of the study is the organization of combined shipments transportation using container technologies, which is a complex multi-purpose decision-making task both technically and economically. The complexity of this task is due to the fact that when choosing an option, making a decision on transportation, many criteria and requirements, which often conflict with each other, have to be taken into account. It is noted that currently almost all mathematical methods for optimizing transport processes are designed to find the extremum of one objective function. Therefore, in the course of solving transport problems, multi-purpose tasks are often reduced to single-purpose ones and, as a rule, lead to a distortion of the problem essence and, as a result, to the substitution of one task for another. At the same time, in modern transport science, there is no established approach as to which transportation indicators should be considered alternative when solving problems with several target functions, since they tend to minimize the set of acceptable options at various points. A method based on making compromise decisions is considered in the paper. It consists in organizing transportation based on a balanced decision, in which, in a certain proportion, all accounting factors for organizing the combined shipments transportation from the marine terminal territory to the interior of the mainland using established and promising technology for applying new means of cargo consolidation, namely, cargo delivery range using container technologies, transportation cost and time. When using this method, it is assumed that not an unambiguous answer, but a whole range of rational proposals for decision-making by the responsible person will be received.

Keywords: container technologies, multi-criteria tasks, combined shipments, in-container modules.

For citation:

Izotov, Oleg A. "Multi-criteria assessment of the combined shipments container transportation possibility." *Vestnik Gosudarstvennogo universiteta morskogo i rechnogo flota imeni admirala S. O. Makarova* 16.3 (2024): 413–420. DOI: 10.21821/2309-5180-2024-16-3-413-420.

УДК 656.073.7

МНОГОКРИТЕРИАЛЬНАЯ ОЦЕНКА ВОЗМОЖНОСТИ КОНТЕЙНЕРНЫХ ПЕРЕВОЗОК СБОРНЫХ ПАРТИЙ ГРУЗОВ

О. А. Изотов

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

Темой исследования является организация перевозок сборных партий грузов с применением контейнерных технологий — сложная многоцелевая задача принятия решений как в техническом, так и в экономическом плане. Сложность данной задачи обусловлена тем, что при выборе варианта принятия решения о перевозке приходится учитывать многие критерии и требования, часто вступающие в противоречие друг с другом. Отмечается, что в настоящее время почти все математические методы оптимизации транспортных процессов предназначены для нахождения экстремума одной целевой функции. Поэтому в ходе решения транспортных задач многоцелевые задачи нередко сводятся к одноцелевым, что приводит, как правило, к искажению сути проблемы и, как следствие, к подмене одной задачи другой. В предлагаемой работе рассмотрен метод на основе принятия компромиссных решений, заключающийся в организации транспортировки на основе взвешенного решения, в котором в определенной пропорции могут фигурировать все существующие факторы организации перевозки сборных партий грузов с территории морского терминала вглубь материка с применением существующих перспективных технологий применения новых средств укрупнения грузов, а именно: дальность доставки грузов с применением контейнерных технологий, стоимость транспортировки и сроки перевозки. При использовании

данного метода предполагается получение не однозначного ответа, а множества рациональных предложений для принятия решения ответственным лицом.

Ключевые слова: контейнерные технологии, многокритериальные задачи, сборные партии грузов, внутриконтейнерные модули.

Для цитирования:

Изотов О. А. Многокритериальная оценка возможности контейнерных перевозок сборных партий грузов / О. А. Изотов // Вестник Государственного университета морского и речного флота имени адмирала С. О. Макарова. — 2024. — Т. 16. — № 3. — С. 413–420. DOI: 10.21821/2309-5180-2024-16-3-413-420.

Введение (Introduction)

Современное развитие видов транспорта ставит перед организаторами перевозочного процесса сложные задачи комплексного использования транзитного потенциала транспортной инфраструктуры и провозных возможностей средств транспорта. В результате в ходе построения и оценки вариантов транспортировки грузов экспедитор выполняет обработку значительного объема информации (критериев, отражающих этапы перевозки) для удовлетворения потребностей своего клиента, заставляя с учетом предстоящих издержек. На основе приведенных далее вариантов организации перевозки сборной партии грузов может быть построена целевая функция. При этом рассмотрение единственной целевой функции позволяет применять эффективные методы решения оптимизационных задач, в достаточной степени описывающие сравнительно простые ситуации. Однако такие оптимизационные модели не в полной мере описывают реальную действительность, тогда как те или иные процессы преследуют достижение сразу нескольких независимых или зависимых друг от друга целей [1].

В качестве примера рассмотрим следующие варианты организации перевозки сборной партии грузов с морского терминала до получателя:

- доставка грузов магистральным видом транспорта в большегрузном контейнере до пункта перевалки (распределительного или логистического центра) с последующим довозом до получателя арендованным или собственным автомобильным транспортом;
- растарка большегрузного контейнера на морском терминале, в сухом порту или на прилегающем к порту железнодорожном грузовом дворе / железнодорожной грузовой станции с последующим довозом грузов до получателя смежным видом транспорта;
- растарка на морском терминале из большегрузного контейнера и доставка грузов до получателя во внутриконтейнерном модуле с применением контейнерных технологий на всем пути следования [2], [3].

Указанные варианты организации доставки сборных партий грузов преследуют следующие основные цели, которые экспедитору необходимо определенным образом систематизировать для удовлетворения следующих запросов клиента:

- достижение горизонта доставки — L , км;
- сокращение затрат, связанных с транспортировкой — C , руб.;
- сокращение времени транспортировки — T , сут.

Как правило, данные запросы противоречат друг другу, но участникам транспортного процесса приходится с этим считаться, выполняя предварительную оценку всех указанных параметров для принятия решения на перевозку. Такие задачи, в которых имеется не одна, а сразу несколько целевых функций, имеют название *многокритериальных* [4]. Таким образом, можно сформулировать задачу по разработке модели многокритериальной оценки возможности организации контейнерных перевозок сборных партий грузов.

Для дальнейшего исследования важно учесть, что с внедрением в оборот контейнерных технологий доставки грузов новых средств укрупнения число поставленных целей управления перевозкой начинает совпадать с числом инструментария, доступного для достижения указанных целей. Кроме того, согласно существующему мнению экономистов, если число целей превышает число инструментария, то решение целевой функции будет иметь *приближенный характер*, т. е. оно не дает

однозначного ответа. Поэтому в данной работе будем исходить из следующего условия: *число целей, составляющих целевую функцию, не превышает числа инструментария для ее достижения.*

Следует отметить, что в своих работах исследователи подобных операций: Е. С. Вентцель «Исследование операций» (М., 1988. 206 с.), И. В. Гайшун и др. «Высшая математика для экономистов» (Минск: БГЭУ, 2005. 623 с.), Ю. И. Дегтярев «Исследование операций» (М., 1986. 269 с.), П. В. Конюховский «Математические методы исследования операций в экономике» (СПб., М., Харьков, Минск: Питер, 2000. 208 с.), рассматривая целевые функции применительно к системам управления в более широком смысле, предлагают оценку следующих критериев: степень достижения рассматриваемой целевой функции, уровень усилий, необходимый для достижения целевой функции, и эффективность достижения целевой функции.

В данном исследовании предложена методика принятия решения на перевозку на основе удовлетворения требований потенциального клиента транспортных услуг.

Методы и материалы (Methods and Materials)

В постановке задачи рассматривается организация перевозки сборной партии груза с применением различных средств укрупнения вглубь материка на расстояние, принятое за некоторую условную константу (в силу зависимости протяженности маршрутов от привлекаемых к перевозке видов транспорта) с n возможными вариантами издержек по транспортировке и с m затратами временных параметров доставки грузов. При этом оценка вариантов перевозок требует минимизации обоих показателей. Кроме того, владелец груза может быть более заинтересован в минимизации одного из рассматриваемых вариантов перевозки в силу своих предпочтений. Тогда модель может выглядеть следующим образом:

$$\min \sum_{j=1}^n c_j x_j; \quad (1)$$

$$\min x_1, \quad (2)$$

при следующих условиях:

$$x_j \geq 0, j = 1, 2, \dots, n;$$

$$\sum_{j=1}^n a_{ij} x_j \leq b, i = 1, 2, \dots, m.$$

Если игнорировать одну из целевых функций (например, (1)), то поиск минимального значения $x_1 = \bar{x}_1$, удовлетворяющего приведенным ранее условиям, упрощается. При этом отсутствует уверенность в том, что при $x_1 = \bar{x}_1$ целевая функция (2) достигнет минимума. Можно сделать аналогичный прогноз, если игнорировать целевую функцию (2) и искать минимум функции (1).

В многокритериальных задачах ограничения, накладываемые на решение конкретной задачи, не позволяют сделать вывод об оптимальности того или иного варианта рассматриваемой перевозки. В частности, решение $(x_1^1, x_2^1, \dots, x_n^1)$ хуже, чем решение $(x_1^2, x_2^2, \dots, x_n^2)$ в случае, если выполняются неравенства:

$$\sum_{j=1}^n c_j x_j^1 < \sum_{j=1}^n c_j x_j^2;$$

$$x_1^1 < x_1^2.$$

Кроме того, следует отметить, что не существует такого решения $(x_1^*, x_2^*, \dots, x_n^*)$, которое обеспечивало бы одновременно минимум обеих функций (1) и (2).

Результаты и обсуждения (Results and Discussion)

Основным отношением, в соответствии с которым выполняется сравнение исходов, является отношение доминирования по Парето (рис. 1) [5], [6]. Множество Парето представляет

собой набор всевозможных компромиссных решений для участников перевозочного процесса при условии, что решение находится за рамками рассматриваемых границ, т. е. преследуя повышение качества одного из рассматриваемых критериев (целей), оно приведет к безусловному снижению качества других.

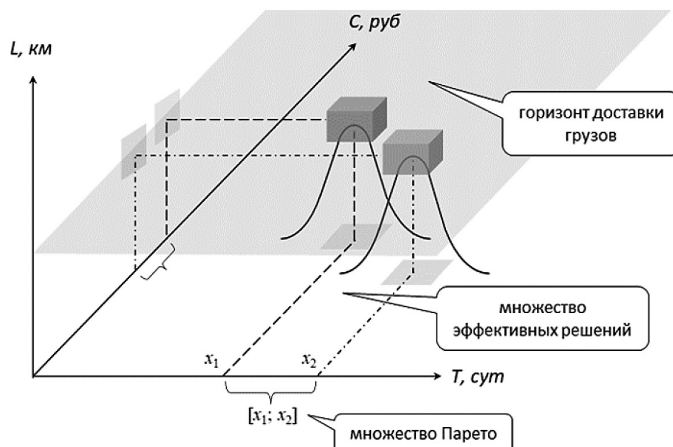


Рис. 1. Поиск компромисса на множестве Парето
Fig. 1. Finding a compromise on the Pareto set

Из рис. 1 следует, что сохраняя горизонт доставки, пункт назначения грузом может быть достигнут в течение различного периода времени и с различной стоимостью издержек по транспортировке. Такая оценка возможностей средств транспорта вместе с тем создает для пользователя услуг «коридор» принятия решения в свою пользу. Таким образом, методы решений многокритериальных задач в том или ином виде предусматривают наличие мнения участников перевозочного процесса, принимающих окончательное решение [7], [8].

Первым методом решения задачи при этом может выступать способ сведения двух выбранных критериев к одному. При этом производится взвешивание относительной важности каждого критерия, т. е. исходя из «внемоделных» соображений выбирается число α ($0 \leq \alpha \leq 1$) при построении единой целевой функции:

$$\alpha \left(\sum_{j=1}^n c_j x_j \right) + (1 - \alpha) x_1. \quad (3)$$

Дальнейшие рассуждения сводятся к сопоставлению данных. Если $\alpha = 1$, то принятие решения на перевозку учитывает только целевую функцию (1), при этом функция (2) не рассматривается. Если $\alpha = 0$, то в основе решения будет функция (2). Оптимизационная задача с единственной целевой функцией (3), удовлетворяющая решению исходной задачи с двумя функциями (1) и (2), попадает тем самым в зависимость от оценки проблемы участниками перевозочного процесса [9].

Второй метод основан на применении последовательных уступок. Рассматривая только одну целевую функцию (2), в которой $\min x_1 = \bar{x}_1$, можно сделать вывод о том, что при $x_1 = \bar{x}_1$ целевая функция (1) может находиться достаточно далеко от необходимого результата, и от участников перевозки требуется определенного рода уступка. Организатор перевозочного процесса под влиянием неравенства x_1 и $\bar{x}_1$ соглашается рассмотреть их отличие, например, на 10 %. Таким образом, задачу можно сформулировать следующим образом:

$$\begin{aligned} & \min \sum_{j=1}^n c_j x_j; \\ & x_j \geq 0, j = 1, 2, \dots, n; \\ & \sum_{j=1}^n a_{ij} x_j \leq b_i, i = 1, 2, \dots, m; \\ & 0,9\bar{x}_1 < x_1 < \bar{x}_1. \end{aligned}$$

Задача в такой постановке с единственной целевой функцией решается известными методами, поскольку величина x_1 примет значение $\bar{x}_1$. При этом процесс уступок может быть продолжен, при этом главное четко определить, чем организатор перевозки готов пожертвовать: *сроками* или *стоимостью доставки грузов* [10].

Технология доставки сборных грузов в большегрузных контейнерах с дроблением на тарно-штучные единицы для отправки смежными видами транспорта или во внутриконтейнерных модулях предполагает для организаторов перевозок пересмотр границ диапазонов принятых технологий перевозок (рис. 2) на одно и то же расстояние [11], [12].

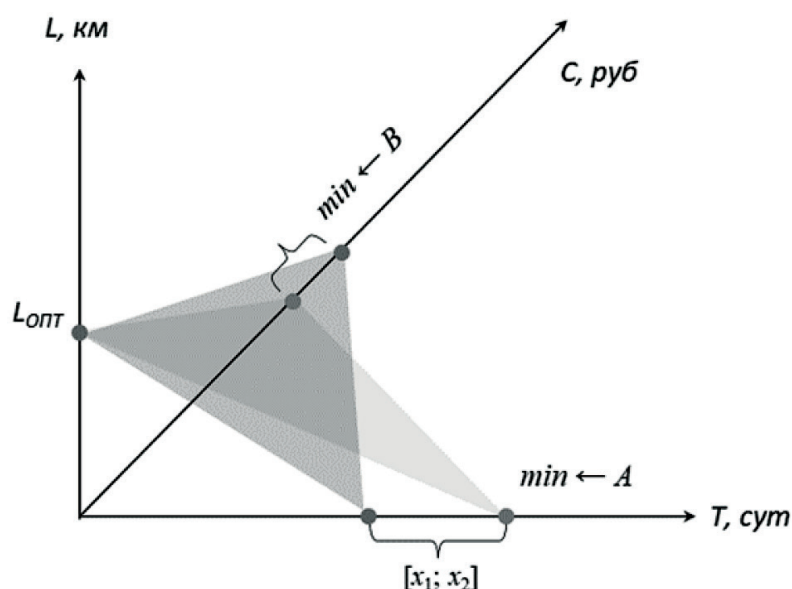


Рис. 2. Границы диапазонов принятых технологий перевозок сборных грузов
Fig. 2. Limits of the ranges of accepted technologies for transportation of combined cargo

Отказ от перевалки сборной партии груза из большегрузного контейнера на смежный вид транспорта предусматривает сокращение общего количества перегрузок, простоев в пунктах перевалки, а следовательно, снижение стоимости транспортных издержек. Применение контейнерных технологий вглубь материка способствует также сокращению времени доставки грузов (рис. 3) [13]–[16].

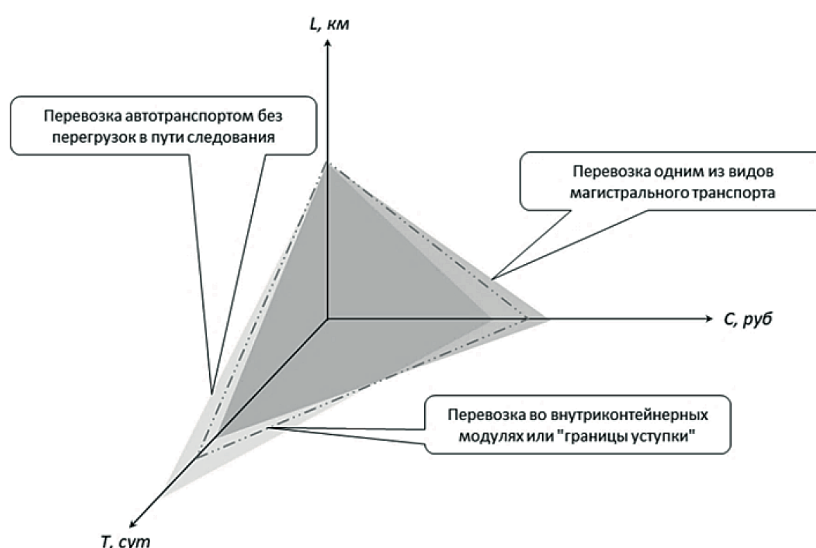


Рис. 3. Пространственная модель принятия многокритериальных решений
Fig. 3. Spatial model of multi-criteria decisions making

Кроме того, дополнительные услуги в виде применения новых средств укрупнения сборных партий грузов предполагают расширение границ применения контейнерных технологий на протяжении всего пути следования груза, что также может отвечать требованиям участников перевозки.

Заключение (Conclusion)

Целесообразность формулирования целевой функции в предложенном виде объясняется прежде всего необходимостью оценки возможности включения в контейнерные технологии организации перевозок сборных партий грузов новых средств укрупнения, обеспечивающих «стыковку» морских контейнерных линий с внутренними наземными видами транспорта на территории России. В результате можно сделать вывод о том, что при равенстве количества выбранных критериев для выбора конечных целей управления перевозкой с количеством инструментария, доступного для достижения указанных целей, экспедитор может успешно оценить и предложить своему клиенту возможные варианты доставки сборных партий грузов вглубь материка, в том числе с применением контейнерных технологий.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Мезенцев Ю. А. Некоторые аспекты задач оптимального проектирования при нескольких критериях предпочтения. / Ю. А. Мезенцев, Ю. В. Кириллов // Сборник научных трудов Новосибирского государственного технического университета. — 2003. — № 3 (33). — С. 21–40.
2. 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.
3. 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.
4. Кириллов Ю. В. Многокритериальное моделирование как основа информационных технологий поддержки принятия решений / Ю. В. Кириллов // Фундаментальные исследования. — 2004. — № 6. — С. 114–116.
5. Иванов Л. Н. К вопросу о Парето-оптимальности решений задач векторной оптимизации / Л. Н. Иванов, Ю. В. Кириллов // Сборник научных трудов Новосибирского государственного технического университета. — 2003. — № 3 (33). — С. 61–74.
6. Кириллов Ю. В. Использование методов векторной оптимизации в современных информационных технологиях управления / Ю. В. Кириллов // Стратегия бизнеса и социально-экономическое развитие региона: сб. статей участников 6-й Всерос. науч.-практ. конф., Ярославль, 27 ноября 2003. — Ярославль: Ремдер, 2003. — С. 748–753.
7. Kirillov Yu. Optimization of a price policy with using of vector-stochastic models / Yu. Kirillov, A. Shestakova // Modelling, Computation and Optimization in Information Systems and Management Sciences MCO 2004: Fifth International conference on Computer Science. July 1–3, 2004, Metz University, France. — France, 2004.
8. Домашова Д. В. Методы решения задач многокритериальной оптимизации: методические указания к практическим занятиям / Д. В. Домашова. — Оренбург: ГОУ ОГУ, 2008. — 49 с.
9. Ногин В. Д. Принятие решения при многих критериях. Учебно-металлическое пособие / В. Д. Ногин. — СПб.: Издательство «ЮТАС», 2007. — 104 с.
10. Кини Р. Л. Принятие решений при многих критериях: предпочтения и замещения / Р. Л. Кини, Х. Райфа. — М.: Радио и связь, 1981. — 37 с.
11. 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.
12. 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.

13. Изотов О. А. Оценка требуемых технологических ресурсов путем статистического моделирования / О. А. Изотов, А. В. Гульяев // Вестник Государственного университета морского и речного флота имени адмирала С. О. Макарова. — 2018. — Т. 10. — № 3. — С. 497–506. DOI: 10.21821/2309-5180-2018-10-3-497-506.

14. 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.

15. Демидова Л. А. Принятие решений в условиях неопределенности / Л. А. Демидова, В. В. Кираковский, А. Н. Пылькин. — М.: Горячая линия — Телеком, 2012. — 290 с.

16. Сердюкова Л. О. Формирование инновационной транспортно-логистической системы на цифровой платформе / Л. О. Сердюкова, Р. Р. Баширзаде, А. В. Пахомова // Научно-технические ведомости Санкт-Петербургского государственного политехнического университета. Экономические науки. — 2020. — Т. 13. — № 2. — С. 64–78. DOI: 10.18721/JE.13206.

REFERENCES

1. Mezentsev, Yu. A., and Yu. V. Kirillov. "Nekotorye aspekty zadach optimal'nogo proektirovaniya pri neskolkikh kriteriyakh predpochteniya." *Sbornik nauchnykh trudov Novosibirskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta* 3(33) (2003): 21–40.

2. 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.

3. 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.

4. Kirillov, Yu.V. "Mnogokriterial'noe modelirovanie kak osnova informatsionnykh tekhnologii podderzhki prinyatiya reshenii." *Fundamental Research* 6 (2004): 114–116.

5. Ivanov, L.N., and Yu. V. Kirillov. "K voprosu o Pareto-optimal'nosti reshenii zadach vektornoj optimizatsii." *Sbornik nauchnykh trudov Novosibirskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta* 3(33) (2003): 61–74.

6. Kirillov, Yu.V. "Ispol'zovanie metodov vektornoj optimizatsii v sovremennykh informatsionnykh tekhnologiyakh upravleniya." *Strategiya biznesa i sotsial'no-ekonomicheskoe razvitie regiona: Sb. statei uchastnikov 6-i Vseros. nauch.-prakt. konferentsii*. Yaroslavl: Remder, 2003. 748–753.

7. Kirillov, Yu., and A. Shestakova. "Optimization of a price policy with using of vector-stochastic models." *Modelling, Computation and Optimization in Information Systems and Management Sciences MCO 2004: Fifth International conference on Computer Science*. France, 2004.

8. Domashova, D. V. *Metody resheniya zadach mnogokriterial'noi optimizatsii: metodicheskie ukazaniya k prakticheskim zanyatiyam*. Orenburg: GOU OGU, 2008.

9. Nogin, V. D. *Prinyatie resheniya pri mnogikh kriteriyakh*. SPb.: Izdatel'stvo «YuTAS», 2007.

10. Keeney, R.L., and H. Raiffa. *Decision with Multiple Objectives: Preference and Value Tradeoffs*. New York: Cambridge University Press, 1993. DOI: 10.1017/CBO9781139174084.

11. 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.

12. 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.

13. 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: 10.21821/2309-5180-2018-10-3-497-506.

14. 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.

15. Demidova, L.A., V. V. Kirakovskii, and A. N. Pyl'kin. *Prinyatie reshenii v usloviyakh neopredelennosti*. M.: Goryachaya liniya — Telekom, 2012.

16. Serdyukova, L. O., R. R. K. Bashirzade, and A. V. Pakhomova. "Digital platforms for development of innovative transport logistic systems." *St. Petersburg State Polytechnical University Journal. Economics* 13.2 (2020): 64–78. DOI: 10.18721/JE.13206.

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРЕ

Изотов Олег Альбертович —
доктор технических наук, доцент
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 AUTHOR

Izotov, Oleg 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: iztv65@rambler.ru, kaf_pgt@gumrf.ru

*Статья поступила в редакцию 13 мая 2024 г.
Received: May 13, 2024.*

DOI: 10.21821/2309-5180-2024-16-3-421-443

REALIZATION OF THE SMOOTHNESS OF SPLINE TRAJECTORY CONFIGURATION FOR AVOIDANCE OF NO-GO AREAS IN DUE TIME

I. V. Yuyukin

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

The configuration of the spline trajectory with the integration of the sleekness criterion into the optimization of the path when moving a marine mobile object in a given direction, taking into account restrictive navigational obstacles, is considered. The smoothness of the trajectory is investigated as the use of the possibility of avoidance of no-go area due to the organization of variable flexibility of the spline structure as the realization of the possibility of rapid dynamic redevelopment in case of unavailability of the initially chosen path. The understanding of intelligent path planning as effective routing is argued with the strategic compliance of the condition for the fastest possible achievement of the goal of the shortest movement in a conflict navigation environment. The phenomenon of cubic B-spline approximation is substantiated as a rational means of synthesizing a path line, since the planned trajectory can be generated in a segmented manner for different variations of the curvature of an algebraic curve based on a balanced combination of isogeometric constraints with optimal arrangement of nodes. The variable generation of the spline shape is performed by coordinating grid points with finite functions while interactive implementing the smoothing effect. It is concluded that heuristic variation of smoothing parameters makes it possible to obtain B-splines of various geometric evolution with the possibility of transforming the multi-link structure of the ship motion line without the need to form a fundamentally new route. The hypothesis of spline structures stability due to the piecewise architecture of the spline, when local violations of mathematical composition do not critically affect the overall task of modeling the trajectory configuration is put forward. The expediency of using variable simulation of a maneuverable trajectory in real time for path planning due to the operational bending of cubic B-splines in order to avoid any collisions is noted. As a demonstration of the practical applicability of constructing the optimal configuration of the spline trajectory, two different variants of the spline route in real time are designed in the form of sequential computer screenshots. The issue of providing automated route formation with synchronous representation of geometric computer support of a safe way line to the watch assistant, stimulating the possibility of intellectual assistance to the navigator in using the strategy of instantaneous adoption of an agreed decision on ship management by providing situational awareness, is actualized. The developed algorithm has been tested as a harmonized support for the navigation staff in the organization of effective routing. A hypothetical use of a planned approach for calculating the trajectory of a marine autonomous surface vessel in order to practically form the concept of unmanned navigation is proposed.

Keywords: spline trajectory, no-go area, intelligent path planning, conflict navigation environment, B-spline approximation.

For citation:

Yuyukin, Igor V. "Realization of the smoothness of spline trajectory configuration for avoidance of no-go areas in due time." *Vestnik Gosudarstvennogo universiteta morskogo i rechnogo flota imeni admirala S. O. Makarova* 16.3 (2024): 421–443. DOI: 10.21821/2309-5180-2024-16-3-421-443.

УДК 656.61.052

РЕАЛИЗАЦИЯ ПЛАВНОСТИ КОНФИГУРАЦИИ СПЛАЙН-ТРАЕКТОРИИ ДЛЯ СВОЕВРЕМЕННОГО УКЛОНЕНИЯ ОТ ЗАПРЕТНЫХ РАЙОНОВ ПЛАВАНИЯ

И. В. Ююкин

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

Рассмотрено конфигурирование сплайн-траектории с интеграцией критерия гладкости в оптимизацию пути при следовании морского подвижного объекта в заданном направлении с учетом ограничительных

навигационных препятствий. Плавность траектории исследована в качестве использования возможности уклонения от запретного района плавания за счет организации вариативной гибкости сплайновой конструкции в качестве реализации возможности быстрой динамической перепланировки в случае недоступности изначально выбранного пути. Аргументировано понимание интеллектуального планирования пути как эффективной маршрутизации при стратегическом соблюдении условия максимально быстрого достижения цели кратчайшего перемещения в конфликтной навигационной среде. Обоснован феномен кубической В-сплайновой аппроксимации как рациональное средство синтеза линии пути, поскольку планируемая траектория может быть сгенерирована сегментированным образом для разных вариаций кривизны алгебраической кривой на основе сбалансированного сочетания изогеометрических ограничений при оптимальной расстановке узлов. Изменчивое генерирование сплайновой формы выполнено путем координирования сеточных точек с финитными функциями при интерактивной реализации эффекта сглаживания. Сделан вывод о том, что эвристическое варьирование параметров сглаживания позволяет получать В-сплайны различной геометрической эволюции с возможностью трансформации многозвенной структуры линии движения судна без необходимости формирования принципиально нового маршрута. Ввиду кусочной архитектуры сплайна выдвинута гипотеза устойчивости сплайновых конструкций, когда локальные нарушения математической композиции критически не отражаются на общей задаче моделирования траекторной конфигурации. Отмечается целесообразность применения вариативного моделирования маневренной траектории в режиме реального времени для планирования пути за счет оперативного изгибания кубических В-сплайнов во избежание любых столкновений. В качестве демонстрации практической применимости построения оптимальной конфигурации сплайн-траектории спроектированы в виде последовательных компьютерных скриншотов два различных варианта сплайнового маршрута в режиме реального времени. Актуализирован вопрос обеспечения автоматизированного формирования маршрута с синхронным представлением геометрического компьютерного сопровождения безопасной линии пути вахтенному помощнику, стимулирующему возможность интеллектуальной помощи штурману в использовании стратегии мгновенного принятия согласованного решения по управлению судном за счет обеспечения ситуационной осведомленности. Разработанный алгоритм апробирован в качестве гармонизированной поддержки судоводительскому составу при организации эффективной маршрутизации. Предложено гипотетическое использование сплайнового подхода для расчета траектории морского автономного надводного судна с целью практического формирования концепции безэкипажного судходства.

Ключевые слова: сплайн-траектория, запретный район плавания, интеллектуальное планирование пути, конфликтная навигационная среда, В-сплайновая аппроксимация.

Для цитирования:

Ююкин И. В. Реализация плавности конфигурации сплайн-траектории для своевременного уклонения от запретных районов плавания / И. В. Ююкин // Вестник Государственного университета морского и речного флота имени адмирала С. О. Макарова. — 2024. — Т. 16. — № 3. — С. 421–443. DOI: 10.21821/2309-5180-2024-16-3-421-443.

Введение (Introduction)

Успешное решение задач безопасности традиционного и автономного судовождения зависит от умения судоводителей выбирать эффективную стратегию планирования маршрута как поиск оптимальной траектории на основе новых интеллектуальных технологий навигационных систем при широком спектре современного контроля движения судна относительно навигационных опасностей [1]. Одновременно с организацией процесса навигации фактически осуществляется задача информативной маршрутизации как выбор наилучшей траектории при следовании морского подвижного объекта в заданном направлении с учетом ограничительных препятствий. Эффективная математическая формализация программных траекторий в системах управления автономными судами позволяет судоводителю и дистанционному управляющему решать задачи обработки навигационной информации в стесненных районах плавания на новом качественном уровне совместно с традиционными лоцманскими методами [2]. Композиция эффективного маршрута в аспекте электронного подъема карты формирует основу интеллектуальной навигации. Под интеллектуальным планированием пути понимается задача многофакторного анализа безопасного перехода логистической единицы из некоторого исходного состояния в целевое конечное посредством высокоточного фиксирования координат. В морской индустрии прослеживается аналогия данного подхода в реализации необходимости безопасного следования судна из порта отхода

в порт прихода в рамках актуальной концепции штурманской проработки перехода морем. Со стратегических позиций планирования траектории по методу дорожной карты формируется стратегический геометрический путь, проходящий через контрольные точки с учетом тактической возможности своевременного уклонения от навигационных опасностей на любом участке маршрута. Автоматическое планирование маршрута рассматривается как фундаментальная функция автономной навигации мобильного транспортного средства между начальной и целевой путевыми точками без столкновений с навигационными препятствиями.

В ходе практической реализации исследования сформулированы следующие задачи:

1. Алгоритмическое обеспечение задачи построения гибкой конфигурации сплайн-траектории с целью реализации феномена математической плавности как основного критерия оптимизации.
2. Использование точности аппроксимации в качестве вторичного фактора оптимизации как регулятора конфигурации сплайновой линии движения судна с учетом эффекта сглаживания.
3. Апробирование алгоритма моделирования навигационной траектории базисными сплайнами для оптимальной маршрутизации с дополнительной целью реализации возможности безопасного уклонения от запретных районов плавания за счет гибкого оперирования формой аппроксиматора.
4. Адаптация высокоскоростного алгоритма кусочной аппроксимации для синтеза вариативной гибкости модификации сплайн-траектории.
5. Программная реализация для бортового компьютера сплайн-алгоритма при интерактивной маршрутизации в режиме реального времени.
6. Геометрическая интерпретация моделирования навигационной траектории на основе графических средств компьютерной визуализации.
7. Рассмотрение возможности практического применения разработанного прикладного программного обеспечения для организации плавания морских автономных надводных судов по оптимальным сплайновым траекториям как инновационной перспективы удаленного управления активным флотом.

Методы и материалы (Methods and Materials)

Оптимизация траектории рассматривается как реализация возможности избежания опасных навигационных зон за счет организации вариативной гибкости сплайновой конструкции при стратегическом соблюдении условия оптимального достижения цели кратчайшего перемещения в конфликтной среде. Аналогичным образом данный подход согласуется с классической проблематикой проработки морского перехода при традиционной мотивации уклонения от многочисленных препятствий. При перемещении из начальной точки в точку назначения можно двигаться по разным траекториям, но представляется логичным отдать предпочтение наиболее выгодной из них. Перспективность альтернативной навигации определяется с учетом информативности навигационного поля как экстремальной области целевой задачи судовождения на основе выстраивания карты навигационного поля с одновременной геолокацией. Информативность навигационного поля может быть представлена максимально наглядным образом в виде векторной электронной карты с учетом визуализации концепции «слоеной информации» [3].

Прерогатива альтернативной навигации автономно следующего по маршруту судна понимается как высокоточное определение местоположения с ориентацией на бортовую картографическую информацию в сравнении с фактическим фрагментом определенного геофизического поля, зафиксированного посредством специальной измерительной аппаратуры. Оперативное картографирование позволяет заблаговременно выделить безопасные для целей маршрутизации области навигационного поля. Современный метод комплексирования измерительных данных с нескольких бортовых датчиков позволяет получить более надежную и точную информацию для одновременного картографирования и локализации позиционирования в целях результативности автономной навигации [4]. Применение картографированной информативности реализуется

при наличии на борту виртуального носителя эталонной карты зоны коррекции навигационного поля. Измерительный датчик сканирует фрагмент поля в виде последовательности отсчетов физических параметров с определенной дискретностью вдоль исполнительной траектории.

Задача метода коррекции в конечном итоге состоит в том, чтобы методом «привязки» измеренного фрагмента поля к эталонной карте постоянно фиксировать географические координаты судна [5]. Уточнение измерений выполняется методом поиска максимального или минимального экстремума функционала корреляции измеренного фрагмента с эталоном, полученным из информативности карты навигационного поля для безусловного подтверждения гипотезы совпадения данных навигационных параметров.

Выбор предварительной траектории напрямую связан с анализом навигационной информативности. Последняя однозначно определяет меру эффективности использования изотропного навигационного поля для наискорейшего вычисления координат морского подвижного объекта с учетом априорной и апостериорной информации об особенностях его движения [6]. Обеспечение стабильности маршрута абсолютно коррелируется с физической реализуемостью точности удержания судна на заданном маршруте, что является важнейшим фактором адаптивного управления в современном судовождении [7]. Основой для построения «гладкого» пути является не маршрут как таковой, а прогностический «коридор» точности следования судна с учетом действия течения и ветро-волновых возмущающих факторов при возможности максимальной удаленности траектории как центральной линии пути от навигационных препятствий. Фиксированный «коридор» для морского подвижного объекта определяет взаимозависимое множество факторов безопасности, при соблюдении которых непрерывная траектория, соединяющая заданные начальную и конечную точки маршрута, является кратчайшей [8]. Характеристика оптимальной по «гладкости» траектории фокусируется на обязательном прохождении объекта водного транспорта внутри заданного «коридора» точности плавания в многопараметрической среде множества навигационных опасностей. Аналогично в электронной навигации при подъеме карты формируется маршрут перехода в коридоре безопасности с тактическими границами дистанции бокового отклонения как величины допустимого смещения судна в перпендикулярном направлении от запланированной линии пути. В качестве возможного маршрутного «коридора» может быть эффективно использована сегментированная математическая конструкция многообразия возможных конфигураций сглаживающих *B*-сплайнов.

Субъективность оценки оптимальности планируемого судоводителем маршрута при традиционных методах его формирования не позволяет в полной мере выполнить качественную обработку необходимой информации. Ключевая задача навигации по планированию и автоматическому построению программного движения судна требует применения новых математических подходов решения [7]. Актуальным является рассмотрение иных вариантов алгебраических кривых, позволяющих аналитически задавать физически реализуемые программные траектории в целях повышения безопасности как традиционного, так и автономного судовождения [2]. Подход с позиций *B*-сплайнового метода позволяет нивелировать консервативность задачи планирования пути судна. В качестве нового способа представляется целесообразным организовать генерирование безопасного пути на основе алгоритма кубических сплайнов, позволяющего избежать избыточной сложности кусочных аппроксимаций и одновременно в полном объеме сконфигурировать тщательное планирование маршрута следования подвижного объекта [9]. Линия оптимального пути с позиций *теории аппроксимации* должна быть «гладкой» кривой, что означает успешность дифференцируемости навигационной функции в точках непрерывности производной [10]. Гладкая «склейка» последовательных сплайновых групп обеспечивается заданием алгоритмических условий непрерывности производных аппроксимированной навигационной функции в местах стыковки кусочных фрагментов. Эффективный способ устранения осцилляций синтезированной траектории заключается в геометрическом построении составного многозвенника, в котором кусочные полиномы третьей степени последовательно применяются для организации функциональных групп на сетке контрольных точек. Полученная в результате кусочно-полиномиальная функция

в идеальном варианте будет непрерывной, но в общем случае может иметь разрывы определенных производных в точках соединения сплайновых сегментов.

Для решения задачи качественной маршрутизации представляется разумным применить аппроксимирующую функцию, так как расчеты показывают, что использование сплайна снижает погрешность навигации на 15–20 % по сравнению с альтернативными математическими методами [11]. Результаты исследований подтверждают, что методы моделирования траекторий с минимальным изменением кривизны на основе B -сплайнов дают линии пути, по которым фактически можно передвигаться быстрее в среднем на 32 % по сравнению с используемыми в настоящее время традиционными подходами [12].

В рамках стратегии интеллектуального планирования перехода самостоятельную актуальность приобретает решение проблемы моделирования оптимальной траектории методами кубических B -сплайнов как практической реализации тактики безопасного движения мобильного объекта в конфликтной среде [13]. Наилучшее с позиций навигации непосредственное планирование траектории может быть реализовано эффективным способом на основе интеграционной технологии B -сплайнов. Изменчивое генерирование формы алгебраической кривой выполняется путем координирования характеристических точек с финитными функциями B -сплайна [14].

Требование точности приближения B -сплайновой изолинии к предварительной траектории действует в качестве дополнительного регулятора как аналог полиномиальных энергий упругого сжатия для реализации задачи оптимизации траектории в физическом понимании. Численные расчеты на достаточно трудном тесте, подобном известному примеру Рунге, показали, что гарантированно обеспечивается высокая точность аппроксимации в ситуации применения базисных сплайнов. Для B -сплайна действительно хорошей оказалась обусловленность минимального влияния ошибок округления при достижимой суммарной погрешности аппроксимации 10^{-7} любой измерительной величины, что убедительно показывает преимущество приближения финитными функциями [15]. На основе результатов авторского вычислительного эксперимента получена аналогичная точность расчета кубическими B -сплайнами в числовом диапазоне $10^{-6} \dots 10^{-8}$ погрешности навигационного параметра [16]. Предлагаемый метод кубической B -сплайновой аппроксимации задает меньшие экстремумы кривизны алгебраической кривой при ее аналогичной дифференциальной непрерывности, что концептуально обеспечивает *сглаживающий эффект* [17]. Сбалансированное сочетание изогеометрических ограничений при оптимальной расстановке фиксированных узловых точек по схеме Марсдена для получения приемлемой точности аппроксимации позволяет избежать математически вырожденных результатов.

Геометрическое преимущество траектории, построенной при помощи B -сплайнов третьей степени, заключается в том, что фиктивное изменение одной из характеристических точек изолинии вызовет изменение только четырех последовательных соседних сегментов кривой. Данный факт локальности означает тактическую возможность корректировки общей формы траектории без стратегической перестройки всей линии пути. При этом необходимо учитывать, что базисный сплайн, по сути, представляет собой математическую абстракцию по отношению к оригинальной линии равных значений навигационных параметров. Финитный кубический сплайн, синтезирующий по дискретным данным в каждом элементе сплайнового набора искусственную конструкцию маршрутизации, не является непосредственно фактическим фрагментом аппроксимируемой кривой, но при этом формирует максимально близкую к реальности навигационную траекторию. Как оптимальный аппроксиматор B -сплайн обеспечивает последовательное соединение фрагментарных носителей без резких функциональных изменений и разрывов, что формирует приемлемую «склеенную» сплайн-траекторию в навигационном пространстве запланированного пути. Базисные сплайн-функции позволяют алгоритмически эффективно выполнить трансформацию многозвенной структуры линии движения судна без кардинальной переконфигурации всего маршрута. Главная причина устойчивости сплайновых конструкций заключается в кусочной математической архитектуре сплайна, когда локальные фальшивые нарушения математической композиции критически не отражаются на общей задаче моделирования траектории.

Результаты (Results)

Методы, основанные на сплайн-функциях, могут играть важную роль при стратегическом и тактическом планировании маршрута. Подход с позиций прогрессивной математики характеризуется практичностью реализации траектории с учетом локальных минимумов навигационной функции при тщательном анализе информативности геофизического поля как потенциальной среды альтернативного позиционирования. В классическом подходе к глобальному планированию линии движения автономного надводного средства используются полные априорные сведения о степени конфликтности окружающей среды в аспекте навигации: начальная и конечная позиции, целевая ориентация в конфигурационном пространстве и набор запретных районов плавания с полной информацией о каждом навигационном препятствии в виде геометрической контурной формы, местоположения и вероятной степени опасности. При интеллектуальном подходе операция планирования маршрута становится виртуальной, поскольку полная информация об окружающей среде доступна при выполнении электронного подъема карты. Это позволяет оптимизировать математическое решение с учетом различных критериев, чтобы получить эффективный путь следования судна относительно ограничительных препятствий.

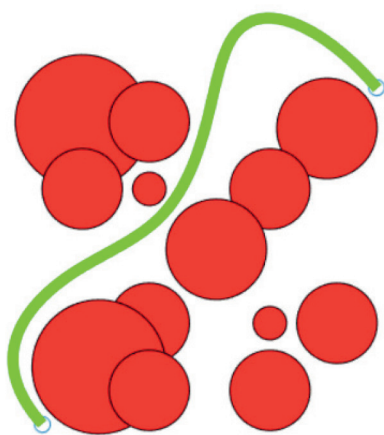
В алгоритме моделирования оптимального сплайн-пути следует учитывать апостериорную способность аппроксиматора генерировать траекторию без навигационных столкновений с препятствиями в режиме реального времени. В ситуации с элементами искусственности предварительной прокладки судоводитель может изначально не обладать полными знаниями о конфликтности окружающей среды, что впоследствии, безусловно, спровоцирует несовпадение предварительной и исполнительной прокладок. Подход к планированию траектории на основе использования концепции информативности навигационного поля, в которой навигационные препятствия представлены отталкивающими окружностями, представляется, безусловно, перспективным. Алгоритм планирования траектории на основе сплайна позволяет обеспечить стратегическую минимизацию длины пути, его плавности с учетом многофакторности критериев безопасности за счет возможности быстрого динамического переконфигурирования геометрии маршрута в случае, если изначально автономный выбранный путь становится нецелесообразным.

Прагматичный алгоритм традиционно рассматривает стандартную маршрутизацию судна в двумерном конфигурационном варианте, где навигационные препятствия представлены в виде конечной группы пересекающихся окружностей разного размера. Гипотеза, предполагающая геометрическое представление набора ограничений, основана на утверждении, что форма любого произвольного статического препятствия может быть в большинстве ситуаций практически аппроксимирована конечным набором окружностей с различными радиусами.

После получения в графическом представлении полной информации о конфликтности среды, а также начальной и целевой позициях маршрута можно выбрать путь, свободный от столкновений с опасностями в виде контуров окружностей разного размера, который оптимизируется вариативностью «гладкости» применяемой сплайн-функции с признаком успешной дифференцируемости аналитического функционала. При этом предполагается вероятностное существование некоторого минимального расстояния между различными препятствиями, обеспечивающего безопасный проход мобильного подвижного объекта. Графическая реализация подхода оптимизации к сплайн-траектории автономной навигации в конфликтной среде навигационных препятствий окружающей среды в качестве входных данных в плоскостном варианте приведена на рис. 1 [18].

Оригинальный метод, основанный на сплайн-функциях, позволяет получить «гладкую» траекторию без столкновений с препятствиями для любой сложности навигационной среды, если каждую опасность условно обозначить отдельным кругом при неукоснительном выполнении логического условия существования препятствий для определения допустимого кратчайшего сближения, позволяющего обеспечить поиск «коридора» безопасности для движущегося по траектории судна. Навигационное препятствие любой степени опасности может быть априорно зафиксировано конечным набором окружностей. Различная степень опасности навигационных препятствий

аппроксимируется диаметром круга запретного района плавания. Радиус круга является аналогом веса навигационного препятствия с целью реализации максимальной вероятности заблаговременного уклонения от уязвимой зоны за счет отталкивающей геометрии контура опасности. На рис. 1 представлена возможная ситуация распределения физических препятствий, сконцентрированных внутри каждой окружности группового набора навигационных ограничений различной степени опасности. На электронной карте покрывающие запретные районы окружности с текстурно-цветовой заливкой периметра можно оперативно обозначить при использовании редактора ручной корректуры с учетом средней квадратической погрешности (СКП) навигационной функции. Расчет СКП рассчитывается по классической формуле математических основ судовождения как квадратный корень из суммы квадратов СКП навигационных параметров в произведении с частными производными функциональных аргументов. Совместное действие случайной и систематической погрешностей измерений интерпретируется как дополнительное приращение навигационной функции.



*Рис. 1. Оптимизация вариативной сплайн-траектории
для реализации своевременного уклонения от навигационных препятствий*
*Fig. 1. Optimization of a variable spline trajectory
to avoid the navigation obstacles in due time*

В физической интерпретации сплайновый алгоритм планирования пути синхронизируется с методом потенциального поля. В данном подходе со стороны целевой точки маршрута на судна условно действуют силы притяжения, а со стороны навигационных препятствий — силы отталкивания. Предполагается, что морской подвижный объект движется по линии градиента в направлении минимума потенциального поля. Для обеспечения траектории, свободной от столкновений, применение окружности запретного района необходимо рассматривать как функцию потенциала отталкивания с высоким значением внутри препятствия и небольшим значением в пределах контурной границы кругового периметра. Таким образом, при оптимизации пути высокое значение потенциальной функции в центре препятствия «выталкивает» все точки маршрута из него при параллельном выполнении условия минимизирования общей длины морского перехода. Потенциальное поле начинает резко меняться на границе препятствия, продолжая уменьшаться с расстоянием, когда маршрутная точка удаляется от границы запретного района плавания, и быстро обращается в ноль в непосредственной близости от препятствия, что в физическом смысле организует так называемый *локальный минимум навигационного поля*. Поскольку потенциальная функция отталкивания от препятствия быстро уменьшается по мере удаления от контура препятствия, можно пренебречь условной вероятностью «торможения» мобильного объекта в локальном минимуме потенциального поля в смысле потери минимально допустимого расстояния между навигационными препятствиями, что может обеспечить безопасный «коридор» для движения судна по запрограммированной траектории.

В ситуации вероятности сближения с препятствием на дистанцию, сопоставимую троекратному значению СКП, используется метод рационального решения обхода навигационного препятствия с противоположной стороны. Предполагается вводить цветовую палитру для каждого одиночного круга как степени соответствия опасности уязвимого района плавания в потенциальном поле навигационной среды. Так, например, красный цвет обычно ассоциируется с высоким риском опасности следования судна в недопустимой близости контурного круга запретного района (см. рис. 1) при апостериорной оценке точности местоположения в минимальном расстоянии пути от препятствий с учетом СКП как фактической реализации затратной функции. Зеленый цвет траектории символизирует безопасность маршрута. Процедура оптимизации распространяется только на те точки траектории, которые определяют ее сплайн за счет реализации феномена плавности, в то время как при учете фактора минимизации пути учитываются абсолютно все точки маршрута. Интеллектуальный сплайн, формирующий траекторию, оперативно перестраивается на каждой итерации с использованием апостериорной информации об увеличении степени риска запланированной маршрутизации.

Процесс алгоритмизации завершается, если количество итераций превышает заданный пользователем предел или если новая итерация не улучшает предыдущую. Экспериментальное сравнение на основе нескольких тысяч тестов показало, что комбинированный сплайновый алгоритм оптимизации пути требует в среднем на 10 % меньше итераций, чем любой альтернативный математический подход при гарантированной успешности нахождения оптимального маршрута в восемнадцати различных моделируемых средах [18]. Для получения окончательного пути может потребоваться максимально девять минут в сложном варианте маршрутизации [18]. Локальная перепланировка маршрута может быть сокращена по времени за счет финального подбора оптимальной конфигурации сплайн-функции. При этом время вычислений в минутах на каждую сплайновую итерацию не препятствует безопасности применения алгоритма на водном транспорте в силу инерционной специфики маневренности судна и традиционной заблаговременности поступления информации об изменениях навигационной обстановки.

При использовании интеллектуального сплайна с интеграцией критерия «гладкости» в оптимизацию пути становится возможным синтезировать траекторию так, чтобы избежать локальных осцилляций и в полной мере соответствовать соблюдению стандартов безопасности судождения. В ситуации обнаружения вахтенным помощником на маршруте новых препятствий выполняется мгновенное тактическое перестроение форматированной траектории за счет эмпирических методов моделирования геометрической конструкции сплайн-функций с целью моментального обхода стационарных и динамических препятствий [14].

По итогам выбора свободного от препятствий маршрута выполняется интерактивный подбор сглаживающих коэффициентов для улучшения результирующего пути за счет обеспечения плавности траектории. Результаты экспериментов, проведенных в Санкт-Петербургском институте информатики и автоматизации, показали, что сглаживание траектории снижает ее кривизну в пределах 24–42 % [19]. Феномен обусловлен тем, что сглаженная кривая характеризуется значительными изгибами, что снижает ее общую кривизну при достижении эффекта плавности. Сглаживание компенсирует кривизну траектории на критических участках маршрута для плавного формирования линии пути с целью достижения маневренности в поворотных точках.

Кубические B-сплайны являются рациональным средством для сглаживания линии пути, так как планируемая траектория может быть сгенерирована многосегментным образом для разных вариаций кривизны при любой неблагоприятной конфигурации препятствий [20]. Методы на основе базисных сплайнов являются перспективным инструментом для построения локальных траекторий за счет манипулирования как позициями характеристических точек, так и их весовыми параметрами для создания оптимальной схемы восстановления программируемой линии движения судна. Использование сплайновых кривых является эффективным способом сглаживания благодаря четким геометрическим интерпретациям и математической стабильности при моделировании оптимальной траектории [21].

Прерогативой пользователя является задание сглаживающих коэффициентов в интерактивном режиме, что дает возможность оперативного построения B -сплайна, достаточно точно синтезирующего выпуклую оболочку коридора маршрутной точности плавания. Варьирование параметров сглаживания позволяет получать сплайны различной геометрической эволюции. Базовые функции кубического сплайна для реализации плавной конфигурации формы моделируемой кривой алгоритмически подлежат регулировке на основе изменения значения коэффициентов весовых параметров [22]. Оптимальный подбор управляющего коэффициента в образной метафоре профессора Карл Де Бора представляется *абстрактным виртуальным ключом, после удачного поворота которого можно получить удовлетворительную аппроксимацию данных* [23]. Интерактивный подход позволяет оптимальным образом практически решить *проблему сглаживания* в реализации компромисса двух противоречивых требований точности и «гладкости» при обоюдной важности необходимых условий успешной аппроксимации для компенсации сплайновых осцилляций. Наибольшую эффективность аппроксимации показывает архитектура кубических сплайновых конструкций с учетом параметра сглаживания для гибкого моделирования формы алгебраических кривых [24]. При различных значениях весовых коэффициентов кривая приближается к оригинальной траектории или отодвигается от нее со стратегическим плавным соединением кусочных сегментов, исключая возможность разрывов производных в позициях сплайновой «склейки». Локальная конфигурация формы кривой может быть достигнута путем введения дополнительных весовых коэффициентов в математический базис.

Классическая безопасная эксплуатация судна требует тщательного планирования траектории движения для обеспечения точного, выполнимого и безопасного перехода от точки к точке в потенциально сложной навигационной среде. Для получения выигрышной аппроксимационной траектории предполагается использовать кусочные полиномы третьей степени. Метод настройки изгиба кубического сплайна с использованием феномена «гладкости» для обхода препятствий позволяет интерактивным образом уточнять траекторию в целях более точного планирования безопасного пути с отклонениями от запретных районов плавания в режиме реального времени в неструктурированной конфликтной среде. Стратегически сплайновая кривая строится, модифицируется и управляется контрольными точками, положение которых можно задать в интерактивном режиме в соответствии с требованиями конкретной навигационной задачи. Изменение позиций маркерных точек приводит к изменению формы кривой, что позволяет пользователю тактически гибко настраивать генезис виртуальной формы генерируемой линии [25].

Характеристики базисных сплайнов обладают набором удобных свойств при планировании траектории движения судна с учетом непрерывности первой производной в кубическом варианте сплайна. Математически кубический сплайн имеет класс «гладкости» C^2 на минимальном компактном носителе. Это означает, что кубический сплайн формализуется кусочно-полиномиальной дважды непрерывно дифференцируемой функцией однократного дефекта «гладкости», составленной из фрагментов кубических многочленов. Непрерывность и «гладкость» сплайновой конструкции гарантированно обеспечивается в точках соединения общей многозвенной композиции. Производные первого и второго порядка кубического сплайна непрерывны. Погрешности в позиции одного отдельного узла не влияют на общую форму аппроксимационной контурной линии благодаря свойству локальности.

Теоретически элементы сплайнового многозвенника могут быть «склеены» между собой в узлах сетки до разной степени «гладкости», начиная с того, что математически допускаются разрывы некоторых производных. Поскольку для оптимальности траектории требуется дифференцируемая функция, исключаяющая точки геометрического разрыва, следует обратиться к кубическим сплайнам как чрезвычайно гибкой конструкции, позволяющей осуществить наилучшие приближения сложных геометрических линий. Концептуально аппроксимирующая сплайн-функция состоит из цепочки полиномов с обязательным условием «склейки» соседних в последовательности полиномов таким образом, чтобы полиномиальные коэффициенты и значения их производных на сеточных «стыках» совпадали для обеспечения реалистичности генезиса плавности

траектории. Для универсальной ситуации применения базисного кубического сплайна фактически используются только четыре соседних полинома в каждой произвольной расчетной точке. Оптимальная траектория синтезируется на основе умножения последовательности «шапочных» функций из фиксированной группы базисных полиномов на расчетные скалярные коэффициенты в каждой произвольной координате. В данной трансформации финитная функция является вторичной по отношению к оригинальной траектории, а непосредственно B -сплайн — исключительным математическим инструментарием для приближения навигационной функции.

Создание плавных траекторий является чрезвычайно важным фактором для достижения стабильного и эффективного движения мобильных объектов. Для исключения проектирования траектории с большим количеством необязательных и резких поворотов необходим процесс последующего сглаживания. Моделирование показывает, что сплайновый подход улучшает качество сглаженной траектории с точки зрения длины и максимальной кривизны траектории [26]. *Сглаживающий сплайн* характеризуется тем, что проходит в некоторой окрестности заданных исходных значений с фиксированной погрешностью измерений навигационных параметров, в отличие от интерполяционного сплайна, строго проходящего через все позиции точно измеренных данных. При решении вопроса о том, какой сплайн формировать, необходимо в первую очередь учитывать погрешности информационных данных.

Практически бесполезным является применение аппроксимационного сплайна, когда экспериментальная информация задана с точностью, сопоставимой с погрешностью представления чисел в двоичной системе счисления компьютерных вычислительных операций. С учетом эволюции теории аппроксимации неизбежно приходится строить *сглаживающий сплайн* в ситуации, когда, согласно условиям формирования оптимальной траектории, на качественные характеристики кусочного многосвязника в «коридоре» ограничений накладываются *граничные условия*. Генерирование маршрута начинается из точки отхода при начальном заданном курсе. Следовательно, новые траектории могут быть инициализированы исходя из текущего положения водного транспортного средства и направления его движения. Поскольку первая производная сплайн-траектории пропорциональна направлению движения судна, наличие непостоянной производной может привести к неосуществимому пути, но поскольку вторая производная пропорциональна углу поворота транспортной единицы, неправильный учет радиуса циркуляции заставят морской подвижной объект тормозиться в каждой путевой точке для регулировки автоматического рулевого управления. При условии создания сплайн-траектории с непрерывными производными появляется гарантия плавного управления на протяжении всего пути.

Математический подход, используемый при создании сплайнов, позволяет эффективно создавать плавные траектории через заданный набор контрольных точек. Оптимальность траектории обеспечивается вводом дополнительных путевых точек вблизи каждого препятствия с перспективой перемещения реперных точек в гарантированную отдаленность от препятствий в свободные зоны навигационной безопасности. За счет перемещения сеточных точек появляется конструктивная возможность гибкого изгибания сформированной алгебраической кривой для безопасного перемещения в конфликтной окружающей среде при использовании ее в качестве превентивного трекинга.

В традиционных обозначениях американского профессора Карл де Бора типичная непрерывная кусочно-полиномиальная функция с неубывающим набором сеточных точек ξ_i в виде действительных чисел для генерации последовательности кусочных кубических многочленов P_i условно может быть представлена наглядным образом так, как, например, показано на рис. 2 [27], где синим цветом обозначена оригинальная сплайновая контурная линия в локальной системе координат как практическая реализация функционального многосвязника сплайн-функций. Каждый полиномиальный многочлен P_i однозначно определяется его скалярными коэффициентами и неразрывностью производных в формате учета степени «гладкости». Варьирование коэффициентами B -сплайна позволяет моделировать аппроксимирующую функцию оптимальным образом. Аналогично кусочно-полиномиальные функции, комбинированные в сегментах «склейки» математическими сред-

ствами в единый многозвенник синего цвета (см. рис. 2), определяются посредством задания конкретной композиции ξ_i декартовых координатных точек.

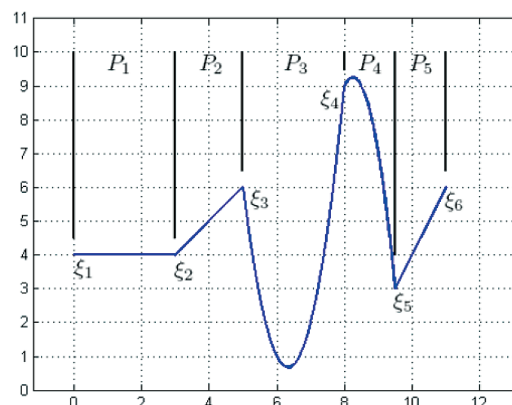


Рис. 2. Демонстрационный многозвенник кусочно-полиномиальной функции
Fig. 2. Demonstrational multilink of a piecewise polynomial function

Собственный опыт применения в программировании кусочных аппроксимаций показывает, что использование кубических конструкций гарантированно обеспечивает экономичное приближение любой навигационной функции при правильном выборе сеточных точек ξ_i на оси вещественных чисел, поскольку *гридированные данные* однозначно определяют интервал определенности сплайн-функций [28]. Всестороннее понимание термина «сплайн» определяет оптимальную достижимость конкретной реализации финитно-базисной архитектуры синего многозвенника как проявление специфической точки зрения на конструирование кусочно-многочленных функций. Так, представленная на рис. 2 сплайн-функция синего цвета, является демонстрационным примером синтезированной траектории, приведенной не для эстетического восприятия, а с целью понимания сути организации моделирования линии пути с позиций подхода кусочных аппроксимаций.

В практических приложениях судовождения имеется уникальная возможность наложения дополнительных ограничений на сплайн-траекторию с целью оперативного управления формой алгебраической кривой. При рассмотрении вопроса манипулирования формой восстанавливаемого кубическим сплайном математического объекта в новой парадигме изометрического анализа допускается практическая возможность изгиба «гладкой» кривой в физическом приложении. Данный геометрический эффект ориентирует исследователя на теоретическую возможность синтеза наиболее сложных изолиний. Для получения оптимальной интерполяции с математической точки зрения практически выгодно использовать кусочные полиномы третьей степени.

Кубический сплайн имеет максимальный класс «гладкости», обеспечивающий наличие обязательной непрерывности производных первого и второго порядка в серии точек «склейки» кусочного конгломерата. Дифференцируемость до вторых производных в точках многозвенового соединения однозначно не создает «гладкости» кубического сплайна в смысле приближения минимума кривизны искусственно созданной алгебраической кривой. С целью получения минимума кривизны или максимума «гладкости» для любой траектории необходимо принципиально обеспечить правильную ориентацию набора контрольных вершин характеристического многоугольника сплайнового базиса. При правильном выборе кубического многочлена с ограничениями сплайна начальной и конечной точек на основе задания первой производной как фиксирование напряжения сплайновой контурной линии гарантировано уникальное решение задачи создания оптимального маршрута судна. В общем случае все математические недостатки можно устранить за счет реалистичного обобщения функционала «шапочных» функций понятием *B*-сплайна.

Сплайн-траектория синтезируется путем умножения последовательности «шапочных» функций $B_i(x)$ на расчетные скалярные коэффициенты c_i как в каждой узловой точке, так и в любой про-

межуточной точке сеточного интервала. Так как компоненты $B_i(x_i)$ финитны, в каждом узле x_i от нуля отличны только активные элементы с номерами $i-1, i, i+1$ (рис. 3). Как показано на этом рисунке,

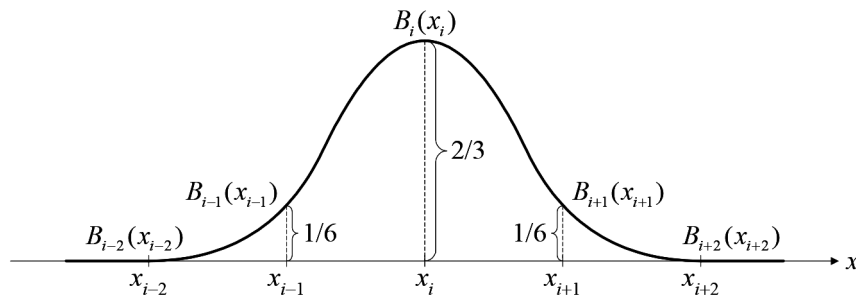


Рис. 3. Финитность базисных функций кубического B-сплайна
Fig. 3. Finiteness of basis functions of a cubic B-spline

финитность математической конструкции означает, что функции B-сплайна практически имеют ненулевые значения только на сеточных интервалах, которые составляют его носитель. Узловые значения $B_i(x_i)$ базисного кубического сплайна на пятиузловом сеточном интервале принимают следующие числовые значения:

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

Так как функции $B_i(x_i)$ финитны, в каждом узле x_i от нуля отличны только активные функции с номерами $i-1, i, i+1$ (см. рис. 3). Следовательно, условия интерполяции траектории приобретают конкретную математическую реализацию:

$$c_{i-1}B_{i-1}(x_i) + c_iB_i(x_i) + c_{i+1}B_{i+1}(x_i) = f_i, i = 1, \dots, N \quad (1)$$

где f_i — дискретные сеточные значения навигационной функции $U = f(x, y)$ в локальной системе координат.

При этом в данном случае система (1), составленная из N уравнений, имеет $N+2$ неизвестных c_i . Поэтому для ее замыкания следует добавить граничные условия по первой производной, математически задающие физическую напряженность сплайновой траектории:

$$\left. \begin{aligned} c_0B'_0(x_1) + c_1B'_1(x_1) + c_2B'_2(x_1) &= f'_1; \\ c_{i-1}B_{i-1}(x_i) + c_iB_i(x_i) + c_{i+1}B_{i+1}(x_i) &= f_i, i = 1, \dots, N; \\ c_{N-1}B'_{N-1}(x_N) + c_NB'_N(x_N) + c_{N+1}B'_{N+1}(x_N) &= f'_N. \end{aligned} \right\} \quad (2)$$

Исключив c_0 и c_{N+1} из алгебраической системы (2), получим:

$$\begin{aligned} c_0 &= \frac{f'_1 - c_1B'_1(x_1) - c_2B'_2(x_1)}{B'_0(x_1)}; \\ c_{N+1} &= \frac{f'_N - c_{N-1}B'_{N-1}(x_N) - c_NB'_N(x_N)}{B'_{N+1}(x_N)}. \end{aligned} \quad (3)$$

Первое и последнее уравнения условий интерполяции приобретают вид:

$$\begin{aligned} c_0B_0(x_1) + c_1B_1(x_1) + c_2B_2(x_1) &= f_1; \\ c_{N-1}B_{N-1}(x_N) + c_NB_N(x_N) + c_{N+1}B_{N+1}(x_N) &= f_N. \end{aligned} \quad (4)$$

Подставив в уравнения (4) вместо коэффициентов c_0 и c_{N+1} их выражения через краевые условия (3), получим:

$$\frac{(f'_1 - c_1 B'_1(x_1) - c_2 B'_2(x_1)) B_0(x_1)}{B'_0(x_1)} + c_1 B_1(x_1) + c_2 B_2(x_1) = f_1; \quad (5)$$

$$c_{N-1} B_{N-1}(x_N) + c_N B_N(x_N) + \frac{(f'_N - c_{N-1} B'_{N-1}(x_N) - c_N B'_N(x_N)) B_{N+1}(x_N)}{B'_{N+1}(x_N)} = f_N.$$

С учетом уравнений (5) в модифицированном виде система уравнений (2) примет вид:

$$\left. \begin{aligned} c_1 \left[B_1(x_1) - \frac{B'_1(x_1)}{B'_0(x_1)} B_0(x_1) \right] + c_2 \left[B_2(x_1) - \frac{B'_2(x_1)}{B'_0(x_1)} B_0(x_1) \right] &= f_1 - \frac{f'_1(x_1)}{B'_0(x_1)} B_0(x_1); \\ c_{i-1} B_{i-1}(x_i) + c_i B_i(x_i) + c_{i+1} B_{i+1}(x_i) &= f_i, \quad i = 2, \dots, N-1; \\ c_{N-1} \left[B_{N-1}(x_N) - \frac{B'_{N-1}(x_N)}{B'_{N+1}(x_N)} B_{N+1}(x_N) \right] + c_N \left[B_N(x_N) - \frac{B'_N(x_N)}{B'_{N+1}(x_N)} B_{N+1}(x_N) \right] &= \\ &= f_N - \frac{f'_N}{B'_{N+1}(x_N)} B_{N+1}(x_N). \end{aligned} \right\} \quad (6)$$

Построение базисного кубического сплайна в матричном исчислении формируется следующим образом:

$$\begin{bmatrix} L_1 & P_1 & 0 & K_1 \\ K_2 & L_2 & P_2 & 0 \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ 0 & K_{N-1} & L_{N-1} & P_{N-1} \\ P_N & 0 & K_N & L_N \end{bmatrix} \times \begin{bmatrix} c_1 \\ \dots \\ \dots \\ \dots \\ c_N \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} f_1^* \\ \dots \\ \dots \\ \dots \\ f_N^* \end{bmatrix}, \quad (7)$$

где $K_1 = 0$;

$$L_1 = B_1(x_1) - \frac{B'_1(x_1)}{B'_0(x_1)} B_0(x_1);$$

$$P_1 = B_2(x_1) - \frac{B'_2(x_1)}{B'_0(x_1)} B_0(x_1);$$

$$K_N = B_{N-1}(x_N) - \frac{B'_{N-1}(x_N)}{B'_{N+1}(x_N)} B_{N+1}(x_N);$$

$$L_N = B_N(x_N) - \frac{B'_N(x_N)}{B'_{N+1}(x_N)} B_{N+1}(x_N);$$

$$P_N = 0;$$

$$K_i = B_{i-1}(x_i);$$

$$L_i = B_i(x_i);$$

$$P_i = B_{i+1}(x_i);$$

$$f_1^* = f_1 - \frac{f'_1}{B'_0(x_1)} B_0(x_1);$$

$$f_N^* = f_N - \frac{f'_N}{B'_{N+1}(x_N)} B_{N+1}(x_N).$$

Вычисление скалярных коэффициентов кубических сплайнов (6) предполагает решение линейных алгебраических систем. Матрицы таких систем имеют трехдиагональную структуру. Вследствие этого *метод исключения Гаусса* реализуется с использованием более простых формул так называемого *метода прогонки*. В данном случае вначале вычисляются по рекуррентным формулам коэффициенты V_i и W_i при $i = 1, \dots, N$:

$$\left. \begin{aligned} V_0 &= 0; \\ W_0 &= 0; \\ V_i &= -\frac{P_i}{L_i + K_i V_{i-1}}; \\ W_i &= \frac{f_i - K_i W_{i-1}}{L_i + K_i V_{i-1}}. \end{aligned} \right\} \quad (8)$$

Далее непосредственно вычисляются в обратном порядке неизвестные c_i , начиная с коэффициента c_N :

$$c_i = V_i c_{N+1} + W_i, \quad (9)$$

где индекс i убывает от N до 1, а $c_{N+1} = 0$, так как $c_N = W_N$.

Найденные скалярные сплайновые коэффициенты c_i необходимы для умножения в каждом сеточном узле на базисные компоненты $B_i(x_i)$ с целью реализации процедуры сплайн-интерполяции.

Предлагается оригинальный способ вычисления приближаемой кубическими B -сплайнами навигационной функции для произвольного аргумента $x \in [x_i, x_{i+1}]$. Для этого необходимо использовать только коэффициенты четырех узловых B -сплайнов, указанных на рис. 4 как точки пересечения пунктирной линии.

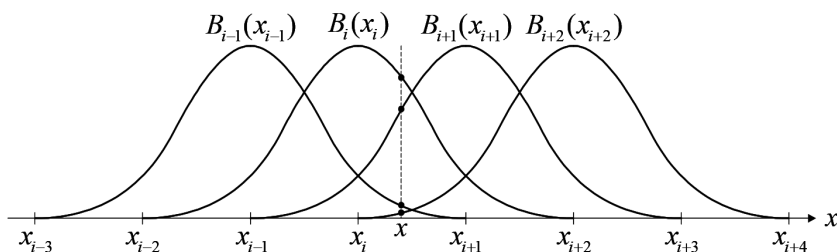


Рис. 4. Вычисление значения B -сплайна для произвольного аргумента навигационной функции
Fig. 4. Calculating the B-spline value for an arbitrary navigation function argument

В силу финитности функций $B_j(x)$, $j = i-1, \dots, i+2$ генерирование навигационной функции в произвольной точке $x \in [x_i, x_{i+1}]$ сеточного интервала (см. рис. 4) выполняется на основе базисной сплайновой композиции:

$$S(x) = c_{i-1} B_{i-1}(x) + c_i B_i(x) + c_{i+1} B_{i+1}(x) + c_{i+2} B_{i+2}(x). \quad (10)$$

Предлагаемым способом для любой произвольной точки $x \in [x_i, x_{i+1}]$ вычисляется значение B -сплайна при использовании только четырех базисных функций (см. рис. 4), что априорно обеспечивает сжатие массива данных в 4 раза. На основе разработанного алгоритма составлен программный паскаль-модуль. Сплайновая альтернатива обеспечивает высокоскоростной расчет траектории за счет логической оптимизации вычислительной формализации базисной аппроксимации.

На скриншоте, представленном как рис. 5 в локальной системе координат, имитируется сложная линия сплайн-пути объекта, отличающаяся гибкостью моделирования, что является, безусловно, важным фактором для морской навигации ввиду предоставления возможности реактивного уклонения от навигационных препятствий. Результат изометрического формирования

траектории достигнут на основе вычислительной реализации кубического B -сплайна с учетом информативности навигационного поля.

В ситуации поступления апостериорной информации о навигационных опасностях синтезированную траекторию, представленную на рис. 5, можно оперативно переконфигурировать в альтернативную с целью уклонения от запретных районов плавания за счет генерирования улучшенного сплайна с повышением степени гибкости.

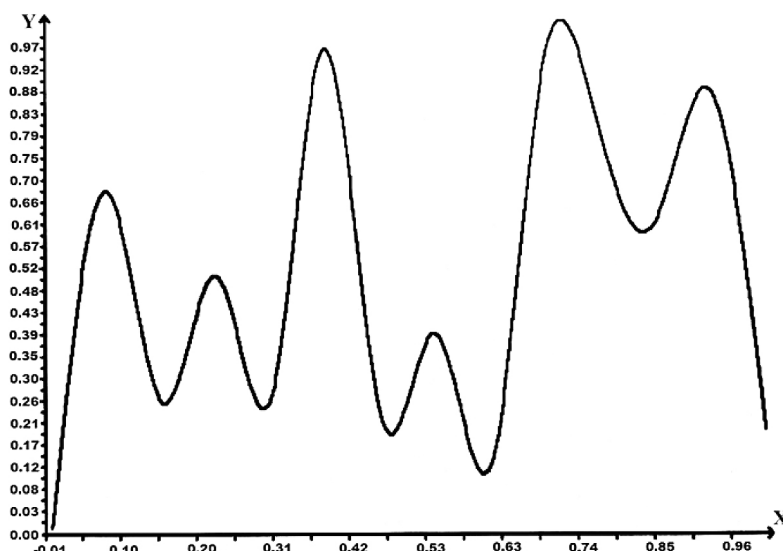


Рис. 5. Геометрическая интерпретация синтезирования навигационной траектории кубическим базисным сплайном

Fig. 5. Geometric interpretation of synthesizing a navigation trajectory using the cubic basis spline

Излишних перестроений конфигурации предварительного маршрута можно в большинстве случаев избежать благодаря изначально разумному выбору исходного кубического B -сплайна. В соответствии с локальным характером кубического B -сплайна его выбор обеспечивает корректность аппроксимации искомой алгебраической кривой и удовлетворение свойствам гладкости, накладываемым в качестве напряженности на сплайновую траекторию.

Локальное свойство финитности (см. рис. 3) потенциально обеспечивает необходимость пересчета минимальной части траектории при изменении, добавлении или удалении узловой точки в массиве сеточных данных, что в положительном смысле выделяет B -сплайн из арсенала средств кусочных аппроксимаций. В ситуации применения альтернативных алгоритмов при добавлении новой контрольной точки или изменении позиции существующей геометрическая конструкция полностью переформатируется при затратном вычислительном ресурсе. При этом только базисными сплайнами естественным образом описывается любая траектория искусственного объекта как с активными, так и с инерционными отрезками движения. B -сплайн в геометрическом представлении формы является составной алгебраической кривой, позволяющей при аппроксимации набора сеточных точек избежать нежелательных осцилляций, характерных для интерполяционных многочленов высокой степени. B -сплайновые траектории не требуют явного задания производных и локальное изменение узлов не приводит к необходимости вычисления всей кривой заново.

Процедура оптимизации стратегически ориентирована на характеристические точки траектории, которые определяют аппроксимирующий ее сплайн. Модернизированный сплайн-путь оперативным образом перестраивается с использованием апостериорной информации без формального увеличения количества сеточных точек сплайна. На рис. 6 в локальной системе координат продемонстрирована модернизированная конфигурация сплайн-траектории, оперативно сформированная при условном фиксировании новых опасных препятствий на предварительном маршруте следования судна, имитированном на рис. 5.

Указанная ранее целесообразность применения вариативного синтезирования базовой маневренной траектории в режиме реального времени позволяет с предельной точностью конкретизировать метод решения задачи оперативного планирования траектории методом изгибания гладких кубических B -сплайнов во избежание столкновений с препятствиями [29]. Сплайн-алгоритм способен итеративно манипулировать построением пути с отклонениями от опасностей в потенциально сложных условиях (см. рис. 6). Предварительный сплайн может быть дополнительно улучшен на локальном уровне при выборе пользователем в интерактивном режиме реалистичных весовых коэффициентов для обеспечения возможности варьирования траектории. Эффективное маневрирование автономным транспортным средством в обход навигационных препятствий имеет решающее значение для возможности обеспечения безопасности судовождения.

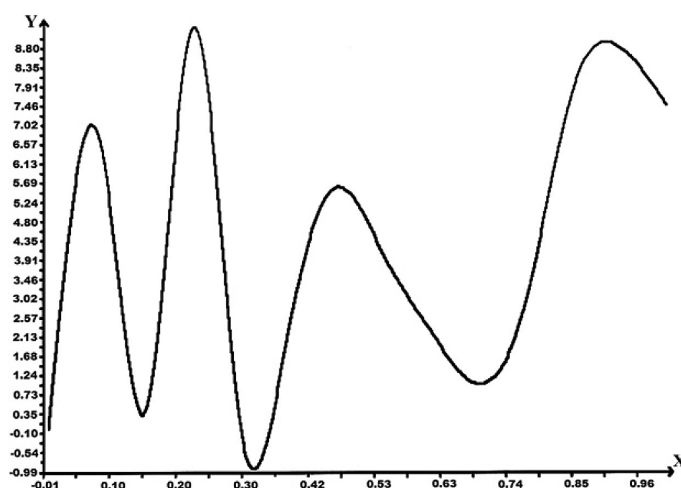


Рис. 6. Альтернативное оперативное моделирование аппроксимации криволинейной траектории кубическим финитным сплайном
Fig. 6. Alternative operational modeling of approximation of a curvilinear trajectory by the cubic finite spline

В данном исследовании допускается алгоритмическая возможность аппроксимации искаженной траектории. Ввиду сложности оперирования искаженными траекториями нестандартные атрибуты математических основ судовождения традиционно были исключены из процесса обработки информации, и задача маршрутизации судна решалась исключительно по тривиальным навигационным правилам без перспективной геометрической оценочной интерпретации. Предлагается пересмотреть стереотипное абстрагирование от искаженной траектории, поскольку методы сплайн-функций позволяют оперировать такими сложными алгебраическими объектами, как разрывные в математическом смысле линии пути.

Сложность практического применения гипотетической искаженной траектории обуславливается наличием вероятного существования внутренних точек разрыва в определенных координатах ξ_i в соответствии с рис. 2. В качестве разрывов допускаются предельные случаи локального математического искажения траектории. Во внутренних точках разрыва навигационная функция условно не определена. Фактически с позиций теории приближения кусочный полином P_i имеет два значения в каждой позиции функционального разрыва, а именно: функциональное значение слева определяется левым сплайновым многочленом, значение функции справа — правым многочленом. Для формальной определенности предлагается выбирать в каждой точке разрыва значение справа, т. е. условно считать, что P_i является непрерывной экстраполированной функцией справа, что дает однозначность программной реализации сплайнового алгоритма. Для преобразования точки разрыва левый и правый кусочный многочлены искусственно «склеиваются» математическим образом в единый конфигурационный многозвенник 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» в ситуации существования функционального разрыва в абстрактной сеточной точке ξ_i (см. рис. 2).

Предположение о принципиальной возможности моделирования разрывной траектории является авторской точкой зрения на перспективную вероятность реализации сложного варианта аппроксимации кубическими сплайнами. С математической точки зрения при этом возможно по-прежнему условно считать, что навигационная функция условно 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 [30].

При оптимальном выборе узлов наличие функционального разрыва практически не влияет на стратегическое поведение сплайна в геометрическом понимании процесса аппроксимации. Предлагаемый подход позволяет считать искаженную траекторию практически идентичной кубическо-многочленной функции с принципиально возможным применением к синтезированию разрывной траектории в полной мере сплайнового аппарата. Благодаря гипотезе возможности оперирования искаженными траекториями отпадает стратегическая необходимость в применении сложных рутинных математических процедур при анализе определенности аппроксиматора в точке оцениваемого формального разрыва. В соответствии с этим программная реализация разработанных алгоритмов практически не меняется по содержанию, за исключением добавления в паскалевскую подпрограмму эпизодического логического условия приравнивания в точке разрыва искаженной линии пути по функциональности значения справа. Таким образом, кубическая кусочно-многочленная конструкция в прикладной программе условно рассматривается как непрерывная навигационная функция справа, что фактически однозначно создает принципиальную возможность использования в автоматизированном судовождении искаженной траектории как таковой. Теоретически данный подход позволяет сформировать тенденцию оперирования искаженными траекториями в развитие классического метода обработки навигационной информации, а не абстрагироваться от нестандартных ситуаций неоправданной технической детализацией невозможности применения искаженных траекторий в судовождении.

Ввиду алгоритмических затруднений обработки информации при традиционном представлении о математической неформализуемости искаженной траектории данный вопрос ранее не рассматривался в научной литературе с практической точки зрения. Выполненное исследование может принципиально изменить сформировавшуюся шаблонную позицию на основе уточненного геометрического представления интерполяции кубическими базисными сплайнами абстрактной искаженной траектории. В ситуации признания факта уникальной сложности математической формализации искаженной траектории классическим способом решить задачу маршрутизации судна в сложном случае разрыва производной представляется невозможным, в отличие от синтеза искаженных траекторий сплайновыми методами, отождествляемого с реальностью решения математической проблемы с позиций аппарата кусочных аппроксимаций.

Апробированный алгоритм может служить гармонизированной поддержкой для судоводительского состава при организации виртуального маршрута судна. Предлагаемый подход может быть также использован как математическое обеспечение автоматизированной системы судовождения в комбинировании с нейросетевыми технологиями для расчета траектории движения мобильного судна с целью формирования концепции безэкипажного судовождения. Метод *B*-сплайновых аппроксимаций способствует достижению функции предотвращения столкновений морских автономных надводных судов (МАНС) в качестве реализации ключевого выполнимого алгоритма обеспечения высоконадежного инновационного судовождения [31], [32]. Интеллектуальный подход, основанный на принципах прогрессивного математического моделирования, способен генерировать разумную и плавную траекторию как демонстрацию практической возможности разработки

экспертных систем для автономного предотвращения столкновений [33]. Сплайновые алгоритмические инновации в области компьютерной визуализации с графической интерпретацией результатов возможностей, безусловно, важны для развития функционала автоматизированных систем судовождения.

Компьютерная визуализация программированного движения судна на основе применения перспективных возможностей искусственного интеллекта для распознавания целевой обстановки обеспечивает возможность интеллектуальной помощи штурману в стратегии принятия правильного решения при любых обстоятельствах плавания за счет обеспечения ситуационной осведомленности.

Обсуждение (Discussion)

Для максимальной информированности вахтенного помощника о перспективе маршрутизации целесообразно рассматривать модель программированного движения судна сочетанием с реализацией зоны навигационной безопасности при учете характеристик градиентов, ориентированных на информативные области в навигационном поле [7]. Задачу анализа информативности поля логически можно свести к поиску областей с характеристическим «веером» разнонаправленных градиентов различных навигационных параметров [34]. На основе предлагаемого подхода возникает фактическая возможность оперирования комплексом сплайн-градиентов в современном судовождении, что позволяет сделать предположение о практической реалистичности математической сути прогрессивного метода при обработке навигационной информации в соответствии со сплайновой концепцией.

В процессе поиска альтернативной точки зрения на вопросы современного понимания проблем обработки навигационной информации выдвигается гипотеза о допустимости факта ситуационного изменения ориентации вектора градиента в каждой точке навигационной изолинии при условии сохранения значения модуля градиента. Сплайновый алгоритм градиентного типа в развитие допустимого предположения о веерной ориентации определяет исключительную применимость методов сплайн-функций для новой трактовки понятия градиента и формирования принципов практического применения нового подхода в построении навигационных траекторий.

Использование понятия *сплайн-градиента* можно признать основополагающим фактором, определяющим потенциал движения судна при изолинейном плавании с учетом меняющейся геометрической характеристики поля навигационных параметров. Градиент навигационного поля является измеряемым параметром и единственным демаскирующим предикатом при его активном применении для определения максимальной информативности навигационного поля. Сплайн-градиент позволяет эффективно оценивать перемещение аппроксимированной изолинии в окрестности определяемой позиции судна при изменении навигационного параметра, а, следовательно, с применением понятия *сплайн-градиента* оперативно решаются такие важнейшие задачи судовождения, как уточненное определение места судна и апостериорная оценка его точности. Градиент является векторной характеристикой сплайна как аппроксиматора вариативной траектории. Сплайн-градиент является векторной величиной, определяющей направление максимально быстрого увеличения аппроксимированного навигационного параметра и численно равной первой производной восстановленного значения навигационной функции по вероятнейшему градиентному направлению. Сплайн-градиент можно оценивать как фактор, определяющий теоретическую максимальную точность местоположения. Поэтому при анализе архитектуры веера сплайн-градиентов необходимо учитывать факт влияния каждого вектора градиента погрешности измерений навигационного параметра [35]. Для уменьшения погрешности позиционирования необходимо стремиться к оценке точности по разнонаправленному вееру сплайн-градиентов поля навигационных параметров. Для практического применения можно считать, что «веер» сплайн-градиентов обеспечивает реалистичность геометрической интерпретации многофакторности вероятных направлений максимальных увеличений навигационной функции.

При апробировании данного подхода с использованием соответствующего программного обеспечения бортового компьютера в эргономичном варианте в структуре перспективного навигационного автоматизированного комплекса измеряемые параметры изолинии по известным формулам могут быть типовым способом пересчитаны в географические координаты с целью постоянной геолокации любого подвижного объекта в автономном режиме на специализированных электронных средствах мониторинга. Актуальность разработки эффективного метода математического описания новой динамической системы определяет синтез алгоритма инновационного адаптивного управления, обеспечивающего организацию движения МАНС в пространстве настраиваемых параметров в оперативном направлении каждого градиента скорости изменения оценочного функционала позиционирования.

Выводы (Summary)

Проведенное исследование позволяет сделать следующие выводы:

1. Основным фактором выполнения задачи оптимизации построения гибкой конфигурации сплайн-траектории является реализованный феномен математической плавности.
2. В качестве вторичного регулятора конфигурации сплайновой линии движения судна перспективным является использование финальной точности аппроксимации с учетом эффекта сглаживания.
3. Целесообразность применения алгоритма аппроксимации траектории базисными кубическими сплайнами обоснована предпочтительностью практической реализации задачи своевременного уклонения от запретных районов плавания за счет обеспечения «гладкости» маршрутной кривой.
4. Математическая адаптация высокоскоростного сплайн-алгоритма к формализации задачи оптимизации траектории обеспечивает высокую точность и устойчивость вычислительных процедур.
5. Разработанная программа с пользовательским интерфейсом в среде языка программирования высокого уровня турбо-паскаль адекватно синтезирует оптимальную траекторию любой степени сложности с практической возможностью использования искаженной линии пути в режиме реального времени.
6. Геометрическая интерпретация построения навигационной траектории выполняет наглядную роль графического сопровождения результатов работы паскаль-программы с целью обеспечения ситуационной осведомленности судоводителя.
7. Предполагается принципиальная возможность практического применения сплайн-алгоритма в реализованном программном обеспечении к удаленной организации плавания морских автономных надводных судов по оптимальным траекториям в ходе реализации концепции безэкипажного судходства.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Васьков А. С. Методы планирования ограждения опасностей для контроля в системах управления движением судна / А. С. Васьков, А. А. Мироненко // Морские интеллектуальные технологии. — 2023. — № 3–1 (61). — С. 110–119. DOI: 10.37220/MIT.2023.61.3.036.
2. Васьков А. С. Планирование и контроль криволинейной траектории движения судна / А. С. Васьков, А. А. Мироненко // Вестник Государственного университета морского и речного флота имени адмирала С. О. Макарова. — 2023. — Т. 15. — № 3. — С. 401–415. DOI: 10.21821/2309-5180-2023-15-3-401-415.
3. Ююкин И. В. Сплайновое синтезирование картографированного эталона информативности поля в задаче корреляционно-экстремальной навигации / И. В. Ююкин // Вестник Государственного университета морского и речного флота имени адмирала С. О. Макарова. — 2022. — Т. 14. — № 1. — С. 25–39. DOI: 10.21821/2309-5180-2022-14-1-25-39.
4. Safin R. Modern Methods of Map Construction Using Optical Sensors Fusion / R. Safin, T. Tsoy, R. Lavrenov, I. Afanasyev, E. Magid // The 2023 International Conference on Artificial Life and Robotics (ICAROB2023). — Alife Robotics Corporation Ltd, 2023. — Vol. 28. — Pp. 166–169. DOI: 10.5954/ICAROB.2023.OS6-6.

5. Yuyukin I. V. Correlation-extreme method based on spline functions as an alternative to satellite navigation / I. V. Yuyukin // AIP Conference Proceedings. — AIP Publishing, 2023. — Vol. 2476. — No. 1. — Pp. 030030. DOI: 10.1063/5.0102916.
6. Stepanov O. A. Map-Aided Navigation Taking into Account a Priori Information on the Object Trajectory / O. A. Stepanov, Yu. A. Litvinenko, V. A. Vasil'ev, A. M. Isaev // 2023 30th Saint Petersburg International Conference on Integrated Navigation Systems (ICINS). — IEEE, 2023. — Pp. 1–6. DOI: 10.23919/ICINS51816.2023.10168423.
7. Мироненко А. А. Методология формализации навигационной обстановки, планирования маршрута и программных траекторий движения судна: дис. ... д-ра техн. наук / А. А. Мироненко. — Новороссийск, 2016. — 310 с.
8. Berdyshev V. I. Optimal Object Trajectories under Unfriendly Observation / V. I. Berdyshev, V. B. Kostousov, A. A. Popov // Proceedings of the 7th International Conference on Nonlinear Analysis and Extremal Problems (NLA-2022). — ISDCT SB RAS, 2022. — Pp. 17–18.
9. Лавренов Р. О. Математическое и программное обеспечение решения задачи многокритериального поиска пути мобильного объекта: дис. ... канд. техн. наук / Р. О. Лавренов. — Казань, 2020. — 138 с.
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. Berdyshev V. I. Extremal problems of navigation by geophysical fields / V. I. Berdyshev, V. B. Kostousov // Eurasian Journal of Mathematical and Computer Applications. — 2018. — Vol. 6. — Is. 2. — Pp. 4–18. DOI: 10.32523/2306-6172-2018-6-2-4-18.
12. Berglund T. Planning Smooth and Obstacle-Avoiding B-Spline Paths for Autonomous Mining Vehicles / T. Berglund, A. Brodnik, H. Jonsson, M. Staffanson, I. Soderkvist // IEEE Transactions on Automation Science and Engineering. — 2009. — Vol. 7. — Is. 1. — Pp. 167–172. DOI: 10.1109/TASE.2009.2015886.
13. Ююкин И. В. Оптимальная сплайн-траектория информативного маршрута судна в корреляционно-экстремальной навигации / И. В. Ююкин // Вестник Государственного университета морского и речного флота имени адмирала С. О. Макарова. — 2022. — Т. 14. — № 2. — С. 230–247. DOI: 10.21821/2309-5180-2022-14-2-230-247.
14. Wang P. Obstacle-Avoidance Path-Planning Algorithm for Autonomous Vehicles Based on B-Spline Algorithm / P. Wang, J. Yang, Y. Zhang, Q. Wang, B. Sun, D. Guo // World Electric Vehicle Journal. — 2022. — Vol. 13. — Is. 12. — Pp. 233. DOI: 10.3390/wevj13120233.
15. Калиткин Н. Н. В-сплайны высоких степеней / Н. Н. Калиткин, Н. М. Шляхов // Математическое моделирование. — 1999. — Т. 11. — № 11. — С. 64–74.
16. 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.
17. Gao X. Double B-Spline Curve-Fitting and synchronization-Integrated Feedrate Scheduling Method for Five-Axis Linear-Segment Toolpath / X. Gao, S. Zhang, L. Qiu, X. Liu, Z. Wang, Y. Wang // Applied Sciences. — 2020. — Vol. 10. — Is. 9. — Pp. 3158. DOI: 10.3390/app10093158.
18. Magid E. Combining Voronoi Graph and Spline-Based Approaches for a Mobile Robot Path Planning / E. Magid, R. Lavrenov, M. Svinin, A. Khasianov // Informatics in Control, Automation and Robotics. ICINCO 2017. Lecture Notes in Electrical Engineering. — Springer, Cham, 2020. — Vol. 495. — Pp. 475–496. DOI: 10.1007/978-3-030-11292-9_24.
19. Захаров К. С. Сглаживание кривизны траектории движения наземного робота в трехмерном пространстве / К. С. Захаров, А. И. Савельев // Известия Юго-Западного государственного университета. — 2020. — Т. 24. — № 4. — С. 107–125. DOI: 10.21869/2223-1560-2020-24-4-107-125.
20. Cao H. Implementing B-Spline Path Planning Method Based on Roundabout Geometry Elements / H. Cao, M. Zoldy // IEEE Access. — 2022. — Vol. 10. — Pp. 81434–81446. DOI: 10.1109/ACCESS.2022.3193667.
21. Zhang Y. An Obstacle Avoidance Path Planning and Evaluation Method for Intelligent Vehicles Based on the B-Spline Algorithm / Y. Zhang, P. Wang, K. Cui, H. Zhou, J. Yang, X. Kong // Sensors. — 2023. — Vol. 23. — Is. 19. — Pp. 8151. DOI: 10.3390/s23198151.
22. Majeed A. New cubic trigonometric Bezier-like functions with shape parameter: curvature and its spiral segment / A. Majeed, M. Abbas, A. A. Sittar, M. Kamran, S. Tahseen, H. Emadifar // Journal of Mathematics. — 2021. — Vol. 2021. — Pp. 1–13. DOI: 10.1155/2021/6330649.

23. 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.

24. Hang H. Cubic B-Spline curves with shape parameter and their applications / H. Hang, X. Yao, Q. Li, M. Artiles // Mathematical Problems in Engineering. — 2017. — Vol. 2017. — Pp. 1–7. DOI: 10.1155/2017/3962617.

25. Stelia O. Computer Realizations of the Cubic Parametric Spline Curve of Bezicr Type / O. Stelia, L. Potapenko, I. Sirenko // International Journal of Computing. — 2019. — Vol. 18. — Is. 4. — Pp. 422–430. DOI: 10.47839/ijc.18.4.1612.

26. Ahmed A. Path Smoothing Algorithm Using Thin-Plate Spline / A. Ahmed, A. Soliman, A. Maged, M. Gaafar, M. Magdy // 2021 7th International Conference on Control, Automation and Robotics (ICCAR). — IEEE, 2021. — Pp. 349–353. DOI: 10.1109/ICCAR52225.2021.9463453.

27. Connors J. Manipulating B-Spline Based Paths for Obstacle Avoidance in Autonomous Ground Vehicles / J. Connors, G. Elkaim // Proceedings of the 2007 National Technical Meeting of The Institute of Navigation. — ION, 2007. — Pp. 1081–1088.

28. Ююкин И. В. Сплайновая модель оперирования гридированными данными как принцип электронного картографирования топографии морского дна / И. В. Ююкин // Вестник Государственного университета морского и речного флота имени адмирала С. О. Макарова. — 2022. — Т. 14. — № 5. — С. 656–675. DOI: 10.21821/2309-5180-2022-14-5-656-675.

29. Connors J. Analysis of a Spline Based, Obstacle Avoiding Path Planning Algorithm / J. Connors, G. Elkaim // 2007 IEEE 65th Vehicular Technology Conference-VTC2007-Spring. — IEEE, 2007. — Pp. 2565–2569. DOI: 10.1109/VETECS.2007.528.

30. 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.

31. Zhang X. A Real-Time Collision Avoidance Framework of MASS Based on B-Spline and Optimal Decoupling Control / X. Zhang, C. Wang, K. T. Chui, R. W. Liu // Sensors. — 2021. — Vol. 21. — Is. 14. — Pp. 4911. DOI: 10.3390/s21144911.

32. Zhang X. Collision-avoidance navigation systems for Maritime Autonomous Surface Ships: A state of the art survey / X. Zhang, C. Wang, L. Jiang, L. An, R. Yang // Ocean Engineering. — 2021. — Vol. 235. — Pp. 109380. DOI: 10.1016/j.oceaneng.2021.109380.

33. Yan X.-P. A novel path planning approach for smart cargo ships based on anisotropic fast marching / X.-P. Yan, S.-W. Wang, F. Ma, Y.-C. Liu, J. Wang // Expert Systems with Applications. — 2020. — Vol. 159. — Pp. 113558. DOI: 10.1016/j.eswa.2020.113558.

34. Yuyukin I. V. Configuring the fan of spline gradients when approximating the navigational isoline with a linear piecewise functional / I. V. Yuyukin // Journal of Physics: Conference Series. — IOP Publishing, 2021. — Vol. 2032. — № 1. — Pp. 012054. DOI: 10.1088/1742-6596/2032/1/012054.

35. Liu Z. Gradient-Sensitive Optimization for Convolutional Neural Networks / Z. Liu, R. Feng, X. Li, W. Wang, X. Wu // Computational Intelligence and Neuroscience. — 2021. — Vol. 2021. — Pp. 1–16. DOI: 10.1155/2021/6671830.

REFERENCES

1. Vas'kov, A. S., and A. A. Mironenko. "The methods for planning no-go area clearing lines in the vessel's control systems." *Marine Intellectual Technologies* 3–1(61) (2023): 110–119. DOI: 10.37220/MIT.2023.61.3.036.

2. Vas'kov, Anatoliy S., and Aleksandr A. Mironenko. "Planning and control of the ship curvilinear route." *Vestnik Gosudarstvennogo universiteta morskogo i rechnogo flota imeni admirala S. O. Makarova* 15.3 (2023): 401–415. DOI: 10.21821/2309-5180-2023-15-3-401-415.

3. Yuyukin, Igor V. "Spline synthesis of the charted reference of the field informativity in mission correlation-extreme navigation." *Vestnik Gosudarstvennogo universiteta morskogo i rechnogo flota imeni admirala S. O. Makarova* 14.1 (2022): 25–39. DOI: 10.21821/2309-5180-2022-14-1-25-39.

4. Safin, Ramil, Tatyana Tsoy, Roman Lavrenov, Ilya Afanasyev, and Evgeni Magid. "Modern Methods of Map Construction Using Optical Sensors Fusion." *The 2023 International Conference on Artificial Life and Robotics (ICAROB2023)*. Vol. 28. Alife Robotics Corporation Ltd., 2023. 166–169. DOI: 10.5954/ICAROB.2023.OS6-6.

5. Yuyukin, I.V. "Correlation-extreme method based on spline functions as an alternative to satellite navigation." *AIP Conference Proceedings*. Vol. 2476. No. 1. AIP Publishing, 2023. DOI: 10.1063/5.0102916.
6. Stepanov, O. A., Yu. A. Litvinenko, V. A. Vasil'ev, and A. M. Isaev. "Map-Aided Navigation Taking into Account a Priori Information on the Object Trajectory." *2023 30th Saint Petersburg International Conference on Integrated Navigation Systems (ICINS)*. IEEE, 2023. DOI: 10.23919/ICINS51816.2023.10168423.
7. Mironenko, Alexander A. Metodologiya formalizatsii navigatsionnoy obstanovki, planirovaniya marshruta i programmnykh traektoriy dvizheniya sudna. Dr. diss. Novorossiysk, 2016.
8. Berdyshev, Vitalii I., Victor B. Kostousov, and Aleksandr A. Popov. "Optimal Object Trajectories under Unfriendly Observation." *Proceedings of the 7th International Conference on Nonlinear Analysis and Extremal Problems (NLA-2022)*. ISDCT SB RAS, 2022.
9. Lavrenov, Roman O. Matematicheskoe i programmnoe obespechenie resheniya zadashi mnogokriterialnogo poiska puti mobil'nogo obekta. PhD diss. Kazan, 2020.
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. Berdyshev, Vitalii Ivanovich, and Viktor Borisovich Kostousov. "Extremal problems of navigation by geophysical fields." *Eurasian Journal of Mathematical and Computer Applications* 6.2 (2018): 4–18. DOI: 10.32523/2306-6172-2018-6-2-4-18.
12. Berglund, Tomas, Andrej Brodnik, Hakan Jonsson, Mats Staffanson, and Inge Soderkvist. "Planning Smooth and Obstacle-Avoiding B-Spline Paths for Autonomous Mining Vehicles." *IEEE Transactions on Automation Science and Engineering* 7.1 (2009): 167–172. DOI: 10.1109/TASE.2009.2015886.
13. Yuyukin, Igor V. "Optimal spline trajectory of the ship informative route in the map-aided navigation." *Vestnik Gosudarstvennogo universiteta morskogo i rechnogo flota imeni admirala S. O. Makarova* 14.2 (2022): 230–247. DOI: 10.21821/2309-5180-2022-14-2-230-247.
14. Wang, Pengwei, Jinshan Yang, Yulong Zhang, Qinwei Wang, Binbin Sun, and Dong Guo. "Obstacle-Avoidance Path-Planning Algorithm for Autonomous Vehicles Based on B-Spline Algorithm." *World Electric Vehicle Journal* 13.12 (2022): 233. DOI: 10.3390/wevj13120233.
15. Kalitkin, Nikolay N., and Nikolay M. Shlyakhov. "B-Splines of High Powers." *Matematicheskoe modelirovanie* 11.11 (1999): 64–74.
16. Yuyukin, Igor V. "Geoid approximation by methods of spline functions." *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.
17. Gao, Xiangyu, Shuyou Zhang, Lemiao Qiu, Xiaojian Liu, Zili Wang, and Yang Wang. "Double B-Spline Curve-Fitting and synchronization-Integrated Feedrate Scheduling Method for Five-Axis Linear-Segment Toolpath." *Applied Sciences* 10.9 (2020): 3158. DOI: 10.3390/app10093158.
18. Magid, Evgeni, Roman Lavrenov, Mikhail Svinin, and Airat Khasianov. "Combining Voronoi Graph and Spline-Based Approaches for a Mobile Robot Path Planning." *Informatics in Control, Automation and Robotics. ICINCO 2017. Lecture Notes in Electrical Engineering, vol 495*. Springer, Cham, 2020. 475–496. DOI: 10.1007/978-3-030-11292-9_24.
19. Zakharov, K. S., and A. I. Saveliev. "Smoothing the Curvature of Trajectory of Ground Robot in 3D Space." *Proceedings of Southwest State University* 24.4 (2020): 107–125. DOI: 10.21869/2223-1560-2020-24-4-107-125.
20. Cao, Hang, and Mate Zoldy. "Implementing B-Spline Path Planning Method Based on Roundabout Geometry Elements." *IEEE Access* 10 (2022): 81434–81446. DOI: 10.1109/ACCESS.2022.3193667.
21. Zhang, Yulong, Pengwei Wang, Kaichen Cui, Hengheng Zhou, Jinshan Yang, and Xiangcun Kong. "An Obstacle Avoidance Path Planning and Evaluation Method for Intelligent Vehicles Based on the B-Spline Algorithm." *Sensors* 23.19 (2023): 8151. DOI: 10.3390/s23198151.
22. Majeed, Abdul, Muhammad Abbas, Amna Abdul Sittar, Mohsin Kamran, Saba Tahseen, and Homan Emadifar. "New cubic trigonometric Bezier-like functions with shape parameter: curvature and its spiral segment." *Journal of Mathematics* 2021 (2021): 1–13. DOI: 10.1155/2021/6330649.
23. 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.
24. Hang, Houjun, Xing Yao, Qingqing Li, and Michel Artiles. "Cubic B-Spline curves with shape parameter and their applications." *Mathematical Problems in Engineering* 2017 (2017): 1–7. DOI: 10.1155/2017/3962617.

25. Stelia, Oleg, Leonid Potapenko, and Ihor Sirenko. "Computer Realizations of the Cubic Parametric Spline Curve of Bezier Type." *International Journal of Computing* 18.4 (2019): 422–430. DOI: 10.47839/ijc.18.4.1612.
26. Ahmed, Abdullah, Aref Soliman, Ahmed Maged, Muhammed Gaafar, and Mahmoud Magdy. "Path Smoothing Algorithm Using Thin-Plate Spline." *2021 7th International Conference on Control, Automation and Robotics (ICCAR)*. IEEE, 2021. DOI: 10.1109/ICCAR52225.2021.9463453.
27. Connors, John, and Gabriel Elkaim. "Manipulating B-Spline Based Paths for Obstacle Avoidance in Autonomous Ground Vehicles." *Proceedings of the 2007 National Technical Meeting of The Institute of Navigation*. ION, 2007.
28. Yuyukin, Igor V. "Spline model of gridded data operation as a principle of electronic mapping seabed topography." *Vestnik Gosudarstvennogo universiteta morskogo i rechnogo flota imeni admirala S. O. Makarova* 14.5 (2022): 656–675. DOI: 10.21821/2309-5180-2022-14-5-656-675.
29. Connors, John, and Gabriel Elkaim. "Analysis of a spline based, obstacle avoiding path planning algorithm." *2007 IEEE 65th Vehicular Technology Conference-VTC2007-Spring*. IEEE, 2007. DOI: 10.1109/VETECS.2007.528.
30. 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.
31. Zhang, Xinyu, Chengbo Wang, Kwok Tai Chui, and Ryan Wen Liu. "A Real-Time Collision Avoidance Framework of MASS Based on B-Spline and Optimal Decoupling Control." *Sensors* 21.14 (2021): 4911. DOI: 10.3390/s21144911.
32. Zhang, Xinyu, Chengbo Wang, Lingling Jiang, Lanxuan An, and Rui Yang. "Collision-avoidance navigation systems for Maritime Autonomous Surface Ships: A state of the art survey." *Ocean Engineering* 235 (2021): 109380. DOI: 10.1016/j.oceaneng.2021.109380.
33. Yan, Xin-Ping, Shu-Wu Wang, Feng Ma, Yuan-Chang Liu, and Jin Wang. "A novel path planning approach for smart cargo ships based on anisotropic fast marching." *Expert Systems with Applications* 159 (2020): 113558. DOI: 10.1016/j.eswa.2020.113558.
34. Yuyukin, I.V. "Configuring the fan of spline gradients when approximating the navigational isoline with a linear piecewise functional." *Journal of Physics: Conference Series*. Vol. 2032. No. 1. IOP Publishing, 2021. DOI: 10.1088/1742-6596/2032/1/012054.
35. Liu, Zhipeng, Rui Feng, Xiuhua Li, Wei Wang, and Xiaoling Wu. "Gradient-Sensitive Optimization for Convolutional Neural Networks." *Computational Intelligence and Neuroscience* 2021 (2021): 1–16. DOI: 10.1155/2021/6671830.

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: uukiniv@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: uukiniv@gumrf.ru

Статья поступила в редакцию 21 марта 2024 г.
Received: March 21, 2024.

СУДОВЫЕ ЭНЕРГЕТИЧЕСКИЕ УСТАНОВКИ И ИХ ЭЛЕМЕНТЫ (ГЛАВНЫЕ И ВСПОМОГАТЕЛЬНЫЕ)

DOI: 10.21821/2309-5180-2024-16-3-444-455

DEVELOPMENT TRENDS AND MODERN METHODS OF DESIGNING LIFTING DEVICES FOR FISHING VESSELS

A. V. Ivanovskaya¹, V. A. Zhukov², N. A. Shustryakov¹

¹ — Kerch State Maritime Technological University, Kerch, Russian Federation

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

The current state of the fishing fleet of the Republic of Crimea is analyzed in the paper. The problems of its insufficiently effective use and low rate of development are shown. The reasons for this are largely the moral deterioration of ships, the main and auxiliary elements of their power plants and the irrational organization of the fleet technical operation system. The analysis makes it possible to identify the reasons for the low competitiveness of special fishing equipment in operation, which plays an important role in the management of aquatic life. The main reasons include the imperfection of calculation and design methods, the incompleteness of the regulatory framework for calculating operational loads, the lack of developed automated control systems and appropriate software that would adequately take into account the specifics of the fishing equipment operation. When creating new lifting equipment for a fishing vessel, it is necessary to apply a systematic design method in order to ensure the required indicators of power, load capacity, speed, energy performance, load stability, operational and environmental safety, as well as economic efficiency. Modern methods of designing machines and mechanisms involve the development of adequate mathematical models that reproduce their states in space and time under the influence of operational loads, taking into account internal and external factors. An algorithm for operational cost analysis using a mathematical model of a lifting device drive system is described in the paper. The design and modernization of fishing equipment using the proposed algorithm will ensure a balance between the operational and cost characteristics of the equipment, which is a prerequisite for the creation of modern competitive marine equipment.

Keywords: fishing fleet, lifting equipment, technical operation of the fleet, design, system approach, mathematical model, operational cost analysis, design algorithm.

For citation:

Ivanovskaya, Aleksandra V., Vladimir A. Zhukov, and Nikolai A. Shustryakov. "Development trends and modern methods of designing lifting devices for fishing vessels." *Vestnik Gosudarstvennogo universiteta morskogo i rechnogo flota imeni admiral S. O. Makarova* 16.3 (2024): 444–455. DOI: 10.21821/2309-5180-2024-16-3-444-455.

УДК 621.31

ТЕНДЕНЦИИ РАЗВИТИЯ И СОВРЕМЕННЫЕ МЕТОДЫ ПРОЕКТИРОВАНИЯ ГРУЗОПОДЪЕМНЫХ УСТРОЙСТВ РЫБОПРОМЫСЛОВЫХ СУДОВ

А. В. Ивановская¹, В. А. Жуков², Н. А. Шустряков¹

¹ — ФГБОУ ВО «Керченский государственный морской технологический университет»,
Керчь, Российская Федерация

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

В статье выполнен анализ современного состояния рыбопромыслового флота Республики Крым. Указаны проблемы недостаточно эффективного его использования и низкого темпа развития, причинами которых в значительной степени являются моральный износ судов и главных и вспомогательных элемен-

тов энергетических установок, а также нерациональная организация системы технической эксплуатации флота. Выполненный анализ позволил выявить причины низкой конкурентоспособности находящегося в эксплуатации специального рыбопромыслового оборудования, играющего важную роль при ведении промысла гидробионтов. К основным из них относятся несовершенство методов расчета и проектирования, неполнота нормативной базы по расчету эксплуатационных нагрузок, отсутствие разработанных систем автоматизированного управления и соответствующего программного обеспечения, позволяющие адекватно учитывать специфику работы рыбопромыслового оборудования. Отмечается, что при создании нового грузоподъемного оборудования рыбопромыслового судна необходимо применение системного метода проектирования с целью обеспечения требуемых показателей мощности, грузоподъемности, скорости, энергетических показателей, стабильности нагрузки, эксплуатационной и экологической безопасности, а также экономической эффективности. Современные методы проектирования машин и механизмов предполагают разработку адекватных математических моделей, которые воспроизводят в пространстве и времени их состояние под действием влияния эксплуатационных нагрузок, учитывающих внутренние и внешние факторы. Приведено описание алгоритма эксплуатационно-стоимостного анализа с использованием математической модели системы привода грузоподъемного устройства. Проектирование и модернизация рыбопромыслового оборудования с использованием предложенного алгоритма позволят обеспечить баланс между эксплуатационными и стоимостными характеристиками оборудования, что является необходимым условием для создания современных конкурентоспособных судовых технических средств.

Ключевые слова: рыбопромысловый флот, грузоподъемное оборудование, техническая эксплуатация флота, проектирование, системный подход, математическая модель, эксплуатационно-стоимостной анализ, алгоритм проектирования.

Для цитирования:

Ивановская А. В. Тенденции развития и современные методы проектирования грузоподъемных устройств рыбопромыслового судна / А. В. Ивановская, В. А. Жуков, Н. А. Шустряков // Вестник Государственного университета морского и речного флота имени адмирала С. О. Макарова. — 2024. — Т. 16. — № 3. — С. 444–455. DOI: 10.21821/2309-5180-2024-16-3-444-455.

Введение (Introduction)

Одной из ключевых проблем рыбопромышленной отрасли Российской Федерации является физический и моральный износ судов, их энергетических установок и оборудования. Актуальность и необходимость решения указанной проблемы подтверждены реализацией Государственной программы «Развитие судостроения на 2013–2030 годы», проект которой был рассмотрен и одобрен на заседании Правительства Российской Федерации 8 ноября 2012 г. В документе отмечается, что около 60 % судов рыбопромыслового флота эксплуатируются с превышением нормативного срока службы, они не только малоэффективны, но и не соответствуют современным стандартам безопасности. Объективная потребность РФ составляет около 180 крупных и средних судов различного назначения и более чем 220 малых судов.

Финансирование строительства новых судов осуществляется за счет рыболовных компаний, большинство которых находится на грани банкротства ввиду недостатка собственных оборотных средств, высоких процентов по кредитам и низкого уровня инвестиционной привлекательности рыбопромыслового бизнеса в Крыму.

Одной из приоритетных задач развития агропромышленного комплекса Республики Крым является повышение экономической, энергетической и экологической эффективности рыбопромыслового флота. Можно выделить следующие причины неэффективного развития рыбопромыслового флота в данном регионе:

- низкая конкурентоспособность судов рыбопромыслового флота;
- значительная капиталоемкость рыбопромыслового бизнеса Республики Крым;
- низкая энергоэффективность рыбопромысловых судов Республики Крым;
- отсутствие системы организации технической эксплуатации флота рыбопромысловых судов;
- недостаток квалифицированного персонала;
- низкая конкурентоспособность современного отечественного судового и рыбопромыслового оборудования.

Целью исследования является разработка алгоритма эксплуатационно-стоимостного анализа системы привода грузоподъемного устройства на основе математической модели и его реализация в процессе решения задачи создания конкурентоспособного оборудования для повышения эффективного развития рыбопромыслового флота в Крыму.

Методы и материалы (Methods and Materials)

В настоящее время в Российской Федерации актуальной является задача совершенствования технической эксплуатации флота с целью повышения эффективности его использования. Решение этой задачи в Республике Крым связано прежде всего с необходимостью развития логистического комплекса в регионе, отсутствием внедрения технологий повышения эффективности использования энергетических ресурсов на рыбопромысловых судах, недостаточной степенью применения современных систем очистки отработавших газов, физическим и моральным износом энергетических установок судов, нерациональными режимами эксплуатации СЭУ, отсутствием планового межремонтного обслуживания и ремонта в случае необходимости, использованием недостаточно экологически чистых видов топлива [1], [2]. Немаловажным также является недостаток квалифицированного персонала. Факторы, обуславливающие обеспечение эффективности работы рыбопромыслового флота в Республике Крым, приведены на рис. 1.

Решение проблемы повышения эффективности работы рыбопромысловых судов может быть обеспечено в результате совместной работы различных организаций и ведомств. Так, в процессе эксплуатации рыбопромысловых судов целесообразными являются следующие этапы:

- модернизация и поэтапное обновление судовой энергетической установки, переход на рациональные режимы ее эксплуатации;
- внедрение технологий улучшения экологических показателей судна в целом;
- развитие инфраструктуры для перевода судовых энергетических установок на альтернативные экологические виды топлив.

Немаловажную роль в неэффективном развитии рыбопромыслового флота Республики Крым играет недостаточно развитая система организации судоремонта рыбопромысловых судов, т. е. в случае отсутствия планового межремонтного обслуживания при необходимости осуществляется только ремонт за счет финансирования рыболовных компаний, большинство которых находится на стадии банкротства из-за низкого уровня инвестиционной привлекательности рыбопромыслового бизнеса в Крыму.

Под низкой конкурентоспособностью современного отечественного оборудования подразумевается слабое развитие двигателестроения в Российской Федерации, а также недостаточное развитие рыбопромыслового оборудования и систем автоматизированного управления энергетической установкой для рыбопромысловых судов. Современная экономика, для которой характерны глобализация и технологический прогресс, предъявляет высокие требования к качеству судовых технических средств и, соответственно, к методам и технологиям их проектирования и производства. В соответствии с «Планом мероприятий по импортозамещению в судостроительной отрасли Российской Федерации» первоочередными задачами являются создание высококачественных и автоматизированных судовых средств, к которым относятся грузоподъемные устройства (ГУ), и снижение стоимости готового оборудования.

Низкая конкурентоспособность современного отечественного специального рыбопромыслового оборудования обусловлена следующими причинами:

- несовершенство методов расчета и проектирования грузоподъемного оборудования с учетом специфики работы;
- отсутствие разработанных систем автоматизированного управления грузоподъемного оборудования с учетом специфики работы;
- неполнота нормативной базы по расчету эксплуатационных нагрузок грузоподъемного оборудования рыбопромыслового судна;
- наличие программного обеспечения для автоматизированного расчета и проектирования грузоподъемного оборудования рыбопромыслового судна на основе упрощенных математических моделей.

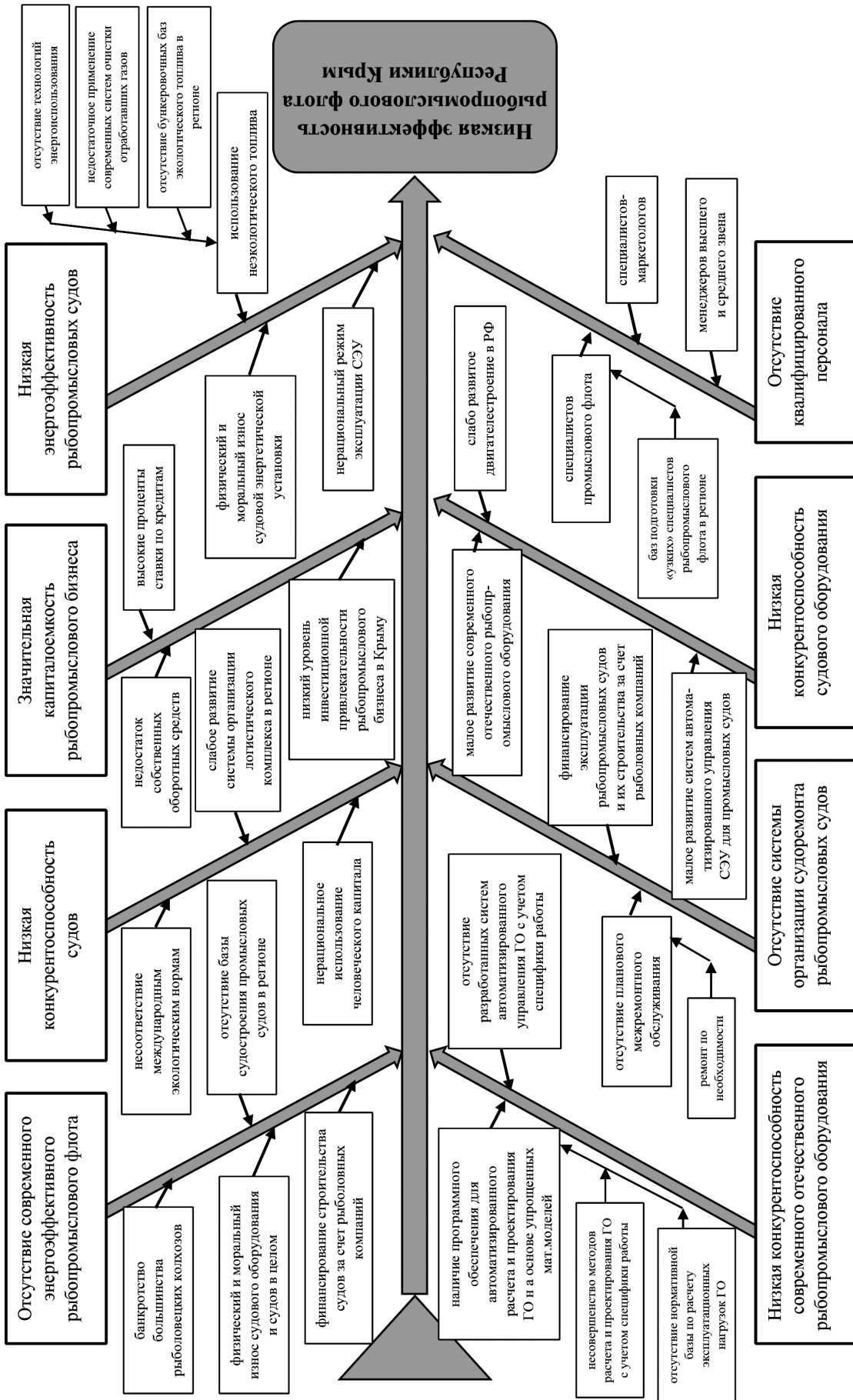


Рис. 1. Концептуальная схема проблемы неэффективной работы рыболовства Республики Крым (диаграмма Исикавы)
Fig. 1. Conceptual diagram of the problem of inefficient operation of the fishing fleet of the Republic of Crimea (Ishikawa diagram)

Создание современного отечественного судового оборудования является одной из основных задач технологической деятельности судостроительного производства. В данном случае конкурентоспособность представляет собой целевую функцию видов деятельности на всех этапах жизненного цикла судовых технических средств и зависит от показателей технической и экономической эффективности проектирования, производства и эксплуатации [3], [4]. Обеспечение конкурентоспособности судовых грузоподъемных устройств заключается в повышении уровня технической эффективности, а также оценке и прогнозировании экономической и технической эффективности (рис. 2).

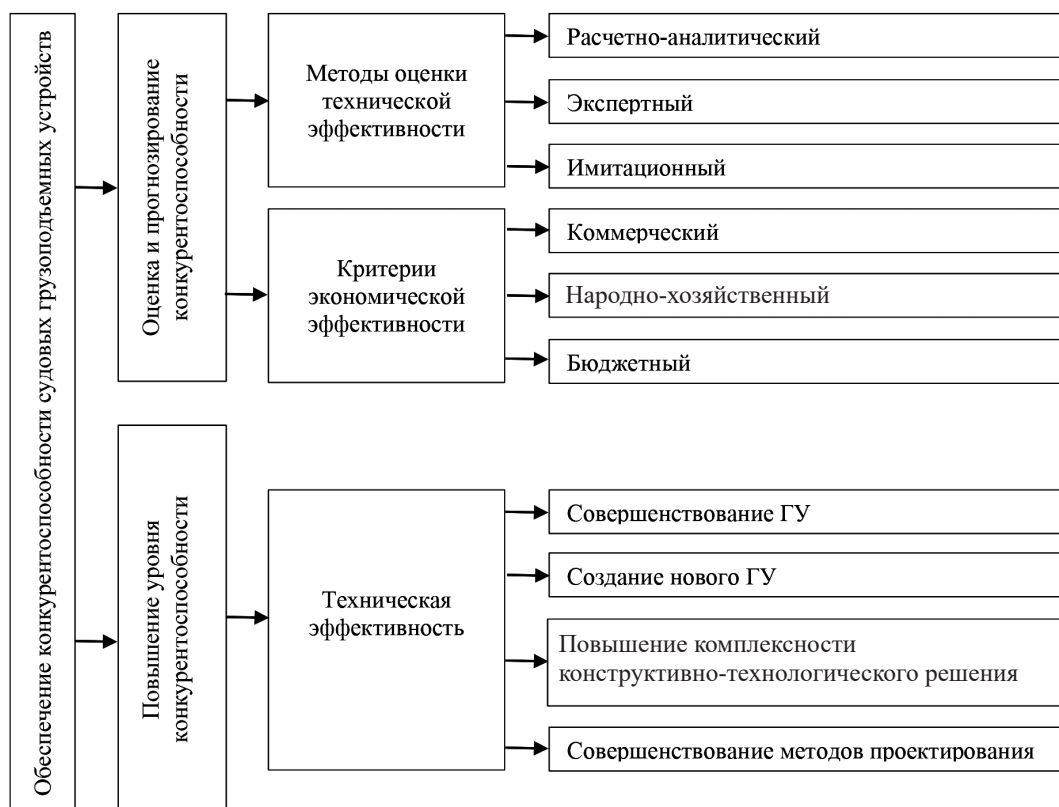


Рис. 2. Схема обеспечения конкурентоспособности судовых грузоподъемных устройств
Fig. 2. Scheme for ensuring the competitiveness of ship's lifting devices

Наряду с минимизацией затрат на всех этапах жизненного цикла оборудования необходимо повышение технического уровня как относительной характеристики, основанной на сопоставлении значений показателей, определяющих техническое совершенство оцениваемой продукции с соответствующими значениями базовых показателей. Качество судовых технических средств закладывается при техническом проектировании, обеспечивается в процессе производства и поддерживается в процессе эксплуатации оборудования. Стремление к автоматизации технологического процесса по спуску-подъему и буксировке объектов грузоподъемными устройства предполагает развитие средств описания и методов анализа конструктивно-технологических решений, позволяющих сравнивать и выбирать наиболее эффективные образцы по эксплуатационным и стоимостным характеристикам [5], [6]. Создаваемое новое грузоподъемное оборудование должно удовлетворять потребностям как судостроителей, так и рыбопромысловых компаний (рис. 3). Требования функциональности включают обеспечение необходимых показателей мощности, грузоподъемности, скорости, энергетических показателей: КПД и потерь, стабильности нагрузки и т. д.

Надежность создаваемого нового оборудования может быть достигнута за счет уточнения характера и законов распределения входных параметров, применения усовершенствованных ма-

тематических моделей и методов расчета, учитывающих нестационарность процессов, упрощение конструкции устройства, применение стандартных элементов и узлов со стабильной и проверенной на практике надежностью, а также снижение нагрузки и повышение коэффициента запаса [7]–[9].



Рис. 3. Схема требований к судовому оборудованию судостроительных и рыбопромысловых компаний
Fig. 3. Scheme of requirements for ship equipment of shipbuilding and fishing companies

Современное оборудование должно удовлетворять следующим требованиям:

- превышать по техническим и массогабаритным показателям, а также уровню надежности подобные аналоги отечественных и зарубежных машин;
- удовлетворять требованиям технической эстетики;
- обеспечивать безопасность персонала, эксплуатирующего и обслуживающего персонала;
- быть удобным в управлении и обслуживании;
- иметь автоматическую, адаптивную и дистанционную систему управления;
- быть ремонтпригодным, доступным для осмотра;
- удовлетворять принципу агрегатности;
- обеспечивать полную взаимозаменяемость узлов и деталей агрегатов;
- не допускать перегрузок машины с включением в конструкцию автоматических регуляторов, предохранительных и дублирующих устройств;
- предусматривать автоматический контроль и подачу смазки;
- обеспечивать влаго- и пылезащищенность конструкции, а также виброзащиту;
- быть экологически безопасным.

Проектирование судовых грузоподъемных устройств можно разделить на следующие фазы:

- концептуальное проектирование: создание концепции проекта;
- техническое проектирование: определение и решение основных задач проекта на уровне моделей;
- тестирование: проверка полученных результатов и корректировка выбранных средств;
- планирование и подготовка производства: планирование и реализация проекта.

Результаты (Results)

В процессе технического проектирования нового грузоподъемного оборудования целесообразным является применение системного подхода, подразумевающего создание совокупности конструкторских, технологических и эксплуатационных условий, необходимых для обеспечения рентабельности производства и надежного функционирования машины [10]–[14]. При таком подходе судовое техническое средство рассматривается как множество элементов, взаимодействующих между собой и образующих некоторое единое целое, представленное в виде системы, состоящей из подсистем различного уровня.

Системный подход включает:

- компонентный подход, изучающий поэлементный состав системы;
- структурный подход, предусматривающий изучение взаимного расположения в пространстве и времени;
- функциональный подход, рассматривающий функциональное взаимодействие подсистем и элементов;
- диагностический подход, предполагающий комплексный анализ ресурсов системы и затрат на реализацию функций;
- эволюционный подход, предусматривающий изучение генезиса системы.

Схема реализации системного подхода при проектировании судовых грузоподъемных устройств приведена на рис. 4.

Математическая модель грузоподъемного оборудования в системном подходе рассматривается в пространстве его состояний под влиянием эксплуатационных нагрузок, учитывающих его внутреннее и внешние факторы воздействия: А — нагрузки, возникающие при стационарных режимах работы оборудования с учетом допустимых гидрометеорологических условий; Б — нагрузки, возникающие при нестационарных режимах работы оборудования с учетом превышающих допустимые гидрометеорологических условий; В — нагрузки, возникающие в нерабочем состоянии грузоподъемных устройств. Такая модель представляет собой совокупность соотношений в виде различного рода уравнений, неравенств, операторов между характеристиками систем и их параметрами, которую можно представить векторным равенством

$$\{\Omega\} = f(\{A\}, \{B\}),$$

где $\{\Omega\} = \{\omega_1, \omega_2, \dots, \omega_n\}^T$ — вектор эксплуатационных характеристик;

$\{A\} = \{\alpha_1, \alpha_2, \dots, \alpha_k\}^T$ — вектор управляемых параметров;

$\{B\} = \{\beta_1, \beta_2, \dots, \beta_m\}^T$ — вектор неуправляемых параметров.

Используемая при проектировании конкретного вида грузоподъемного оборудования математическая модель отражает только свойства, характерные для данного исследования, которые определены его целью и задачами.

Задача оптимального проектирования заключается в определении экстремума вектора управляемых параметров $\{A\}$ при удовлетворении системы ограничений, налагаемых на параметры требованиями, предъявляемыми к системе:

$$F = F\{A\} \rightarrow \text{extr};$$

$$\varphi_i = (\{A\}) \geq 0, \quad i = \overline{1, r}.$$

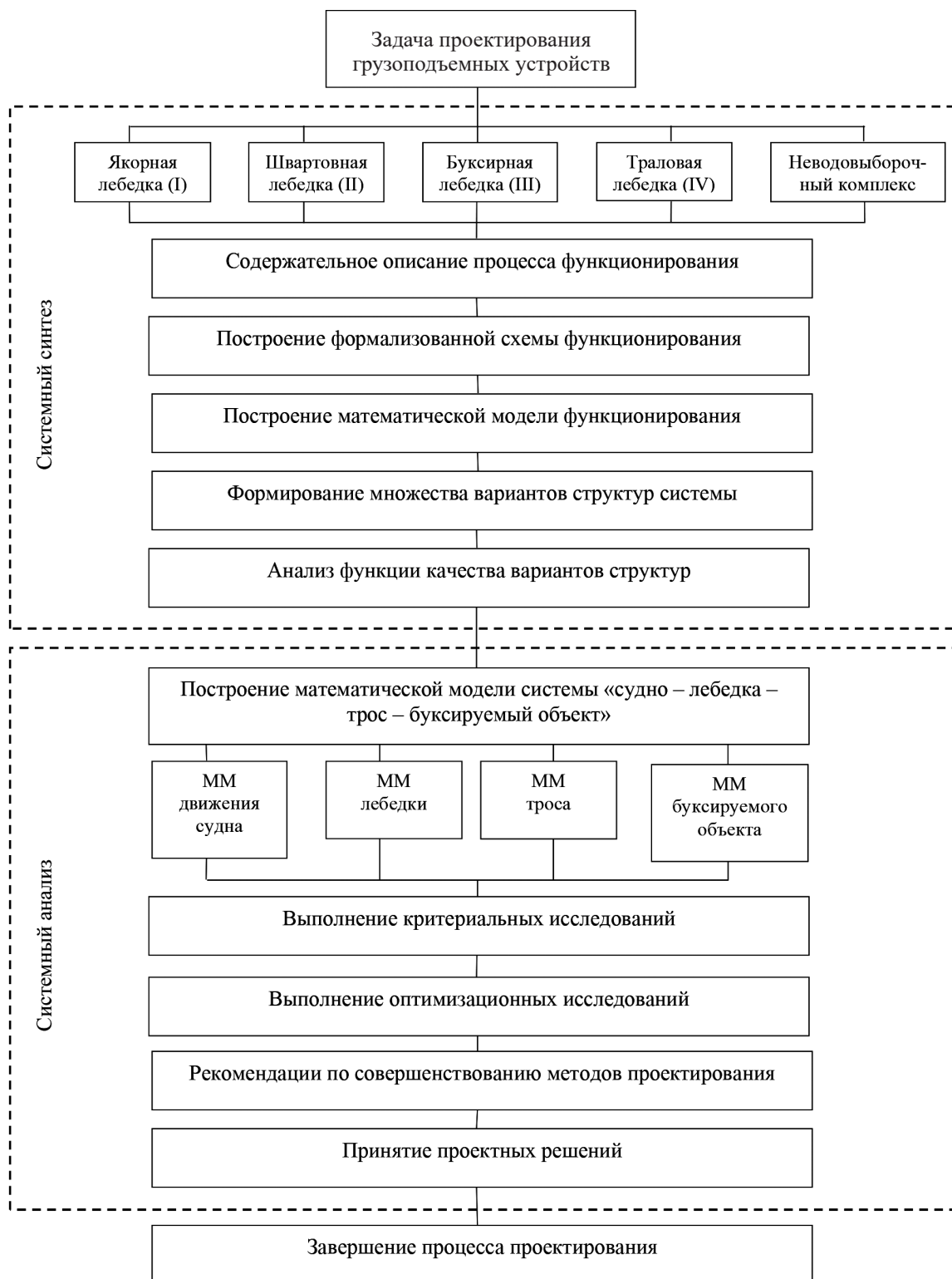


Рис. 4. Схема решения задачи проектирования грузоподъемных устройств на основе системного подхода
Fig. 4. Scheme for solving the problem of designing lifting devices based on a system approach

Оптимальное решение может заключаться в достижении повышенного уровня надежности или снижении эксплуатационных или построечных затрат, или получении других результатов в зависимости от поставленной задачи. Целесообразным является решение комплексной задачи, заключающейся в поиске оптимальных высоких эксплуатационных характеристик и низких стоимостных затрат. Реализация поиска решения такой задачи должна выполняться на всех уровнях

технического проектирования: функциональном, конструкторском, алгоритмическом и технологическом. Математическую модель эксплуатационно-стоимостного анализа можно представить в виде блочно-иерархической структуры:

$$S(X) = \{X, G(X), Q(X)\},$$

где X — множество элементов, входящих в систему привода грузоподъемного устройства;

$G(X)$ — множество свойств системы привода ГУ;

$Q(X)$ — множество параметров элементов привода ГУ, характеризующие их свойства.

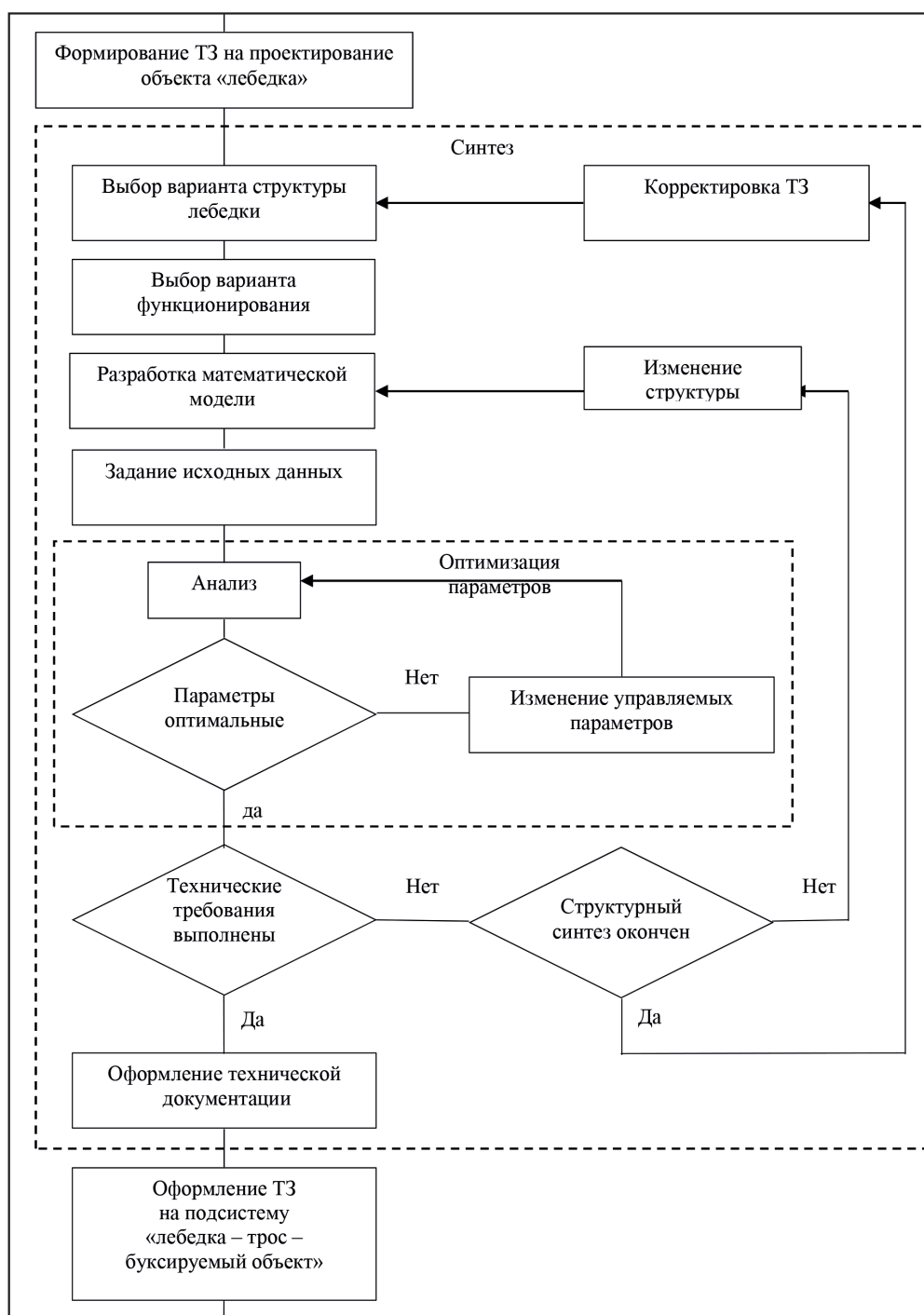


Рис. 5. Схема фрагмента алгоритма проектирования и оптимизации подсистемы ГУ

Fig. 5. Diagram of the algorithm fragment for designing and optimizing a subsystem of a lifting device

Далее, в соответствии с иерархией, необходимо определить входящие в математическую модель множества. Так, множество элементов состоит из агрегатов, узлов, деталей, входящих в состав привода ГУ:

$$X = \{X_1, X_2, \dots, X_n\},$$

где $X_i = \{x_{i1}, x_{i2}, \dots, x_{in}\}$.

Здесь X_i — составной элемент привода ГУ;

x_{in} — целый неделимый элемент.

Аналогичным образом описываются и другие множества модели:

$$G(X) = \{G_1, G_2, \dots, G_n\},$$

где $G_i = \{g_{i1}, g_{i2}, \dots, g_{im}\}$.

Здесь G_i — совокупность характеризующих свойств соответствующего элемента привода ГУ;

g_{im} — свойства, определяемые параметрами;

$$Q(X) = \{Q_1, Q_2, \dots, Q_n\},$$

где $Q_i = \{q_{i1}, q_{i2}, \dots, q_{ik}\}$.

Здесь Q_i — постоянные или переменные комплексные параметры элементов системы привода ГУ, состоящие из первичных q_{ik} величин.

Определив таким образом состав, свойства и параметры элементов системы привода грузоподъемного устройства, следует переходить к этапу алгоритмического проектирования. При этом целесообразно использовать блочно-иерархический подход, на основе которого осуществляется декомпозиция не только объекта проектирования, но и самого проектного процесса. Так, из схемы (см. рис. 4) можно выделить фрагмент проектирования и оптимизации объекта «судовое грузоподъемное устройство» системы на i -м уровне «лебедка» (рис. 5). Определив аналогичным способом алгоритмы проектирования остальных объектов, входящих в понятие «грузоподъемное оборудование» на других уровнях, можно получить типовой маршрут в системе автоматизированного проектирования в САПР с помощью частичной автоматизации данного процесса.

Для обеспечения требуемого уровня конкурентоспособности проектного решения немаловажным является соблюдение принципов комплексности и информационного единства. Под *принципом комплексности* подразумевается обеспечение взаимосвязи всех видов проектирования объекта в целом и его структурных элементов в отдельности на всех этапах жизненного цикла грузоподъемного устройства. Информационное единство заключается в обеспечении автоматизированными системами требований единой терминологии, унификации способов подачи информации и проблемно-ориентированных языков программирования.

Выводы (Summary)

На основании выполненного исследования можно сделать следующие выводы:

1. Развитие рыбопромыслового флота Республики Крым заключается в строительстве новых отечественных судов, оснащенных современным оборудованием, которое соответствует предъявляемым к нему требованиям и является экономически выгодным.

2. Предлагаемая математическая модель эксплуатационно-стоимостного анализа системы привода грузоподъемного устройства, применяемая при системном подходе проектирования, позволит обеспечить баланс между эксплуатационными и стоимостными характеристиками оборудования на всех этапах его жизненного цикла, что является необходимым условием при создании современных конкурентоспособных судовых технических средств.

3. Применение усовершенствованных математических моделей судовых грузоподъемных устройств, таких как система «судно – лебедка – трос – буксируемый объект», позволит имитировать функционирование объектов проектирования, обеспечить повышение точности получаемой информации, обеспечить получение оптимальных проектных решений, а также достижение универсальности описания отдельных проектных решений и процедур.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Те А. М. Эксплуатация судовых вспомогательных механизмов, систем и устройств / А. М. Те. — Л., 2014. — 86 с.
2. Антипов В. В. Математическое обеспечение и аппаратная реализация задач управления комплексом «рыбопромысловое судно — орудия лова» / В. В. Антипов, В. Ю. Бобрович, В. К. Болховитинов, А. А. Болисов // Морской вестник. — 2011. — № 4 (40). — С. 45–49.
3. Нино В. П. Диагностика технических средств на рыбопромысловых судах в процессе их эксплуатации / В. П. Нино // Рыбное хозяйство. — 2014. — № 4. — С. 113–115.
4. Kim Y. H. The simulation of the geometry of a tuna purse seine under current and drift of purse seiner / Y. H. Kim, M. C. Park // Ocean engineering. — 2009. — Vol. 36. — Is. 14. — Pp. 1080–1088. DOI: 10.1016/j.oceaneng.2009.06.011.
5. Bi C. W. Experimental investigation of the reduction in flow velocity downstream from a fishing net / C. W. Bi, Y. P. Zhao, G. H. Dong, T. J. Xu, F. K. Gui // Aquacultural engineering. — 2013. — Vol. 57. — Pp. 71–81. DOI: 10.1016/j.aquaeng.2013.08.002.
6. Carral J. Fishing grounds' influence on trawler winch design / J. Carral, L. Carral, M. Lamas, M. J. Rodriguez // Ocean Engineering. — 2015. — Vol. 102. — Pp. 136–145. DOI: 10.1016/j.oceaneng.2015.04.055.
7. Ивановская А. В. Классификация эксплуатационных нагрузок на палубные грузоподъемные устройства / А. В. Ивановская // Вестник Керченского государственного морского технологического университета. — 2020. — № 1. — С. 80–87.
8. Ivanovskaya A. V. Simulation of drive of mechanisms, working in specific conditions / A. V. Ivanovskaya, A. T. Rybak // Journal of Physics: Conference Series. — IOP Publishing, 2018. — Vol. 1015. — Is. 3. — Pp. 032054. DOI: 10.1088/1742-6596/1015/3/032054.
9. Ivanovskaya A. Basic principles of mathematical modeling of operating modes of deck equipment for fishing vessels / A. Ivanovskaya, V. Zhukov // Transportation Research Procedia. — 2021. — Vol. 54. — Pp. 104–110. DOI: 10.1016/j.trpro.2021.02.053.
10. Ивановская А. В. Основные направления повышения эксплуатационной безопасности рыбопромыслового судна / А. В. Ивановская, С. Г. Чёрный, В. А. Жуков // Транспорт России: проблемы и перспективы- 2022: материалы Междунар. науч.-практ. конф., Санкт-Петербург, 09–10 ноября 2022 года / ФГБУН Институт проблем транспорта им. Н. С. Соломенко Российской академии наук. — СПб.: Институт проблем транспорта им. Н. С. Соломенко РАН, 2022. — Т. 1. — С. 197–200.
11. Ивановская А. В. Исследование динамики приводов грузоподъемных устройств рыбопромыслового судна / А. В. Ивановская, В. А. Жуков, В. В. Попов // Вестник Государственного университета морского и речного флота имени адмирала С. О. Макарова. — 2021. — Т. 13. — № 6. — С. 875–886. DOI: 10.21821/2309-5180-2021-13-6-875-886.
12. Ивановская А. В. Статистический анализ отказов элементов палубного оборудования рыбопромыслового судна / А. В. Ивановская, Н. П. Клименко, В. В. Попов // Вестник Государственного университета морского и речного флота имени адмирала С. О. Макарова. — 2022. — Т. 14. — № 3. — С. 440–448. DOI: 10.21821/2309-5180-2022-14-3-440-448.
13. Ivanovskaya A. Mathematical Modeling of Operating Modes of Deck Equipment for Fishing Vessels / A. Ivanovskaya, V. Zhukov // Transportation Research Procedia. — 2021. — Vol. 54. — Pp. 104–110. DOI: 10.1016/j.trpro.2021.02.053.
14. Ивановская А. В. Моделирование расчетных нагрузок, действующих со стороны траловой системы на лебедку рыбопромыслового судна / А. В. Ивановская, В. А. Жуков // Вестник Государственного университета морского и речного флота имени адмирала С. О. Макарова. — 2020. — Т. 12. — № 5. — С. 935–944. DOI: 10.21821/2309-5180-2020-12-5-935-944.

REFERENCES

1. Te, A. M. *Ekspluatatsiya sudovykh vspomogatel'nykh mekhanizmov, sistem i ustroystv*. L., 2014.
2. Antipov, V. V., V. Yu. Bobrovich, V. K. Bolkhovitinov, and A. A. Bolisov. "Matematicheskoe obespechenie i apparatnaya realizatsiya zadach upravleniya kompleksom «rybopromyslovoe sudno—orudiya lova»." *Morskoi vestnik* 4(40) (2011): 45–49.
3. Nino, V. P. "Diagnostics of fishery vessels' technical facilities during exploitation." *Rybnoe khozyaistvo* 4 (2014): 113–115.

4. Kim, Yong-Hae, and Myeong-Chul Park. "The simulation of the geometry of a tuna purse seine under current and drift of purse seiner." *Ocean engineering* 36.14 (2009): 1080–1088. DOI: 10.1016/j.oceaneng.2009.06.011.
5. Bi, Chun-Wei, Yun-Peng Zhao, Guo-Hai Dong, Tiao-Jian Xu, and Fu-Kun Gui. "Experimental investigation of the reduction in flow velocity downstream from a fishing net." *Aquacultural engineering* 57 (2013): 71–81. DOI: 10.1016/j.aquaeng.2013.08.002.
6. Carral, Juan, Luis Carral, Miguel Lamas, and M Jesús Rodríguez. "Fishing grounds' influence on trawler winch design." *Ocean Engineering* 102 (2015): 136–145. DOI: 10.1016/j.oceaneng.2015.04.055.
7. Ivanovskaya, A. V. "Classification of operational loads on deck lifting devices." *Bulletin of the Kerch State Marine Technological University* 1 (2020): 80–87.
8. Ivanovskaya, A. V., and A. T. Rybak. "Simulation of drive of mechanisms, working in specific conditions." *Journal of Physics: Conference Series*. Vol. 1015. No. 3. IOP Publishing, 2018. 032054. DOI: 10.1088/1742-6596/1015/3/032054.
9. Ivanovskaya, Aleksandra, and Vladimir Zhukov. "Mathematical Modeling of Operating Modes of Deck Equipment for Fishing Vessels." *Transportation Research Procedia* 54 (2021): 104–110. DOI: 10.1016/j.trpro.2021.02.053.
10. Ivanovskaya, A. V., S. G. Chernyi, and V. A. Zhukov. "Main directions of increasing the operational safety of the fishing vessel." *Transport Rossii: problemy i perspektivy — 2022: Materialy Mezhdunarodnoi nauchno-prakticheskoi konferentsii*. Vol. 1. SPb.: Institut problem transporta im. N. S. Solomenko RAN, 2022. 197–200.
11. Ivanovskaya, Aleksandra V., Vladimir A. Zhukov, and Vladimir V. Popov. "Studying dynamics of hoisting apparatus drives of a fishing vessel." *Vestnik Gosudarstvennogo universiteta morskogo i rechnogo flota imeni admirala S. O. Makarova* 13.6 (2021): 875–886. DOI: 10.21821/2309-5180-2021-13-6-875-886.
12. Ivanovskaya, Aleksandra V., Nikolay P. Klimenko, and Vladimir V. Popov. "Statistical analysis of fishing vessel deck equipment elements failures." *Vestnik Gosudarstvennogo universiteta morskogo i rechnogo flota imeni admirala S. O. Makarova* 14.3 (2022): 440–448. DOI: 10.21821/2309-5180-2022-14-3-440-448.
13. Ivanovskaya, Aleksandra, and Vladimir Zhukov. "Mathematical Modeling of Operating Modes of Deck Equipment for Fishing Vessels." *Transportation Research Procedia* 54 (2021): 104–110. DOI: 10.1016/j.trpro.2021.02.053.
14. Ivanovskaya, Aleksandra V., and Vladimir A. Zhukov. "Simulation of design loads, acting from the side of the trawl system on the fishing vessel winch." *Vestnik Gosudarstvennogo universiteta morskogo i rechnogo flota imeni admirala S. O. Makarova* 12.5 (2020): 935–944. DOI: 10.21821/2309-5180-2020-12-5-935-944.

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

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
Жуков Владимир Анатольевич —
доктор технических наук, профессор
ФГБОУ ВО «ГУМРФ имени адмирала
С. О. Макарова»
198035, Российская Федерация, Санкт-Петербург,
ул. Двинская, 5/7
e-mail: va_zhukov@rambler.ru, zhukovva@gumrf.ru
Шустряков Николай Анатольевич — аспирант
Научный руководитель:
Сметюх Надежда Павловна —
кандидат технических наук, доцент
ФГБОУ ВО «Керченский государственный
морской технологический университет»
298309, Российская Федерация, Керчь,
ул. Орджоникидзе, 82
e-mail: shyst1998@yandex.ru

INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Ivanovskaya, Aleksandra V. —
PhD, associate professor
Kerch State Maritime
Technological University
82 Ordzhonykydze Str., Kerch, 298309,
Russian Federation
e-mail: invkerch@yandex.ru
Zhukov, Vladimir A. —
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: va_zhukov@rambler.ru, zhukovva@gumrf.ru
Shustriyakov, Nikolai A. — Postgraduate
Supervisor:
Smetyukh, Nadezhda P. —
PhD, associate professor
Kerch State Maritime
Technological University
82 Ordzhonykydze Str., Kerch, 298309,
Russian Federation
e-mail: shyst1998@yandex.ru

Статья поступила в редакцию 14 мая 2024 г.
Received: May 14, 2024.

АВТОМАТИЗАЦИЯ И УПРАВЛЕНИЕ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИМИ ПРОЦЕССАМИ И ПРОИЗВОДСТВАМИ

DOI: 10.21821/2309-5180-2024-16-3-456-466

OPTIMIZATION OF THE PENETRATION TESTING PROCESS IN AUTOMATED PROCESS CONTROL SYSTEMS USING MACHINE LEARNING ALGORITHMS

A. P. Nyrkov, E. S. Yumasheva, A. V. Kirikov

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

The process of widespread implementation of automated information management systems in industry, energy and transport is studied in the paper. It is noted that an increase in their complexity inevitably leads to the emergence of various kinds of vulnerabilities in these systems, the presence of which allows attackers to penetrate automated control systems, take control of them, and also disrupt the normal operation of the technological processes they control. It is emphasized that over the past decade, successful cyber attacks have been recorded in the energy sector, including nuclear, in maritime shipping, in port transshipment complexes, as well as in other systems. A preventive approach to ensuring the security of automated control systems is to identify and exploit existing vulnerabilities by simulating possible cyber attacks. It is noted that automation of such a rather labor-intensive process as “penetration testing” allows reducing time, financial costs and other resources. The main methods for identifying vulnerabilities, including the use of artificial intelligence, have been studied. The presented approach to optimizing the penetration testing process in automated process control systems uses machine learning algorithms. Preference is given to machine learning with reinforcement, which is based on the Deep Q-learning algorithm. The integration of network scanning methods, building an attack graph and training neural networks to effectively identify vulnerabilities and risks in network infrastructures is proposed in the paper. To build an attack graph, the MITER ATT&CK knowledge base using the GBVA Framework is utilized, and the Deep Q-learning algorithm is used to select optimal actions during testing.

Keywords: vulnerabilities, information security, penetration testing, machine learning, Deep Q-learning.

For citation:

Nyrkov, Anatoliy P., Elena S. Yumasheva, and Anton V. Kirikov. “Optimization of the penetration testing process in automated process control systems using machine learning algorithms.” *Vestnik Gosudarstvennogo universiteta morskogo i rechnogo flota imeni admirala S. O. Makarova* 16.3 (2024): 456–466. DOI: 10.21821/2309-5180-2024-16-3-456-466.

УДК 004.56

ОПТИМИЗАЦИЯ ПРОЦЕССА ТЕСТИРОВАНИЯ НА ПРОНИКНОВЕНИЕ В АСУ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИМИ ПРОЦЕССАМИ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ АЛГОРИТМОВ МАШИННОГО ОБУЧЕНИЯ

А. П. Нырков, Е. С. Юмашева, А. В. Кириков

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

Темой работы является исследование процесса широкого внедрения автоматизированных информационно-управляющих систем в промышленности, энергетике и на транспорте. Отмечается, что повышение их сложности неизбежно приводит к возникновению различного рода уязвимостей в этих системах, наличие которых позволяет злоумышленникам проникать в автоматизированные управляющие системы, брать их под свой контроль, а также нарушать нормальный режим работы управляемых ими

технологических процессов. Подчеркивается, что в течение последнего десятилетия успешные кибератаки были зафиксированы в энергетике, в том числе атомной, в морском судоходстве, в портовых перегрузочных комплексах, а также в других системах. Превентивный подход к обеспечению безопасности автоматизированных управляющих систем заключается в выявлении и использовании существующих уязвимостей путем имитации возможных кибератак. Отмечается, что автоматизация такого достаточно трудоемкого процесса, как «тестирование на проникновение», позволяет сократить время, финансовые затраты и другие ресурсы. Исследованы основные методы выявления уязвимостей, в том числе с применением искусственного интеллекта. В представленном подходе к оптимизации процесса тестирования на проникновение в автоматизированные системы управления технологическими процессами использованы алгоритмы машинного обучения. Предпочтение отдано машинному обучению с подкреплением, основу которого составляет алгоритм *Deep Q-learning*. Предлагается интеграция методов сканирования сети, построения графа атак и обучения нейронных сетей для эффективного выявления уязвимостей и рисков в сетевых инфраструктурах. Для построения графа атак используются базы знаний MITRE ATT&CK с применением GBVA Framework, для выбора оптимальных действий в процессе тестирования — алгоритм *Deep Q-learning*.

Ключевые слова: уязвимости, информационная безопасность, тестирование на проникновение, машинное обучение, *Deep Q-learning*.

Для цитирования:

Нырков А. П. Оптимизация процесса тестирования на проникновение в АСУ технологическими процессами с использованием алгоритмов машинного обучения / А. П. Нырков, Е. С. Юмашева, А. В. Кириков // Вестник Государственного университета морского и речного флота имени адмирала С. О. Макарова. — 2024. — Т. 16. — № 3. — С. 456–466. DOI: 10.21821/2309-5180-2024-16-3-456-466.

Введение (Introduction)

Одной из актуальных тенденций современности является возрастающее количество атак на промышленный сегмент сети, в частности, на автоматизированные системы управления технологическими процессами (далее — АСУ ТП). Большинство предприятий промышленности давно перешли на автоматизированное производство, при этом регуляторы и крупные вендоры только относительно недавно (в морской отрасли с 2012 г.) начали изучать вопрос защиты таких систем. Нормативно-правовая база в данной области не является пока окончательно сформировавшейся. Несмотря на то, что с момента выхода одного из основополагающих федеральных законов в этой области — ФЗ № 187 от 26.07.2017 «О безопасности критической информационной инфраструктуры» [1], прошло 7 лет, лишь 2–3 года назад организации начали уделять более пристальное внимание реализации требований закона: началась разработка концепций, появились требования к развертыванию АСУ ТП и т. д.

Причиной особого внимания к информационной безопасности на объектах критической информационной инфраструктуры явился вирус Stuxnet [2], который впервые в истории преодолел барьер между виртуальным миром и реальным. Этот вирус является точечной разработкой, цель которой состоит в отключении ключевой части иранской ядерной программы путем уничтожения центрифуг, используемых для обогащения урана. После заражения компьютера вирус Stuxnet проверяет возможность подключения к программируемым логическим контроллерам (далее — ПЛК). Если доступ к ПЛК обнаружен, то Stuxnet начинает постепенно подменять часть STEP7, отвечающую за прошивку кода ПЛК. Подмена кода позволяет прослушивать сеть Profibus-DP, генерировать / подменять необходимые для дальнейшего закрепления сетевые пакеты, читать входы и управлять выходами ПЛК, подключаться к базе данных WinCC. Для получения успешных результатов злоумышленникам пришлось использовать комплексный подход к атаке, в основе которого применение социальной инженерии и программно-аппаратной части с использованием уязвимостей операционной системы.

Цифровые технологии становятся все более важными в морской сфере. Степень сложности и разнообразие технологий, используемых на современных судах, включая навигационные, информационно-коммуникационные и эксплуатационные системы, допускают различные возможные уязвимости. Любой сбой, вызванный кибератакой, может иметь не только серьезные

экономические и экологические последствия, но и приводить к человеческим жертвам [3], [4]. Порты в этом отношении также не следует игнорировать, поскольку переход на цифровые технологии в перегрузочных и складских операциях создает дополнительные угрозы, что делает эти территории привлекательными для злонамеренных действий со стороны субъектов угроз [5].

За последние 7 лет в этой области было зарегистрировано несколько атак. Примечательным примером является кибератака в июне 2017 г. на глобальную судоходную компанию Maersk, которая привела к массовым сбоям в работе и значительным финансовым потерям [6]. В ходе другого инцидента, произошедшего в феврале 2017 г., киберпреступники взяли под контроль ИТ-системы контейнеровоза, принадлежащего Германии [7]. В декабре 2019 г. итальянская базовая станция АИС также подверглась значительным помехам, когда в районе о. Эльба внезапно появились сотни фальшивых кораблей, что привело к нарушению мониторинга судоходства в этом районе [7].

В данной статье исследован комплексный подход к вопросам формирования системы информационной безопасности на подобных объектах, а также повышения общего уровня ее защищенности за счет внедрения автоматизированного процесса тестирования на проникновение.

Актуальность этой работы обусловлена возросшим количеством кибератак на АСУ ТП, что наглядно отображено в ежегодных отчетах крупных вендоров (Kaspersky, Positive Technologies) [8], а также нехваткой квалифицированных специалистов в области тестирования, так как эта задача является довольно трудоемкой.

Методы и материалы (Methods and Materials)

Методы выявления уязвимостей. Одним из ключевых методов в современной оценке степени защищенности объекта, при котором выполняется всесторонний анализ и исследование системы, является тестирование на проникновение (Penetration Testing (PT)). Целью моделирования реальных сценариев атак является оценка потенциальных рисков и повышение общего уровня защищенности системы путем проведения упреждающих мероприятий по устранению уязвимостей, а именно: анализ архитектуры системы, выявление слабых мест и определение последующих векторов развития потенциальных атак. Однако это довольно ресурсозатратная задача как с финансовой точки зрения, так и с точки зрения человеческих ресурсов, поэтому автоматизация поиска уязвимостей не является новой технологией в этой области.

Разработано большое количество инструментов, облегчающих работу тестировщиков и способствующих повышению их эффективности. Эти инструменты включают сканеры сетей и уязвимостей, а также базы известных уязвимостей под каждую систему. Наиболее популярным в настоящее время является Metasploit, содержащий огромную базу известных эксплойтов системных уязвимостей. Подобные инструменты помогают специалистам работать на более высоком уровне абстракции, позволяющем сосредоточиться на поиске уязвимостей и выборе эксплойтов вместо рутинной работы на низком уровне ручного тестирования, однако использование данных инструментов без высококвалифицированного специалиста не имеет смысла.

Один из подходов к решению задачи проведения эффективного и надежного тестирования заключается в применении методов машинного обучения из области искусственного интеллекта. Первичные концепции строились лишь на создании «графов атак», которые должны были моделировать существующую сеть как граф подключенных компьютеров, где атаки могут быть построены в сети на основе известных уязвимостей и эксплойтов. При этом графы атак в реализации классического машинного обучения могут быть полезны лишь при полном знании системы, что накладывает определенные ограничения.

Другой концепцией подходов является моделирование атак как частично наблюдаемого марковского процесса принятия решений (MDP). Такое моделирование позволяет исключить предположение о том, что конфигурация каждого хоста заранее известна, и дает возможность моделировать наблюдения за конфигурациями по мере продвижения атаки. Однако данный способ плохо масштабируется и применим лишь на одной хост-машине.

Penetration Testing в рамках одного аудита может иметь довольно большой спектр целей и задач, поэтому данная область довольно хорошо регламентирована международными стандартами и методиками, начиная с первичного взаимодействия аудитора и заказчика и заканчивая порядком испытаний тестируемых объектов. Суммируя концепции наиболее популярных методологий и стандартов, таких как Open Source Security Testing (OSSTMM), Open Web Application Security Project (OWASP), National Institute of Standards and Technology (NIST), Penetration Testing Methodologies and Standards (PTES), Information System Assessment Framework (ISSAF), обобщенный процесс пентеста можно представить в виде следующих этапов:

- планирование и определение области тестирования;
- сбор информации о сетевой инфраструктуре;
- сканирование, обнаружение и оценка сетевых уязвимостей;
- предоставление отчета о проведенной работе и определение контрмер.

В данном исследовании будем опираться на стандарт PTES, разработанный в 2009 г., точнее на его обновленную версию 1.1, выпущенную в 2017 г. Этот стандарт включает пять основных технических аспектов проведения тестирования на проникновение, приведенных в следующей таблице.

Этапы тестирования на проникновение

Аспекты	Описание	Пример реализации
Сбор информации об объекте тестирования (Intelligence Gathering)	Сбор как можно большего количества информации из общедоступных источников.	Open source intelligence (OSINT): анализ физической инфраструктуры, сканирование сети, анализ используемого ПО и т. д.
Анализ уязвимостей / сканирование (Enumeration / Scanning)	Обнаружение приложений и сервисов, работающих в системе.	Анализ уязвимостей ОС, БД, VPN, транспортных протоколов, беспроводных сетей и т. д.
Эксплуатация уязвимостей (Exploitation)	Формирование векторов атаки, ориентированных на проникновение в защищенный периметр, за счет выявленных уязвимостей	DOS-атаки, атаки на протоколы WEP и WAP, атаки на сетевые протоколы и т. д.
Повышение привилегий (Privilege Escalation)	Расширение прав доступа в системе, горизонтальное или вертикальное повышение привилегий.	Эксплуатация уязвимостей с целью получения root-прав
Постэксплуатация (Post-exploitation)	Сбор дополнительной информации для расширения области тестирования, зачистка следов присутствия в системе.	Уязвимости ОС, ПО, формирование закладок для последующей эксплуатации, обход внутренних средств защиты; и т. д.

Стандарт PTES рекомендует проводить регулярные сессии планирования для переоценки собранной информации и продолжать пункт Post-exploitation до тех пор, пока не будут достигнуты поставленные цели.

Анализ алгоритмов машинного обучения. Машинное обучение (Machine Learning (ML)) — один из разделов / ветвей области ИИ, основная цель которого состоит не в создании чего-либо нового, а в прогнозировании, запоминании, принятии наилучшего выбора на основе обучающей выборки и алгоритмов. ML имеет три основные ветви: классическое обучение, обучение с подкреплением нейросети и глубокое обучение. Каждая из ветвей имеет свои преимущества и недостатки в различных ситуациях.

Классическое машинное обучение используется во многих поисковых системах интернета при рекомендации ссылок на страницы сайтов, кинофильмов, музыки, статей и т. п. Классическое ML бывает двух типов: *контролируемое обучение* (Supervised Learning) или *обучение без контролера* (Unsupervised Learning). Для первого типа заранее должен быть подготовлен большой мас-

сив размеченных данных для обучения и дальнейшего сопоставления результатов. Примерами алгоритмов этой категории являются: наивный Байес, деревья решений, логическая регрессия, метод опорных векторов и др. Такие алгоритмы показывают хорошие результаты в задачах категоризации объектов по заранее известным признакам (например, определение аномальных транзакций, прогнозирование поведения рынка ценных бумаг, диагностирование медицинских заболеваний и т. д.).

Для задачи автоматизации Penetration Testing данная ветвь ML не подходит, так как содержит некоторые ограничения, а именно:

- сбор и разметка большого объема данных для обучения алгоритма, что, в свою очередь, влечет огромные финансовые и трудовые затраты;
- классические алгоритмы, подразумевающие работу с теми же данными, на которых базировались обучающие выборки, и изучающие только базовые сигнатуры и закономерности в предоставленной обучающей выборке.

Алгоритмы обучения без контролера используются в основном в качестве метода анализа данных. К ним относятся метод k -средних, метод главных компонент, сингулярное разложение и др. Эти методы используют для сегментации рынка, сжатия изображений, построения детекторов аномального поведения, но при этом повышается риск ложных срабатываний. Однако применение таких методов также неоправданно при построении алгоритма, автоматизирующего процесс пентеста, ввиду следующих причин:

- наличие высокого риска ложно положительных срабатываний, неправильное выявление уязвимостей, отчеты о нахождении связей, которых на самом деле нет;
- обучение требует хоть и не размеченного, но также большого объема данных для обучающей выборки;
- необходимо большое количество итераций для получения итоговых результатов.

Машинное обучение с подкреплением (Reinforcement Learning (RL)) — это метод ML, в котором система вырабатывает способ принятия решений для достижения наиболее оптимальных результатов.

Обучение с подкреплением состоит из двух основных объектов: *Агента* и *Окружающей среды* (рис. 1). *Агент* — это в данном случае алгоритм, на который постоянно воздействует окружающая среда S_t . Благодаря ей он получает информацию через признаки, состояния или наблюдения, совершает определенные действия A_t , получает за их выполнение вознаграждения R_t и переходит в следующее состояние. Цикл будет повторяться до тех пор, пока окружение не отправит признак окончания работы.

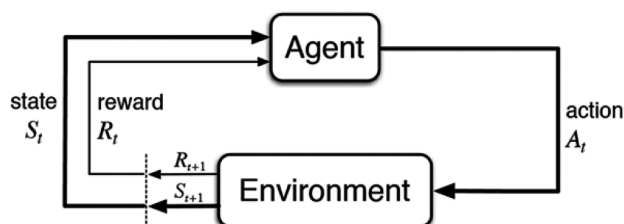


Рис. 1. Взаимодействие агента с окружающей средой [9]

Fig. 1. Agent interaction with the environment [9]

RL похоже на имитацию игры на выживание, т. е. *Агент* пытается обобщить ситуации, для того чтобы выйти из них с максимальной выгодой. В 2016 г. машина обыграла человека в одну из древнейших игр ГО [10], несмотря на то, что ранее была доказана невозможность пересчета всех комбинаций [11], так как их общее число превышает количество атомов во Вселенной. Победа оказалась возможной не из-за пересчета всех возможных комбинаций, а благодаря выбору наилучшего выхода из каждой конкретной ситуации. Именно на этой идее базируется алгоритм *Q-learning*, т. е. *Агент* учится выбирать наиболее качественные решения, воспринимая и запоминая все ситуации подобно марковскому процессу принятия решений [9]. Также наиболее существенным «плюсом»

таких алгоритмов является то, что потребность в обучающей выборке заменяется поощрениями (reward) за выполненные действия от окружающей среды. Цель *Агента* состоит не в нахождении единственно верного ответа, а в максимизации своей «награды» за выполненную работу.

Основой этого метода является алгоритм *Deep Q-learning* (DQL), который использует нейронные сети для аппроксимации функции действий, что позволяет более гибко моделировать сложные задачи и зависимости между состояниями и действиями. Например, пусть $Q(s, a)$ — Q -значная функция, где s — состояние; a — действие. Цель DQL состоит в том, чтобы обучить параметризованную сеть $Q(s, a, \theta)$, где θ — весовой вектор.

Архитектура Q -сети состоит из нескольких слоев нейронов (рис. 2). Входом может быть состояние среды, на выходе каждый нейрон представляет оценку Q -значений для соответствующего действия.

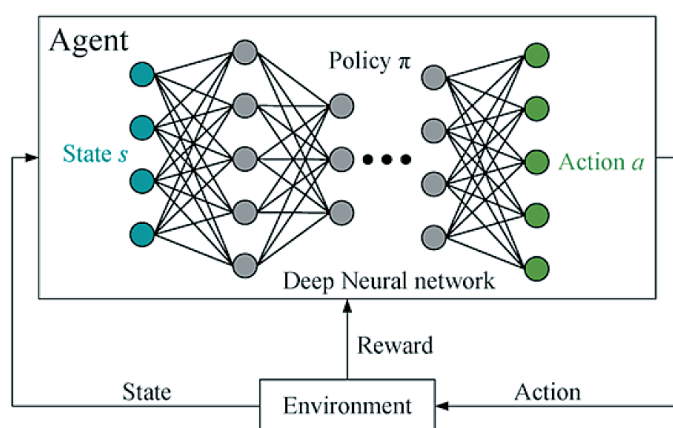


Рис. 2. Схема глубокого обучения с подкреплением
Fig. 2. Deep Reinforcement Learning diagram

Обновление весов θ происходит при помощи минимизации следующей функции потерь:

$$L(\theta) = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (y_i - Q^\theta(s_i, a_i))^2, \quad (1)$$

где y_i — целевое значение, к которому необходимо приблизиться.

Используем для этого алгоритм обновления Q -значения на основе уравнения Беллмана:

$$y_j = \begin{cases} r_j; \\ r_j + \gamma \max_{a'} Q^\theta(s', a'), \end{cases} \quad (2)$$

где r_j — награда за выполнение действия;

γ — коэффициент дисконтирования.

Далее с помощью метода стохастического градиентного спуска (SGD) будем обновлять веса нейронной сети таким образом, чтобы значения Q -функции приблизить к целевым значениям:

$$\theta = \theta - \alpha \nabla_\theta L(\theta), \quad (3)$$

где α — скорость обучения, принимающая значения между 0 и 1.

Таким образом, суть алгоритма DQL состоит в том, чтобы последовательно обновлять веса сети, используя полученные данные об обучении и вычисленные значения Q -функции, минимизируя ошибку между текущими предсказаниями и целевыми Q -значениями.

Результаты (Results)

Предлагаемый подход к тестированию на проникновение. Для использования DQL в задаче тестирования на проникновение система тестирования должна быть построена как математическая модель MDP, описывающая принятие решений в среде, где результаты действий частично

случайны и зависят только от текущего состояния и выполненного действия. Данную модель можно описать как упорядоченную пятерку:

$$\langle S, A, P, R, \gamma \rangle,$$

где S — множество возможных состояний среды, в которых может находиться система во время тестирования (например, информация об уязвимостях, запущенных службах, идентификация хоста, его привилегии и др.);

A — множество действий, которые может выполнить агент в каждом состоянии (могут включать в себя сканирование уязвимостей и их эксплуатацию и т. п.);

P — матрица перехода между состояниями, определяющая вероятность перехода из одного состояния в другое при выполнении конкретного действия;

R — функция вознаграждения, определяющая количество вознаграждения или штрафа для каждой пары «состояние – действие» (вознаграждение может быть присвоено за обнаружение уязвимости и / или ее успешную эксплуатацию, штраф — за обнаружение ложной уязвимости или неудачные попытки ее эксплуатации);

γ — коэффициент дисконтирования, который определяет вес будущих вознаграждений по сравнению с текущими (используется для балансировки краткосрочных или долгосрочных целей агента).

Агент выбирает свои действия на основе заданной стратегии, а стратегия определяет, какие действия предпринимать в каждом состоянии среды для максимизации ожидаемых вознаграждений.

Ожидаемые вознаграждения представим в виде суммы всех будущих наград R_t , начиная с момента t до бесконечности:

$$R_t = R_{t+1} + \gamma R_{t+2} + \dots = \sum_{k=0}^{\infty} \gamma^k R_{t+k+1}. \quad (4)$$

Таким образом, использование принципов MDP позволяет агенту принимать обоснованные решения на основе получаемых данных, эффективно управлять рисками и ожидаемыми вознаграждениями, и создавать адаптивную стратегию, которая обеспечит наилучшие результаты при обнаружении и предотвращении уязвимостей в системе.

Алгоритм сканирования сети. На первом этапе выполняется сканирование сети с помощью инструмента Nmap, используемого также для обнаружения устройств, открытых портов и сервисов, работающих на этих портах. Результаты сканирования сохраняются в формате, который можно анализировать и использовать на следующих этапах.

Вторым этапом является построение *дерева атак* с помощью GBVA Framework на основе MITRE ATT&CK [12] — базы знаний, разработанной MITRE Corporation, которая описывает типичные тактики, методы и техники злоумышленников при выполнении кибератак. Сначала алгоритм извлекает информацию о методах атаки и уязвимостях из базы, далее на основе полученной информации происходит построение графа атак, представляющего потенциальные пути атаки на целевую сеть. Затем система применяет алгоритм Deep First Search (DFS) для эффективного исследования потенциальных векторов [13], который обеспечивает исследование каждого вектора до конца, прежде чем переходит к альтернативным направлениям, что позволяет обнаруживать наиболее глубокие и потенциально опасные уязвимости сети.

На третьем этапе происходит инициализация нейронной сети и начало обучения. Алгоритм Deep Q-learning используется для выбора оптимальных действий *Агента* в каждом состоянии графа атак. Система стремится минимизировать сумму потерь и максимизировать сумму вознаграждений, получаемых за успешно выполненные атаки. Q-функция оценивает ожидаемую сумму вознаграждений, которые получит агент, выбрав действие a в состоянии s , т. е. оптимально выполняя процедуру до конца итераций. Ее обновление происходит на основе ошибки между

текущей и целевой оценкой, рассчитанной с учетом полученного вознаграждения и оценки состояния на следующем шаге:

$$Q(s, a) = Q(s, a) + \alpha(r + \gamma \max_{a'} Q(s', a') - Q(s, a)), \quad (5)$$

где $Q(s, a)$ — текущая оценка функции для состояния s и действия a ;

r — полученное вознаграждение;

α — скорость обучения;

γ — дисконт фактор, учитывающий влияние будущих наград;

s' — состояние, в которое агент переходит после выполнения действия a' в состоянии s ;

$\max_{a'} Q(s', a')$ — максимальное значение Q -функции для всех возможных действий a' в состоянии s' .

Параметры нейронной сети обновляются с использованием градиентного спуска и обратного распространения ошибки [14, 15]. Функция потерь для обновления параметров Q -сети вычисляется как среднеквадратическая ошибка (MSE) между текущей оценкой Q -функции и ее целевым значением:

$$L(\theta_i) = \text{MSE}(y - Q(s_t, a_t, \theta_i))^2. \quad (6)$$

Матрица переноса P_{nn} представляет собой матрицу, описывающую возможные переходы между состояниями в графе атак, обновление которой происходит в соответствии с текущими результатами атак и обучением нейронной сети:

$$P_{nn} = \begin{bmatrix} p_{11} & p_{12} & \cdots & p_{1n} \\ p_{21} & p_{22} & \cdots & p_{2n} \\ \cdots & \cdots & p_{ij} & \cdots \\ p_{m1} & p_{m2} & \cdots & p_{mn} \end{bmatrix} \quad (7)$$

где p_{ij} — вероятность перехода из состояния s_i в состояние s_j при выполнении конкретного действия a_k .

Псевдокод алгоритма РТ:

1. Получение информации о топологии сети.
2. Выявление чувствительных значений хоста.
3. Использование GBVA Framework для создания дерева атак.
4. Поиск векторов графа атак с использованием алгоритма Deep First Search.
5. Создание матрицы переноса (7).
6. Инициализация нейронных сетей.
7. **for** шаг_итерации **from** 1 **to** Max **do**.
8. **for** t **from** 1 **to** T **do**.
9. Выбор действия Агента a в соответствии со значениями Q -функции (5).
10. Выполнение действия a и получение последующего состояния среды s' , вознаграждения r .
11. Добавление кортежа перехода (s, a, r, s') в D .
12. $s = s'$.
13. **if** $|D| > \text{размера пакета}$ **then**.
14. Выборка и построение целевого значения Q в соответствии с уравнением (2).
15. Выполнение шага градиентного спуска с функцией потерь (6).
16. Замена весовых параметров θ .
17. **end if**.
18. **end for**.
19. **end for**.

Заключение (Conclusion)

В работе рассмотрен подход к оптимизации процесса тестирования на проникновение в АСУ ТП с использованием алгоритмов машинного обучения. Предложено использование итерации методов сканирования сети (Nmap), построения графа атак на основе базы знаний MITRE ATT&CK с применением GBVA Framework, обучения нейронных сетей для эффективного выявления уязвимостей и рисков в сетевых инфраструктурах, а также алгоритм Deep Q-learning для выбора оптимальных действий в процессе тестирования на проникновение.

Несмотря на то, что экспериментальная часть работы еще не выполнена, теоретический анализ предложенного подхода позволяет предположить его достаточную эффективность и перспективность в контексте оптимизации процесса тестирования на проникновение в АСУ ТП. Ожидается, что предложенная методика позволит автоматизировать процесс выявления уязвимостей и повысить эффективность действий испытателя на проникновение, что, в свою очередь, позволит сократить время и затраты на обнаружение и устранение уязвимостей в сетевых системах.

Дальнейшие исследования будут направлены на завершение создания необходимых для работы системы тестирования модулей и проведение экспериментальной проверки предложенного подхода с целью подтверждения его эффективности.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Федеральный закон «О безопасности критической информационной инфраструктуры» от 26.07.2017 № 187 [Электронный ресурс]. — Режим доступа: http://www.consultant.ru/document/cons_doc_LAW_220885/ (дата обращения 21.10.2023).
2. An Unprecedented Look at Stuxnet, the World's First Digital Weapon [Электронный ресурс]. — Режим доступа: <https://www.wired.com/2014/11/countdown-to-zero-day-stuxnet/> (дата обращения: 03.11.2023).
3. Когтев А. В. Обоснование необходимости создания автоматизированной информационной системы оценки и прогнозирования киберугроз на морских судах под флагом РФ / А. В. Когтев // Современные тенденции и перспективы развития водного транспорта России: матер. межвуз. науч.-практ. конф. аспирантов, студентов и курсантов. 20 мая 2021 г. — СПб.: Изд-во ГУМРФ им. адм. С. О. Макарова, 2021. — 2 часть. — С. 37–41.
4. Kardakova M. Cyber security on sea transport / M. Kardakova, I. Shipunov, A. Nyrkov, T. Knysh // Energy Management of Municipal Transportation Facilities and Transport. — Cham: Springer International Publishing, 2018. — Pp. 481–490. DOI: 10.1007/978-3-030-19756-8_46.
5. Наташова К. В. К вопросу о категорировании объектов критической информационной инфраструктуры морских портов / К. В. Наташова, С. С. Соколов, О. Н. Губернаторов, А. П. Нырков, А. В. Кириков // Безопасность информационных технологий. — 2020. — Т. 27. — № 2. — С. 35–46. DOI: 10.26583/bit.2020.1.03.
6. Alcaide J. I. Critical infrastructures cybersecurity and the maritime sector / J. I. Alcaide, R. G. Llave // Transportation Research Procedia. — 2020. — Vol. 45. — Pp. 547–554. DOI: 10.1016/j.trpro.2020.03.058
7. Androjna A. Assessing cyber challenges of maritime navigation / A. Androjna, T. Brcko, I. Pavic, H. Greidanus // Journal of Marine Science and Engineering. — 2020. — Vol. 8. — Is. 10. — Pp. 776. DOI: 10.3390/jmse8100776.
8. Attacks on industrial sector hit record in second quarter of 2023 [Электронный ресурс]. — Режим доступа: https://www.kaspersky.com/about/press-releases/2023_attacks-on-industrial-sector-hit-record-in-second-quarter-of-2023 (дата обращения: 20.11.2023).
9. Sutton R. S. Reinforcement Learning: An Introduction / R. S. Sutton, A. G. Barto. — Second edition. — Cambridge: MIT Press, 2020. — 526 p.
10. Воронцов Н. AlphaGo победила человечество в го [Электронный ресурс] / Н. Воронцов. — Режим доступа: <https://nplus1.ru/news/2017/05/25/now-it-is-official> (дата обращения: 30.11.2023).
11. Воронцов Н. Точное количество разрешенных комбинаций в го оказалось больше числа атомов во Вселенной [Электронный ресурс] / Н. Воронцов. — Режим доступа: <https://nplus1.ru/news/2016/01/25/mathematical> (дата обращения: 22.11.2023).
12. ATT&CK Matrix for Enterprise [Электронный ресурс]. — Режим доступа: <https://attack.mitre.org> (дата обращения: 22.11.2023).
13. Нырков А. П. Дискретная математика: кодирование и обработка дискретных структур данных / А. П. Нырков, А. Ю. Кузнецов, Е. В. Зуров, А. В. Башмаков. — СПб.: ГУМРФ им. адм. С. О. Макарова, 2022. — 92 с.

14. Zhilenkov A. A. Intelligent autonomous navigation system for UAV in randomly changing environmental conditions / A. A. Zhilenkov, S. G. Chernyi, S. S. Sokolov, A. P. Nyrkov // Journal of Intelligent & Fuzzy Systems. — 2020. — Vol. 38. — Is. 5. — Pp. 6619–6625. DOI: 10.3233/JIFS-179741.

15. Sokolov S. Hybrid neural networks in cyber physical system interface control systems / S. Sokolov, A. Zhilenkov, S. Chernyi, A. Nyrkov, N. Glebov // Bulletin of Electrical Engineering and Informatics. — 2020. — Vol. 9. — No. 3. — Pp. 1268–1275. DOI: 10.11591/eei.v9i3.1293.

REFERENCES

1. Federal'nyi zakon "O bezopasnosti kriticheskoi informatsionnoi infrastruktury" ot 26.07.2017 № 187. Web. 21 Oct. 2023 <http://www.consultant.ru/document/cons_doc_LAW_220885/>.

2. An Unprecedented Look at Stuxnet, the World's First Digital Weapon. Web. 3 Nov. 2023 <<https://www.wired.com/2014/11/countdown-to-zero-day-stuxnet/>>.

3. Kogtev A. V. "Justification of the need to create an automated information system for assessing and predicting cyber threats on sea vessels under the flag of the Russian Federation." *Sovremennye tendentsii i perspektivy razvitiya vodnogo transporta Rossii: mater. mezhvuz. nauch.-prakt. konf. aspirantov, studentov i kursantov*. Vol. 2. SPb.: Izd-vo GUMRF im. adm. S. O. Makarova, 2021. 37–41.

4. Kardakova, Maria, Ilya Shipunov, Anatoly Nyrkov, and Tatyana Knysh. "Cyber security on sea transport." *Energy Management of Municipal Transportation Facilities and Transport*. Cham: Springer International Publishing, 2018. 481–490. DOI: 10.1007/978-3-030-19756-8_46.

5. Natashova, K. V., S. S. Sokolov, O. N. Gubernatorov, A. P. Nyrkov, and A. V. Kirikov. "On the issue of categorization of objects of critical information infrastructure of seaports." *IT Security (Russia)* 27.2 (2020): 35–46. DOI: 10.26583/bit.2020.1.03.

6. Alcaide, Juan Ignacio, and Ruth Garcia Llave. "Critical infrastructures cybersecurity and the maritime sector." *Transportation Research Procedia* 45 (2020): 547–554. DOI: 10.1016/j.trpro.2020.03.058.

7. Androjna, Andrej, Tanja Brcko, Ivica Pavic, and Harm Greidanus. "Assessing Cyber Challenges of Maritime Navigation." *Journal of Marine Science and Engineering* 8.10 (2020): 776. DOI: 10.3390/jmse8100776.

8. Attacks on industrial sector hit record in second quarter of 2023. Web. 20 Nov. 2023 <https://www.kaspersky.com/about/press-releases/2023_attacks-on-industrial-sector-hit-record-in-second-quarter-of-2023>.

9. Sutton, R.S., and A. G. Barto. *Reinforcement Learning: An Introduction*. Second edition. Cambridge: MIT Press, 2020.

10. Vorontsov, N. AlphaGo defeated humanity in Go. Web. 30 Nov. 2023 <<https://nplus1.ru/news/2017/05/25/now-it-is-official>>.

11. Vorontsov, N. The exact number of allowed combinations in Go turned out to be greater than the number of atoms in the Universe. Web. 22 Nov. 2023 <<https://nplus1.ru/news/2016/01/25/mathematical>>.

12. ATT&CK Matrix for Enterprise. Web. 22 Nov. 2023 <<https://attack.mitre.org>>.

13. Nyrkov, A.P., A. Yu. Kuznetsov, E. V. Zurov, and A. V. Bashmakov. *Diskretnaya matematika: kodirovanie i obrabotka diskretnykh struktur dannykh*. SPb.: GUMRF im. adm. S. O. Makarova, 2022.

14. Zhilenkov, Anton A., S. G. Chernyi, S. S. Sokolov, and A. P. Nyrkov. "Intelligent autonomous navigation system for UAV in randomly changing environmental conditions." *Journal of Intelligent & Fuzzy Systems* 38.5 (2020): 6619–6625. DOI: 10.3233/JIFS-179741.

15. Sokolov, Sergei, Anton Zhilenkov, Sergei Chernyi, Anatoliy Nyrkov, and Nikolay Glebov. "Hybrid neural networks in cyber physical system interface control systems." *Bulletin of Electrical Engineering and Informatics* 9.3 (2020): 1268–1275. DOI: 10.11591/eei.v9i3.1293.

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

Нырко́в Анато́лий Па́влович —

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

INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Nyrkov, Anatoliy P. —

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: kaf.koib@gmail.com,
nyrkowap@gumrf.ru

Юмашева Елена Сергеевна — аспирант

Научный руководитель:

Нырков Анатолий Павлович

ФГБОУ ВО «ГУМРФ имени адмирала

С. О. Макарова»

198035, Российская Федерация, Санкт-Петербург,

ул. Двинская, 5/7

e-mail: yumasheva.lena@list.ru, kaf_koib@gumrf.ru

Кириков Антон Викторович — аспирант

Научный руководитель:

Нырков Анатолий Павлович

ФГБОУ ВО «ГУМРФ имени адмирала

С. О. Макарова»

198035, Российская Федерация, Санкт-Петербург,

ул. Двинская, 5/7

e-mail: tony-68@yandex.ru, kaf_koib@gumrf.ru

Yumasheva, Elena S. — Postgraduate

Supervisor:

Nyrkov, Anatoliy P.

Admiral Makarov State University of Maritime

and Inland Shipping

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

Russian Federation

e-mail: yumasheva.lena@list.ru, kaf_koib@gumrf.ru

Kirikov, Anton V. — Postgraduate

Supervisor:

Nyrkov, Anatoliy P.

Admiral Makarov State University of Maritime

and Inland Shipping

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

Russian Federation

e-mail: tony-68@yandex.ru, kaf_koib@gumrf.ru

Статья поступила в редакцию 24 мая 2024 г.

Received: May 24, 2024.

DOI: 10.21821/2309-5180-2024-16-3-467-477

RESEARCH OF MODELS AND METHODS FOR PRACTICAL IMPLEMENTATION OF UNMANNED TRANSPORT SYSTEMS FOR MARINE PASSENGER TERMINALS

A. S. Kostin, N. N. Maiorov, D. V. Kuchko

Saint Petersburg State University of Aerospace Instrumentation,
St. Petersburg, Russian Federation

Two scenarios for the use of unmanned systems for marine passenger terminals that are identification of passengers at the terminal and tracking of moving objects are considered. The experimental study and the developed automation routines for identifying passengers were carried out on the basis of the laboratory of unmanned aircraft systems of Saint-Petersburg State University of Aerospace Instrumentation. For passenger terminal models, flight tasks of unmanned systems are simulated in the specialized Gazebo environment. Based on a series of experiments, it is found that the chosen method of histogram of oriented gradients provides a high level of accuracy and reliability. It is noted that the Matthews correlation coefficient, which reaches 95.09%, indicates a high degree of consistency and quality of binary classification of machine learning methods. During testing, the oriented gradient histogram method has showed that those with lower results in accuracy have received high results in sensitivity (reminder), which is 97.53%. This indicates that the use of this method can effectively minimize the number of false negative results, which is especially important in tasks where missing and losing an object during its identification can have serious consequences. As a result of the research carried out, the effectiveness of using the presented method is proven. The effectiveness of the developed new subprograms for passengers and other specified objects automatic identification, as well as the identification and tracking of objects for the first time when they are considered in the systems of marine passenger terminals, is also proven. It facilitates management and contributes to increased safety levels and monitoring effectiveness.

Keywords: unmanned transportation system, object identification, machine vision, histogram of directional gradients, marine passenger terminals, identification automation, intelligent transportation systems, passenger flow.

For citation:

Kostin, Anton S., Nikolai N. Maiorov, and Dmitry V. Kuchko. "Research of models and methods for practical implementation of unmanned transport systems for marine passenger terminals." *Vestnik Gosudarstvennogo universiteta morskogo i rechnogo flota imeni admirala S. O. Makarova* 16.3 (2024): 467–477. DOI: 10.21821/2309-5180-2024-16-3-467-477.

УДК 656.072

ИССЛЕДОВАНИЕ МОДЕЛЕЙ И МЕТОДОВ ПРАКТИЧЕСКОЙ РЕАЛИЗАЦИИ БЕСПИЛОТНЫХ ТРАНСПОРТНЫХ СИСТЕМ ДЛЯ МОРСКИХ ПАССАЖИРСКИХ ТЕРМИНАЛОВ

А. С. Костин, Н. Н. Майоров, Д. В. Кучко

ФГАОУ ВО «Санкт-Петербургский государственный университет аэрокосмического приборостроения», Санкт-Петербург, Российская Федерация

Рассмотрено два сценария использования беспилотных транспортных систем для морских пассажирских терминалов: идентификация пассажиров в терминале и отслеживание движущихся объектов. Экспериментальное исследование сценариев и разработанных подпрограмм автоматизации по идентификации пассажиров выполнено на базе лаборатории беспилотных авиационных систем Санкт-Петербургского государственного университета аэрокосмического приборостроения. Для модели пассажирского терминала в специализированной среде Gazebo выполнено моделирование полетных заданий беспилотных систем. На основе серии экспериментов установлено, что выбранный метод Histogram of Oriented Gradients демонстрирует высокий уровень точности и надежности. Отмечается, что коэффициент корреляции Мэтьюса, достигший 95,09 %, свидетельствует о высокой степени согласованности и качества бинарной классификации методов

машинного обучения. При проведении испытаний метод *Histogram of Oriented Gradients* показал, что наряду с более низкими результатами точности получены высокие результаты чувствительности (*Recall*), составляющие 97,53 %. Это свидетельствует о том, что применение данного метода позволяет эффективно минимизировать количество ложноотрицательных результатов, что является особенно важным в задачах, где пропуск и потеря объекта при его идентификации могут иметь серьезные последствия. Разработанное автоматизированное решение должно иметь возможность применения для динамического мониторинга за перемещением пассажиров в терминале в режиме реального времени, а также позволять выполнять обработку потока данных с беспилотных систем в центре управления терминалом. Рассмотренная модель НОГ для обработки изображений от беспилотных систем предназначена для распознавания объектов пассажиров в терминалах с использованием библиотеки *OpenCV*. В результате выполненного исследования наряду с эффективностью использования рассматриваемого метода доказана эффективность разработанных новых подпрограмм автоматической идентификации пассажиров и других заданных объектов, а также идентификации и отслеживания объектов в реальном времени при их интеграции в информационные системы морских пассажирских терминалов, способствующей повышению уровня безопасности и эффективности мониторинга.

Ключевые слова: беспилотная транспортная система, идентификация объектов, машинное зрение, гистограмма направленных градиентов, морские пассажирские терминалы, автоматизация идентификации, интеллектуальные транспортные системы, пассажиропоток.

Для цитирования:

Костин А. С. Исследование моделей и методов практической реализации беспилотных транспортных систем для морских пассажирских терминалов / А. С. Костин, Н. Н. Майоров, Д. В. Кучко // Вестник Государственного университета морского и речного флота имени адмирала С. О. Макарова. — 2024. — Т. 16. — № 3. — С. 467–477. DOI: 10.21821/2309-5180-2024-16-3-467-477.

Введение (Introduction)

Современные задачи использования беспилотных транспортных систем являются одним из важнейших аспектов современной технологической эволюции. Внедрение беспилотных транспортных систем позволяет получать динамические данные о состоянии транспортной системы, данные по изменениям, требующие для последующего анализа разработку моделей методов и алгоритмов анализа данных, идентификации объектов в потоке. Мониторинг и анализ данной области имеют важное значение, поскольку позволяют решать различные задачи, обеспечивая эффективное использование дронов для транспортных систем, в том числе морских. Среди ключевых задач данного исследования можно выделить следующие:

1. Мониторинг и анализ эффективности и безопасности использования беспилотных систем в гражданских целях для получения динамических данных.
2. Исследование структуры и интенсивности применения беспилотных систем в различных сферах, включая геодезию, сельское хозяйство, экологический мониторинг и др.
3. Определение временных пиков и спадов в применении беспилотных систем для эффективного управления ресурсами и инфраструктурой транспортных терминалов.

Тема исследования и моделирования с использованием дронов является особенно актуальной с учетом быстрого развития технологий и повышения интереса к автономным беспилотным системам [1], что во многом обусловлено потребностью в совершенствовании гражданских сфер, внедрением интеллектуальных транспортных систем, а также стремлением к улучшению качества и безопасности различных функций транспортных терминалов.

Методы и материалы (Methods and Materials)

На рис. 1 представлен результат выполненного наукометрического исследования, который отражает распределение публикаций и выполняемых научных исследований по сферам применения беспилотных транспортных систем, в том числе применительно к процессам для морских терминалов.

В ходе исследования публикационной активности по теме «Беспилотные авиационные системы», представленной в 2023 г. базой данных SCOPUS, были выявлены основные наукометрические показатели, а также проведены аналитические исследования по количеству публикаций

и авторов, выделены основные ключевые слова, по которым впоследствии можно осуществлять поиск научных работ. На основе выполненного анализа можно сделать вывод о том, что задачи машинной обработки данных, идентификации объектов, в том числе людей, а также реализация моделей отслеживания объектов занимают значительный объем мировых исследований.

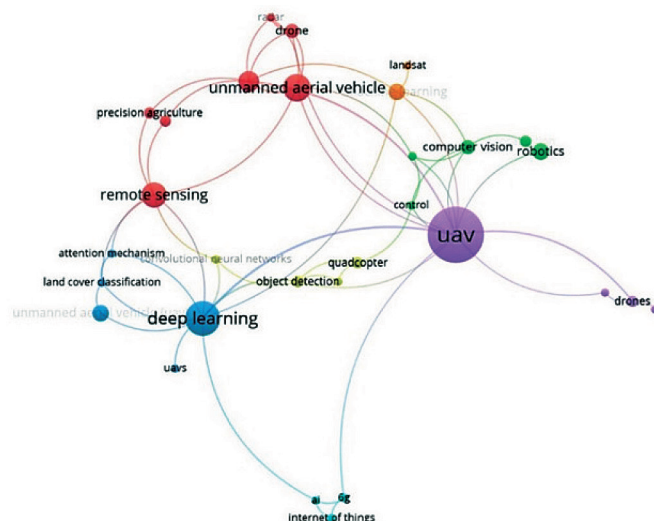


Рис. 1. Связь ключевого слова *unmanned aerial vehicles* с машинным обучением, идентификацией объектов, распознаванием изображений и обработкой данных
Fig. 1. The connection of the keyword “unmanned aerial vehicles” with machine learning, object identification, image recognition and data processing

Востребованность решения задачи автоматической идентификации пассажиров для морских пассажирских терминалов определяется необходимостью повышения безопасности, а также повышения качества анализа, прогнозирования и управления пассажирскими потоками. В публикациях [3], [4] рассмотрена разработанная цифровая модель морского пассажирского порта и представлено практическое решение задачи прогнозирования пассажиропотоков внутри терминала и оценки загруженности служб аэропорта. Разработанный инструментальный позволяет выполнить многосценарное моделирование перемещения пассажиров и решить задачу прогнозирования, а также сформировать данные для принятия решений при неопределенности [5]. Вместе с тем для повышения точности моделирования в цифровой двойник морского пассажирского порта необходимо внедрить модули обработки данных, полученных с беспилотных систем, с возможностью выполнения отслеживания перемещения пассажиров и построения их траектории.

Сценарий идентификации людей представляет собой задачу беспилотных авиационных систем, заключающуюся в подсчете количества посетителей определенного мероприятия. Этот сценарий реализован при помощи использования дополнительного навесного оборудования (камеры и платы управления с передачей видеопотока на сервер) [6], [7]. Данные для анализа берутся с беспилотных авиационных систем — квадрокоптеров. При выполнении модельных сценариев рассматриваются задачи как очного, так и автономного пилотирования в терминале. При помощи беспилотных авиационных систем производится облет по выбранному маршруту [8], [9] зоны проведения мероприятия, и с помощью дополнительных камер видеопоток отправляется на компьютер-сервер, где в дальнейшем происходит его обработка при помощи программного кода. Идентификация искомых объектов осуществляется на базе гистограммы направленных градиентов.

Гистограмма направленных градиентов (Histogram of Oriented Gradients (далее — HOG)) — это дескрипторы особых точек, используемых в компьютерном зрении и обработке изображений с целью распознавания объектов. В основе данного признака подсчет количества направлений градиента в локальных областях изображения [9].

Основой метода HOG является допущение, что внешний вид и форма объекта на изображении могут быть описаны распределением градиентов. Значения градиентов рассчитываются в горизонтальном и / или вертикальном направлении с помощью одномерной дифференцирующей маски. Данный метод требует фильтрации цветовой или яркостной составляющей при помощи следующих фильтрующих ядер: $[-1, 0, 1]$ и $[1, 0, -1]$ *T*. Для того чтобы вычислить HOG-дескриптор, ориентация и величина каждого пикселя в изображении рассчитываются по следующим формулам:

$$g_x = f(x+1, y) - f(x-1, y);$$

$$g_y = f(x, y+1) - f(x, y-1);$$

$$m(x, y) = \sqrt{g_x^2 + g_y^2};$$

$$\theta(x, y) = \tan^{-1} \left(\frac{g_y}{g_x} \right),$$

где $f(x, y)$ — значение яркости пикселя с координатами (x, y) ;

$\theta(x, y)$ — ориентация;

$m(x, y)$ — величина градиента пикселя (x, y) .

Каждый элементарный вычислитель перестраиваемой вычислительной среды отвечает за обработку соответствующего одного пикселя исходного изображения и передачу необходимой информации. При этом элементарный вычислитель способен выполнять выделенный ряд операций над пикселем изображения путем программной перестройки. В ходе выполнения алгоритма *HOG* используется в качестве детектора объектов, который может быть обучен с помощью множества изображений для распознавания определенных объектов.

В разработанном модуле программа *HOG* используется для детектирования пассажиров. Модуль обрабатывает каждый кадр видеопотока, ищет области изображения, соответствующие ожидаемым параметрам людей, и в случае, если такие области установлены, их координаты добавляются в список «траектории» для каждого обнаруженного человека. Далее для каждого из них создается список его координат на каждом кадре, что отображается в виде траектории движения. Если человек исчезает из видеопотока на определенное время, то его идентификатор удаляется из списка обнаруженных людей после дополнительной проверки. В ходе отображения видеопотока программа отображает каждого найденного человека, а также рисует его траекторию движения и выполняет подсчет увиденных людей. Результаты работы программы приведены на рис. 2.



Рис. 2. Результаты работы подпрограммы по автоматической идентификации пассажиров в терминале
Fig. 2. Results of the subroutine for automatic identification of passengers in the terminal

Представленные на рис. 2 результаты показали, что программа работает корректно и обнаружение слежения за людьми происходит в режиме реального времени. Во время проведения эксперимента камера, расположенная на высоте 7 м под углом в 40 град., создает хороший обзор. Данные параметры размещения камеры служат для обеспечения в первую очередь безопасности для людей и окружающих объектов, а также для наилучшего угла обзора, что способствует более точному и более массовому определению людей, присутствующих на мероприятии.

Результаты исследования (Results of the Research)

Рассмотрим один из сценариев применения беспилотной системы и метода идентификации объектов. Сценарий отслеживания объекта (сценарий 2) так же, как и сценарий идентификации людей, использует идентичную полезную нагрузку и программный код. Изображение, полученное помощью беспилотных систем, отправляется в серверную часть, где обрабатывается. Затем сервер передает команду беспилотной системе следовать за объектом, удерживая его в центре изображения.

Лабораторные испытания предлагаемого метода и разработанных подпрограмм автоматизации с учетом применения беспилотной системы проводились в летном исследовательском поле лаборатории беспилотных авиационных систем ФГАОУ ВО ГУАП. Обработка данных с использованием лаборатории интеллектуальной транспортной инфраструктуры выполнялась там же. Маршрутизация квадрокоптера осуществлялась с помощью карты ArUco-меток ввиду невозможности использования GPS-сигнала в помещении (рис. 3) [10]–[12].

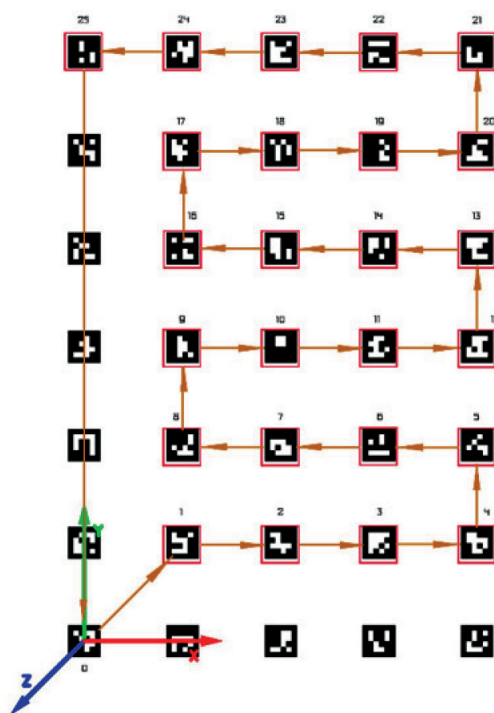


Рис. 3. Схема автономного полета беспилотной системы для моделирования идентификации пассажира
Fig. 3. The diagram of autonomous flight of the unmanned system for simulating passenger identification

В ходе лабораторного испытания беспилотной системой был произведен взлет и начало движения по координатам ArUco-маркеров [13], [14]:
navigate(z=1.5, frame_id='body', auto_arm=True)
rospy.sleep(5)

Следующим этапом является облет территории по координатам:

```
path = [1,2,3,4,5,6,7,8,9,10,11,12,13,14,15,16,17,18,19,20,21,22,23,24, 25]
```

```
path = [1,2,3,4,5,6,7,8,9,10,11,12,13,14,15,16,17,18,19,20,21,22,23,24, 25]
```

```
for n in path:
```

```
    last_saved_time = True
```

```
    print()
```

```
    print('flight to', n, coords[n])
```

```
    navigate_wait(x=coords[n][0], y=coords[n][1], frame_id='aruco_map', yaw=math.radians(90))
```

```
    image_sub = rospy.Subscriber('main_camera/image_raw', Image, photo_save, queue_size=1)
```

```
    print('made a pic')
```

После этого по завершении полета беспилотник возвратился на исходную точку и совершил посадку:

```
def navigate_wait(x=0, y=0, z=2, yaw=float('nan'), speed=0.5, frame_id='aruco_map', au-to_
arm=False, tolerance=0.2):
```

```
    navigate(x=x, y=y, z=z, yaw=yaw, speed=speed, frame_id=frame_id, auto_arm=auto_arm)
```

```
    while not rospy.is_shutdown():
```

```
        telem = get_telemetry(frame_id='navigate_target')
```

```
        if math.sqrt(telem.x ** 2 + telem.y ** 2 + telem.z ** 2) < tolerance:
```

```
            break
```

```
    rospy.sleep(0.2)
```

Для решения задачи идентификации объектов был разработан программный код, который в режиме реального времени выводит количество обнаруженных людей и строит их маршрут перемещения. На рис. 4 представлен результат идентификации людей в исследовательском летном поле лаборатории беспилотных авиационных систем с борта беспилотной системы.

а)



б)



Рис. 4. Результат работы программы по выполнению
модельного сценария обнаружения пассажира:

- а — идентификации пассажира с борта автономной беспилотной системы;
- б — процесс выполнения автономного полета беспилотной системы

Fig. 4. The result of the program for executing
a model passenger detection scenario:

- a — passenger identification from the autonomous unmanned system;
- b — process of performing autonomous flight of the unmanned system

Фрагмент программного кода для идентификации пассажира:

```
hog = cv2.HOGDescriptor()
hog.setSVMDetector(cv2.HOGDescriptor_getDefaultPeopleDetector())
cap = cv2.VideoCapture(VIDEO_SOURCE)
cv2.namedWindow(WINDOW_NAME)
# Initialize variables
person_counter = 0
detected_people = []
prev_gray = None
previous_signal = False
free_ids = []
person_numbers = []
def centr(coord, side):
    return (coord + side // 2)
```

В данном решении реализована программа для обнаружения и отслеживания людей, использующая объектно-ориентированный подход и базирующаяся на основе библиотеки OpenCV. Начало идентификации объектов и людей начинается с инициализации видеопотока и настройки окна для отображения результатов. Затем инициализируются переменные, такие как список обнаруженных людей, их идентификаторы и другие параметры. Основная часть программы состоит из цикла, выполняемого до тех пор, пока работает видеокamera. В этом цикле происходит чтение кадра из видеопотока. Если кадр успешно прочитан, то он обрабатывается для обнаружения людей с использованием в этих целях детектора на основе HOG (Histogram of Oriented Gradients). При этом программа работает корректно, поиск объекта происходит в режиме реального времени, объект определяется относительно центра камеры в пределах погрешности, как и расстояние до него. Расстояние определяется путем преобразования известных размеров объекта и фокусного расстояния камеры. Данный способ является достаточно удобным, так как не требует дополнительного оборудования и является достаточно точным для выполнения данной задачи. При необходимости увеличения точности можно установить на беспилотную систему дополнительное оборудование, такое как дальномер и тепловизионные датчики, что позволит повысить точность обнаружения и идентификации людей и объектов. Предложенные улучшения требуют больших материальных и человеческих затрат, что можно реализовать в процессе в дальнейших исследований.

Обсуждение (Discussion)

Среди методов идентификации объектов авторами выбрана реализация на базе Histogram of Oriented Gradients для обработки изображений, полученных с беспилотной системы. Установлено, что метод HOG демонстрирует высокий уровень точности и надежности. Примечательно, что показатель MCC (коэффициент корреляции Мэтьюса), достигший 95,09 %, свидетельствует о высокой степени согласованности и качества бинарной классификации. При этом в реальных условиях метод показал несколько более низкие результаты по точности, но высокие результаты чувствительности (Recall) в 97,53 %. Данное обстоятельство свидетельствует о том, что метод HOG эффективно минимизирует количество ложноотрицательных результатов, а это критически важно в задачах, где пропуск объекта может иметь серьезные последствия. Приведенные результаты подтверждают возможность практического использования метода на основе HOG для обработки изображений с беспилотных систем.

В целом данные испытаний показывают, что метод на основе HOG является эффективным инструментом для обработки изображений, получаемых в различных условиях, обеспечивая высокую точность и надежность результатов.

Интеграция разработанных подпрограмм автоматизации идентификации с цифровыми моделями морского пассажирского порта позволит на качественно новом уровне решать задачу прогнозирования, управления и мониторинга за пассажиропотоком в терминале. Использование разработанных подпрограмм автоматизации по отслеживанию перемещения пассажира позволяет также собрать данные по оценке эффективности организации внутритерминального пространства, служб и подразделений.

Результаты (Results)

Идентификация объектов с помощью беспилотных систем позволяет на качественно новом уровне исследовать транспортные процессы, повышать точность систем принятия решения по управлению терминалом. Использование беспилотных авиационных систем для реализации летных заданий по идентификации объектов и пассажиров является одним из эффективных подходов к решению различных задач, связанных с безопасностью, мониторингом и контролем. Для выполнения исследования был выбран метод HOG и произведено моделирование двух сценариев (идентификация людей и отслеживание движущихся объектов). Исследование проводилось в закрытом летном поле, однако разработанные подпрограммы применимы для обработки потоков данных для реальных пассажирских терминалов, в том числе и для морских.

Оценка результатов работы беспилотных систем для моделирования идентификации пассажиров в терминале и обработки данных показала их высокую эффективность и точность выполнения поставленных задач. Подпрограммы автоматизации обеспечивают обнаружение, идентификацию и отслеживание объектов в реальном времени, что способствует повышению уровня безопасности и эффективности мониторинга.

Таким образом, использование БАС в летном поле является перспективным направлением для решения различных задач и обеспечения безопасности и контроля на мероприятиях. Дальнейшее развитие и совершенствование подобных систем позволит расширить их функциональные возможности и применение в различных областях.

Выводы (Summary)

На основе проведенного исследования моделей и методов маршрутизации беспилотных транспортных систем можно сделать следующие выводы:

1. В ходе исследования был проведен анализ сценариев применения беспилотных систем в различных областях, представлены результаты наукометрического анализа, подтверждающие необходимость решения задачи идентификации объектов, пассажиров и отслеживание движущихся объектов в транспортных пассажирских терминалах, в том числе морских.
2. В ходе исследования было выявлено, что беспилотные системы представляют собой эффективный инструмент для решения различных задач в области безопасности, мониторинга и контроля. Автоматизированные программные решения, основанные на компьютерном зрении и использовании навесного оборудования, продемонстрировали способность обнаруживать, идентифицировать и отслеживать объекты в реальном времени.
3. Модельные сценарии идентификации пассажиров в специализированном летном исследовательском поле моделирование в программной среде Gazebo показали эффективность разработанных подпрограмм и работу алгоритма на базе HOG.
4. Для имитации внутреннего пространства терминала был сформирован тестовый полигон с размещением опорных точек — Агисо-маркеров, между которыми беспилотная транспортная система перемещается и идентифицирует пассажиров. Для решения данной задачи был реализован программный код автономного перемещения с включением разработанных подпрограмм идентификации. Исходя из полученных результатов полетных заданий обеспечена точность идентификации объектов и реализация слежения за траекторией изменения выбранного объекта. Тестирование на группе людей также показало эффективность.

5. На основе реальных летных испытаний были получены результаты чувствительности (Recall) на уровне 97,53 %, что свидетельствует о том, что метод НОГ эффективно минимизирует количество ложноотрицательных результатов, что является критически важным в задачах, где пропуск объекта может иметь серьезные последствия.

6. Дальнейшее развитие и совершенствование таких систем позволит расширить их функциональные возможности и применение в различных сценариях использования для транспортных терминалов, в том числе морских пассажирских терминалов, что делает представленные разработки перспективными для дальнейших исследований и интеграции в существующие информационные системы.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Kostin A. S.* Models and methods for implementing the autoumous performance of transportation tasks using a drone / A. S. Kostin // 2021 Wave Electronics and its Application in Information and Telecommunication Systems (WECONF). — IEEE, 2021. — Pp. 1–4. DOI: 10.1109/WECONF51603.2021.9470584.

2. *Robakowska M.* Possibilities of using UAVs in pre-hospital security for medical emergencies / M. Robakowska, D. Ślęzak, P., Żuratyński, A. Tyrańska-Fobke, P. Robakowski, P. Prędkiewicz, K. Zorena // International Journal of Environmental Research and Public Health. — 2022. — Vol. 19. — Is. 17. — Pp. 10754. DOI: 10.3390/ijerph191710754.

3. *Krile S.* Modernization of the Infrastructure of Marine Passenger Port Based on Synthesis of the Structure and Forecasting Development / S. Krile, N. Maiorov, V. Fetisov // Sustainability. — 2021. — Vol. 13. — Is. 7. — Pp. 3869. DOI: 10.3390/su13073869.

4. *Krile S.* The influence of external environment to the ferry lines and marine passenger terminals / S. Krile, N. Maiorov // Transport Problems. — 2020. — Vol. 15. — Pp. 203–214. DOI: 10.21307/TP-2020-060.

5. *Бродецкий Г. Л.* Системный анализ в логистике. Выбор в условиях неопределенности / Г. Л. Бродецкий. — М.: Academia, 2010. — 336 с.

6. *Костин А. С.* Эксплуатация беспилотных авиационных систем / А. С. Костин, Н. Н. Майоров, Т. Ю. Карпова. — СПб.: ГУАП, 2021. — 169 с.

7. *Engel J.* Accurate Figure Flying with a Quadcopter Using Onboard Visual and Inertial Sensing / J. Engel, J. Sturm, D. Cremers // Proc. of the Workshop on Visual Control of Mobile Robots (ViCoMoR) at the IEEE/ RJS Intern. Conference on Intelligent Robot Systems (IROS). Vilamoura, Algarve, Portugal. — 2012. — Pp. 43–48.

8. *Kim J.* Accurate modeling and robust hovering control for a quad-rotor VTOL aircraft / J. Kim, M. S. Kang, S. Park // Selected papers from the 2nd International Symposium on UAVs, Reno, Nevada, USA June 8–10, 2009. — Springer Netherlands, 2010. — Pp. 9–26. DOI: 10.1007/978-90-481-8764-5_2.

9. *Outay F.* Applications of unmanned aerial vehicle (UAV) in road safety, traffic and highway infrastructure management: Recent advances and challenges / F. Outay, H. A. Mengash, M. Adnan // Transportation research part A: policy and practice. — 2020. — Vol. 141. — Pp. 116–129. DOI: 10.1016/j.tra.2020.09.018.

10. *Костин А. С.* Разработка автоматизированных решений для исследования вариантов маршрутов доставки при совместном использовании транспортного средства и беспилотной авиационной системы в границах города / А. С. Костин, Н. Н. Майоров // Известия Тульского государственного университета. Технические науки. — 2022. — № 7. — С. 348–356. DOI: 10.24412/2071-6168-2022-7-348-357.

11. *Костин А. С.* Программа автономного полета беспилотной авиационной системы для реализации многоадресной доставки грузов / А. С. Костин, Н. Н. Майоров, Е. А. Вознесенский // Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2022615305 от 31.03.2022.

12. *Drexl M.* Synchronization in vehicle routing — a survey of VRPs with multiple synchronization constraints / M. Drexl // Transportation Science. — 2012. — Vol. 46. — Is. 3. — Pp. 297–316. DOI: 10.1287/trsc.1110.0400.

13. *Костин А. С.* Определение полетных заданий беспилотных авиационных систем применительно к операционным логистическим задачам / А. С. Костин, Н. Н. Майоров // Логистика: современные тенденции развития. Материалы XX международной научно-практической конференции. — СПб.: ГУМРФ имени адмирала С. О. Макарова, 2021. — Т. 1. — С. 150–157.

14. Костин А. С. Информационно-измерительные системы для контроля выполнения траектории авиационной системы / А. С. Костин // Волновая электроника и инфокоммуникационные системы. Материалы XXIV Международной научной конференции. — СПб.: ГУАП, 2021. — Т. Часть 1. — С. 219–226.

REFERENCES

1. Kostin, A.S. “Models and methods for implementing the autonomous performance of transportation tasks using a drone.” *2021 Wave Electronics and its Application in Information and Telecommunication Systems (WECONF)*. IEEE, 2021. DOI: 10.1109/WECONF51603.2021.9470584.
2. Robakowska, Marlena, Daniel Ślęzak, Przemysław Żuratyński, Anna Tyrańska-Fobke, Piotr Robakowski, Paweł Prędkiewicz, and Katarzyna Zorena. “Possibilities of using UAVs in pre-hospital security for medical emergencies.” *International Journal of Environmental Research and Public Health* 19.17 (2022): 10754. DOI: 10.3390/ijerph191710754.
3. Krile, Srećko, Nikolai Maiorov, and Vladimir Fetisov. “Modernization of the infrastructure of marine passenger port based on synthesis of the structure and forecasting development.” *Sustainability* 13.7 (2021): 3869. DOI: 10.3390/su13073869.
4. Krile, Srećko, and Nikolai Maiorov. “The influence of external environment to the ferry lines and marine passenger terminals.” *Transport Problems* 15 (2020): 203–214. DOI: 10.21307/TP-2020-060.
5. Brodetskii, G. L. *Sistemnyi analiz v logistike. Vybór v usloviyakh neopredelennosti*. M.: Academia, 2010.
6. Kostin, A.S., N. N. Maiorov, and T. Yu. Karpova. *Ekspluatatsiya bespilotnykh aviatsionnykh sistem*. SPb.: GUAP, 2021.
7. Engel, Jakob, Jurgén Sturm, and Daniel Cremers. “Accurate Figure Flying with a Quadcopter Using Onboard Visual and Inertial Sensing.” *Proc. of the Workshop on Visual Control of Mobile Robots (ViCoMoR) at the IEEE/ RJS Intern. Conference on Intelligent Robot Systems (IROS)*. 2012. 43–48.
8. Kim, Jinhyun, Min-Sung Kang, and Sangdeok Park. “Accurate modeling and robust hovering control for a quad-rotor VTOL aircraft.” *Selected papers from the 2nd International Symposium on UAVs, Reno, Nevada, USA June 8–10, 2009*. Springer Netherlands, 2010. DOI: 10.1007/978-90-481-8764-5_2.
9. Outay, Fatma, Hanan Abdullah Mengash, and Muhammad Adnan. “Applications of unmanned aerial vehicle (UAV) in road safety, traffic and highway infrastructure management: Recent advances and challenges.” *Transportation research part A: policy and practice* 141 (2020): 116–129. DOI: 10.1016/j.tra.2020.09.018.
10. Kostin, Anton Sergeevich, and Nikolai Nikolaevich Maiorov. “Development of automated solutions for the research of delivery route options in the joint use of a vehicle and an unmanned aerial system within the boundaries of the city.” *Izvestiya Tula State University* 7 (2022): 348–356. DOI: 10.24412/2071-6168-2022-7-348-357.
11. Kostin, A.S., N. N. Maiorov, and E. A. Voznesenskii. Computer program certificate № 2022615305. Programma avtonomnogo poleta bespilotnoi aviatsionnoi sistemy dlya realizatsii mnogoadresnoi dostavki gruzov. Russian Federation, assignee. Publ. 31 March 2022.
12. Drexler, Michael. “Synchronization in vehicle routing — a survey of VRPs with multiple synchronization constraints.” *Transportation Science* 46.3 (2012): 297–316. DOI: 10.1287/trsc.1110.0400.
13. Kostin, A.S., and N. N. Maiorov. “Determination of flight tasks of unmanned aircraft systems as applied to operational logistic tasks.” *Logistika: sovremennye tendentsii razvitiya. Materialy XX mezhdunarodnoi nauchno-prakticheskoi konferentsii*. Vol.1. SPb.: GUMRF imeni admirala S. O. Makarova, 2021. 150–157.
14. Kostin, A.S. “Information-measuring systems for monitoring the aircraft trajectory.” *Volnovaya elektronika i infokommunikatsionnye sistemy. Materialy XXIV Mezhdunarodnoi nauchnoi konferentsii*. Vol. 1. SPb.: GUAP, 2021. 219–226.

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

Костин Антон Сергеевич — аспирант, ассистент
Научный руководитель:
Майоров Николай Николаевич
ФГАОУ ВО «Санкт-Петербургский
государственный университет аэрокосмического
приборостроения»
190000, Российская Федерация, Санкт-Петербург,
ул. Большая Морская, 67, лит. А
e-mail: anton13258@mail.ru

INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Kostin, Anton S. — Postgraduate, assistant
Supervisor:
Maiorov, Nikolai N.
Saint-Petersburg State University
of Aerospace Instrumentation
67/A Bol'shaya Morskaya Str.,
St. Petersburg, 190000,
Russian Federation
email: anton13258@mail.ru

Майоров Николай Николаевич —

доктор технических наук, доцент
ФГАОУ ВО «Санкт-Петербургский
государственный университет аэрокосмического
приборостроения»

190000, Российская Федерация, Санкт-Петербург,
ул. Большая Морская, 67, лит. А
e-mail: nmsoft@yandex.ru

Кучко Дмитрий Витальевич — аспирант

Научный руководитель:

Майоров Николай Николаевич
ФГАОУ ВО «Санкт-Петербургский
государственный университет аэрокосмического
приборостроения»
190000, Российская Федерация, Санкт-Петербург,
ул. Большая Морская, 67, лит. А
e-mail: sciencesuai@yandex.ru

Maiorov, Nikolai N. —

Dr. of Technical Sciences, associate professor
Saint-Petersburg State University
of Aerospace Instrumentation
67/A Bol'shaya Morskaya Str.,
St. Petersburg, 190000,
Russian Federation
e-mail: nmsoft@yandex.ru

Kuchko, Dmitry V. — Postgraduate
Supervisor:

Maiorov, Nikolai N.
Saint-Petersburg State University
of Aerospace Instrumentation
67/A Bol'shaya Morskaya Str.,
St. Petersburg, 190000,
Russian Federation
e-mail: sciencesuai@yandex.ru

Статья поступила в редакцию 24 мая 2024 г.

Received: May 24, 2024.

Научное периодическое издание

**Вестник Государственного университета морского
и речного флота имени адмирала С. О. Макарова**

Том 16. № 3

2024 год

Выпускающий редактор *Н. А. Карамзина*
Дизайн и верстка *М. Н. Евсюткина*

Подписано в печать с оригинал-макета 28.06.24. Формат 60×90/8
Гарнитура Times New Roman. Усл. печ. л. 18,75. Тираж 500 экз. Заказ № 328/24

Государственный университет морского и речного флота имени адмирала С. О. Макарова
198035, Санкт-Петербург, ул. Двинская, 5/7