

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 17. № 2

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

**САНКТ-ПЕТЕРБУРГ
2025**

Вестник Государственного университета морского и речного флота имени адмирала С. О. Макарова. — СПб. : ГУМРФ имени адмирала С. О. Макарова, 2025. — Т. 17. — № 2. — 146 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 163**

Смоленцев С. В., Исаков Д. В., Солодовниченко М. Б. Проблемы использования сообщений автоматической идентификационной системы в задаче прогнозирования траекторий движения судов 163

Онищенко И. С., Сергеев А. Е., Каретников В. В. Вопросы обеспечения безопасности эксплуатации судов класса «М-ПР» в северо-восточной части Черного моря 175

Зуб И. В., Касаткин Г. Д., Афанасьев А. К. Моделирование технологии погрузочно-разгрузочных работ скоропортящихся грузов в морском порту 185

Брыляков А. В. Анализ особенностей дистанционного управления морским автономным надводным судном в портовых водах с использованием конвенциональных навигационных технических средств 195

Изотов О. А., Полуботко Н. С. Обоснование возможности обработки контейнеризованных навалочных грузов на морском терминале 208

Козик С. В. Структурирование терминологического аппарата, используемого при анализе влияния человека на безопасность судоходства 216

Ююкин И. В. Сплайновая реконструкция эталона информативности в задачах корреляционно-экстремальной навигации 233

**СУДОВЫЕ ЭНЕРГЕТИЧЕСКИЕ УСТАНОВКИ И ИХ ЭЛЕМЕНТЫ
(ГЛАВНЫЕ И ВСПОМОГАТЕЛЬНЫЕ) 254**

Королёв В. И., Лебедев А. И. Возможность применения технологии скользящего давления пара при маневрировании ядерной энергетической установкой для снижения перерасхода ядерного топлива на атомных ледоколах 254

Мелешин М. А., Саламех А., Мамонтов В. А. Обоснование применения полимерных композиционных материалов для изготовления судовых масляных цистерн 271

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.....282**

Ястребов М. Ю., Ланева И. В., Рыданов А. А. Распределенно-лаговый
подход в математических моделях управления
транспортными рисками282

Чертков А. А., Каск Я. Н., Никифоров В. Г. Алгоритм параметрической
идентификации расходной характеристики судна с применением
нейросетевой технологии291

CONTENTS

OPERATION OF WATER TRANSPORT, WATERWAYS AND HYDROGRAPHY.....163

Smolentsev S. V., Isakov D. V., Solodovnichenko M. B. Problems
of using automatic identification system messages in the task
of forecasting vessel movement trajectories163

Onishchenko I. S., Sergeev A. E., Karetnikov V. V. Issues of ensuring
safe operation of M-PR class vessels in the north-eastern part
of the Black Sea175

Zub I. V., Kasatkin G. D., Afanasyev A. K. Modeling the technology
of loading and unloading of perishable goods in a seaport.....185

Bryliakov A. V. Analysis of the features of remote control
of a marine autonomous surface ship in port waters
using conventional navigation technical means.....195

Izotov O. A., Polubotko N. S. Justification of the possibility
of processing containerized bulk cargoes at a marine terminal208

Kozik S. V. Structuring the terminological apparatus used
in the analysis of the influence of human factors
on navigation safety216

Yuyukin I. V. Spline reconstruction of the informativeness template
in correlation-extreme navigation tasks233

SHIP POWER PLANTS AND THEIR ELEMENTS (MAIN AND AUXILIARY).....254

Korolev V. I., Lebedev A. I. Possibility of applying sliding steam
pressure technology in maneuvering nuclear power plants
to reduce nuclear fuel overconsumption on atomic icebreakers.....254

Meleshin M. A., Salamekh Ali, Mamontov V. A. Justification
for the use of polymer composite materials in the manufacture
of marine oil tanks271

Volume 17. № 2

2025

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	282
<i>Yastrebov M. Yu., Laneva I. V., Rydanov A. A.</i> “Risk management in software development in the field of information protection	282
<i>Chertkov A. A., Kask Ya. N., Nikiforov V. G.</i> Algorithm for parametric identification of fuel consumption characteristics of a vessel using neural network technology	291

ЭКСПЛУАТАЦИЯ ВОДНОГО ТРАНСПОРТА, ВОДНЫЕ ПУТИ СООБЩЕНИЯ И ГИДРОГРАФИЯ

DOI: 10.21821/2309-5180-2025-17-2-163-174

EDN AYBTLM

PROBLEMS OF USING AUTOMATIC IDENTIFICATION SYSTEM MESSAGES IN THE TASK OF FORECASTING VESSEL MOVEMENT TRAJECTORIES

S. V. Smolentsev, D. V. Isakov, M. B. Solodovnichenko

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

The article addresses the problem of forecasting vessel movement trajectories, which is integral to safe divergence systems for predicting and assessing navigation situations. For accurate navigation situation assessment, safe divergence systems must generate precise forecasts of target vessel trajectories. It is established that addressed and broadcast messages of the Automatic Identification System (AIS) with IDs 1, 2, 3, and 5 (dynamic and static information), as well as messages with IDs 6 and 8 (route information), can be utilized for this purpose. The format of route information messages, as per IMO Circular SN.1/Circ.289, is presented. The use of route information in forecasting target vessel trajectories enhances prediction accuracy and improves navigation situation assessment. However, certain challenges in using route information are identified, along with examples of incorrect operation in trajectory prediction systems. It is demonstrated that the route information currently transmitted in AIS messages is insufficient for accurate trajectory prediction. This limitation arises because the existing route information transmission system was not originally designed for trajectory prediction tasks. Consequently, the limited applicability of current AIS messages is highlighted, and the necessity of developing a dedicated route information transmission system via AIS channels to address trajectory prediction tasks is substantiated. Proposals for the content of AIS messages in such a system are formulated.

Keywords: vessel trajectory prediction, vessel route, Automatic Identification System, navigation situation assessment.

For citation:

Smolentsev, Sergey V., D. V. Isakov and M. B. Solodovnichenko "Problems of using automatic identification system messages in the task of forecasting vessel movement trajectories." *Vestnik Gosudarstvennogo universiteta morskogo i rechnogo flota imeni admirala S. O. Makarova* 17.2 (2025): 163–174. DOI: 10.21821/2309-5180-2025-17-2-163-174.

УДК 656.61.052

ПРОБЛЕМЫ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ СООБЩЕНИЙ АВТОМАТИЧЕСКОЙ ИДЕНТИФИКАЦИОННОЙ СИСТЕМЫ В ЗАДАЧЕ ПРОГНОЗИРОВАНИЯ ТРАЕКТОРИЙ ДВИЖЕНИЯ СУДОВ

С. В. Смоленцев, Д. В. Исаков, М. Б. Солодовниченко

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

В статье рассмотрена задача прогнозирования траекторий движения судов, решения которой используются в системах безопасного расхождения судов для прогноза и оценки навигационной ситуации. Отмечается, что для корректной оценки навигационной ситуации система безопасного расхождения должна строить корректные прогнозы траекторий движения судов-целей. Определено, что в задаче прогнозирования траекторий движения судов-целей могут быть использованы адресуемые и широковещательные сообщения автоматической идентификационной системы (АИС) с ID = 1, 2, 3 и ID = 5 (динамическая и статическая информация), а также сообщения с ID = 6, 8 (маршрутная информация). Приведен формат сообщений с маршрутной информацией согласно циркуляру ИМО SN.1/Circ.289. Отмечено, что использование маршрутной

информации в задаче прогноза траектории движения судна-цели позволяет более точно строить такие прогнозы и, соответственно, лучше оценивать навигационную ситуацию. Определены некоторые проблемы использования маршрутной информации и показаны примеры некорректной работы системы прогноза траектории движения цели. Показано, что маршрутная информация, передаваемая в существующих сообщениях АИС, является недостаточной для построения корректного прогноза траектории движения цели. Источником указанных проблем является тот факт, что существующие сообщения с маршрутной информацией изначально не предназначались для использования в задаче прогноза траекторий судов-целей. В результате рассмотренных проблем с использованием маршрутной информации показана ограниченная применимость существующих сообщений АИС и обоснована необходимость разработки системы передачи маршрутной информации по каналам АИС, ориентированной на решение с ее помощью задачи прогноза траекторий судов-целей. Сформулированы предложения по содержанию сообщений АИС в такой системе.

Ключевые слова: прогноз траектории судна, маршрут судна, Автоматическая идентификационная система, оценка навигационной ситуации.

Для цитирования:

Смоленцев С. В. Проблемы использования сообщений автоматической идентификационной системы в задаче прогнозирования траекторий движения судов / С. В. Смоленцев, Д. В. Исаков, М. Б. Соловниченко // Вестник Государственного университета морского и речного флота имени адмирала С. О. Макарова. — 2025. — Т. 17. — № 2. — С. 163–174. DOI: 10.21821/2309-5180-2025-17-2-163-174. — EDN AYBTLM.

Введение (Introduction)

В настоящее время наблюдается значительный рост интереса к созданию морских автономных надводных судов (МАНС). Во многих странах проводятся теоретические и экспериментальные исследования в данной области. Ключевым аспектом в области безэкипажного судоходства, как и традиционного, является обеспечение безопасности судовождения.

В соответствии с «Правилами управления автономными судами», утвержденными Приказом Минтранса России № 140 от 22.04.2024 г. каждое МАНС должно управляться системой автономного судовождения. Одной из задач, решаемых этой системой, является обеспечение безопасного расхождения с судами. Маневры МАНС для расхождения с другими судами должны соответствовать требованиям Международных правил предупреждения столкновения судов (МППСС-72). Решению этой проблемы посвящено множество работ. В частности, проблема безопасного расхождения судов на основе МППСС-72 рассматривалась в работах [1]–[4].

Составной частью системы автономного судовождения является система безопасного расхождения судов (СБРС). Разработке подобных систем в настоящее время уделяется большое внимание. СБРС должна решать следующие задачи:

- оценка навигационной ситуации;
- принятие решения по маневрированию для предотвращения опасного сближения в случае, если ситуация оценивается как *опасная*.

Для решения задачи оценки навигационной ситуации необходимо иметь возможность прогнозировать ее на заданный промежуток времени и, соответственно, уметь строить прогнозы траекторий движения судов-целей.

Траектория движения каждого конкретного судна может быть построена с использованием математических моделей динамики судна, например, предложенных в работах [5], [6], а также следующих данных:

- параметров модели динамики данного судна;
- информации о гидрометео и навигационных условиях;
- маршрута данного судна.

Параметры модели динамики каждого конкретного судна зависят от его типа и размерений, которые могут быть получены из базы данных моделей судов на основе информации, передаваемой непосредственно судами через автоматическую идентификационную систему (АИС). Кроме того, параметры модели для реального судна зависят от его текущего состояния: загрузки, степени обрастания корпуса, крена, дифферента и т. п. Информация о навигационных условиях, оказываю-

щих влияние на движение судна (в частности, глубин), может быть получена от ЭКДИС, информация о гидрометеоусловиях в акватории — от сети метеостанций, которые обычно располагаются на объектах береговых или плавучих СНО.

Одной из проблем при построении прогноза траектории движения судна-цели является получение маршрута этой цели. В работах [7]–[10] для построения маршрутов судов в акватории предлагается использовать ретроспективные данные о движении судов от системы АИС. Такой подход возможен в системах СУДС, которые могут на основе накопленных за длительный промежуток времени исторических данных АИС строить модель трафика в зоне своей ответственности. Однако такое решение не подходит для МАНС, которые могут находиться в различных акваториях, где необходимо учитывать текущую навигационную обстановку и суда, находящиеся в данный момент времени в районе плавания. В работе авторов [11] предложена методика оценки маршрутов судов на основе характеристик акватории и имеющихся предположений о движении судов в ней.

Целью данной статьи является исследование вопросов использования данных о маршрутах судов-целей, предоставляемых АИС для прогнозирования траекторий их движения. В частности, необходимо:

- рассмотреть сообщения системы АИС, которые могут быть использованы в задаче прогноза траектории движения судов-целей;
- определить проблемы использования маршрутной информации в существующих сообщениях АИС;
- сформулировать предложения по составу передаваемой маршрутной информации в сообщениях АИС.

Методы и материалы (Methods and Materials)

Одной из систем обеспечения безопасности судовождения в море является АИС. Каждое судно, оснащенное транспондером АИС, передает статическую информацию о себе и динамическую информацию о своем движении. Для этого используются сообщения ID = 5 и ID = 1, 2, 3 (судовая аппаратура класса А)¹.

В сообщениях ID = 5 передаются статические и рейсовые данные о судне:

- название, тип, позывной, MMSI и номер ИМО;
- размерения (точнее, расположение антенны ГНСС относительно носа, кормы и бортов судна);
- осадка;
- пункт назначения и ETA.

Сообщение данного типа передается каждые 6 мин или при изменении данных, или по запросу. В сообщениях ID = 1, 2, 3 передается отчет о местонахождении судна, включающий:

- навигационный статус;
- координаты;
- параметры движения: COG, SOG, HDG, ROT;
- индикатор маневра.

Сообщения ID = 1, 2 передаются с дискретностью 3 мин судном на якоре или у причала и с дискретностью 2–10 с движущимся судном в зависимости от его скорости и маневрирования. Сообщения ID = 3 передаются по запросу. Эта информация, особенно данные о координатах и параметрах движения судов-целей, является очень важной для оценки текущей навигационной ситуации. Однако ее недостаточно для корректного прогноза ее развития и, в частности, для построения прогнозов траекторий судов-целей.

В соответствии с Циркуляром ИМО SN.1/Circ.289² в перечень сообщений АИС добавлены сообщения, с помощью которых можно передавать маршрутную информацию. Для этого используются Application-Specific Messages: сообщения с ID = 6 (адресуемые) и ID = 8 (широковещательные).

¹ Рекомендация МСЭ-R М.1371–5 (02/2014).

² Guidance on the use of AIS application-specific messages / Циркуляр ИМО: SN.1/Circ.289.

Для сообщений с ID = 6 используются DAC = 001, FI = 28, для сообщений с ID = 8 — DAC = 001, FI = 27. Формат сообщений представлен в табл. 1 и 2.

Таблица 1

Формат сообщений о маршруте ID = 6,8

Parameter	No. of bits	Description
Message ID	6	Identifier for Message 6: always 6. Identifier for Message 8: always 8.
Repeat Indicator	2	Used by the repeater to indicate how many times a message has been repeated. 0–3 0 = default 3 = do not repeat anymore
Source ID	30	MMSI number of source station.
Sequence Number	2	Only for Message 6 0–3
Destination ID	30	Only for Message 6 MMSI number of destination station
Retransmit Flag	1	Only for Message 6 Retransmit Flag should be set upon retransmission. 0 = no retransmission = default 1 = retransmitted
Spare	2	Not used. Set to zero
IAI	16	for Message 6: DAC = 001; FI = 28. for Message 8: DAC = 001; FI = 27.
Message Linkage ID	10	A source specific running number, unique across all binary messages equipped with Message Linkage ID. Used to link additional information to the message by a Text Description message. The Message Linkage ID and the first six digits of the source MMSI uniquely identify the sent message. 1–1,023 0 = not available = default
Sender Classification	3	0 = ship = default 1 = authority 2–7 (reserved for future use)
Route Type	5	0 = not available = default 1 = mandatory route 2 = recommended route 3 = alternative route 4 = recommended route through ice 5 = ship route plan 6–30 (reserved for future use) 31 = cancellation (cancel route as identified by Message Linkage ID)
Start Date and Time		Start UTC date and time
UTC Month	4	1–12 0 = not available = default
UTC Day	5	1–31 0 = not available = default
UTC Hour	5	0–23 24 = not available = default
UTC Minute	6	0–59 60 = not available = default
Duration	18	Minutes until end of validity of the route. Measured from start time of Route Information. 0 = cancel route 262,143 = not available = default
Number of Waypoints	5	Number of Waypoints 1–16 0 = no waypoint = default 17–31 (not used)
Waypoints	nx55	Variable number of waypoints 1–16 (55 bit each). The number of waypoints is determined by the length of the message.
Spare	0	Not used. Set to zero

Таблица 2

Формат записи о маршрутной точке

Parameter	No. of bits	Description
WP i. Longitude	28	Longitude in 1/10,000 min, ± 180 degrees as per 2's complement (East = positive, West = negative). 181 = not available = default.
WP i. Latitude	27	Latitude in 1/10,000 min, ± 90 degrees as per 2's complement (North = positive, South = negative). 91 degrees = not available = default

Каждое сообщение о маршруте имеет свой уникальный идентификатор, назначаемый передающей станцией (Message Linkage ID), что вместе с первыми шестью знаками MMSI этой станции однозначно идентифицирует маршрутную информацию. Все сообщения с ID = 6, 8 об изменениях данного маршрута, его отмене или связанные с этим маршрутом текстовые сообщения (ID = 12, 14) должны содержать указанный идентификатор.

Сообщения с ID = 6, 8 могут передаваться как с судна, так и с береговой станции. Каждое из них может содержать до 16 маршрутных точек и указывает время начала действия маршрута и время, в течение которого маршрут действителен. Для отмены маршрута до истечения его действия передающая станция может отправить сообщение с тем же Message Linkage ID, Route Type = 31, Duration = 0 и недействительным временем начала действия маршрута Start Date and Time = (0–0–24–60).

Предполагается, что программное обеспечение ЭКДИС при получении от транспондера АИС сообщений с маршрутной информацией будет отображать полученный маршрут до момента истечения срока его действия или получения сообщения о его отмене. Очевидно, что указанная маршрутная информация может быть использована в системе безопасного расхождения при решении задачи построения прогноза траектории движения судна-цели. Для этого судно-цель должно широкоэшелонно передавать сообщение о своем маршруте (ID = 8, DAC = 001, FI = 27, Route Type = 5).

Результаты (Results)

Рассмотренные в предыдущем разделе работы сообщения с маршрутной информацией предназначены, прежде всего, для информирования судов в определенной акватории об обязательных, рекомендованных или альтернативных маршрутах. Эта информация может передаваться береговой станцией АИС под управлением СУДС или администрацией порта с целью обеспечения безопасности судоходства. Судно также может передавать с помощью этих сообщений информацию о своем маршруте, информируя СУДС и окружающие суда. Однако при использовании этих сообщений в задаче прогноза траектории движения судна-цели может возникнуть ряд проблем, которые будут рассмотрены в данном разделе работы.

Первая проблема состоит в недостаточном объеме передаваемой информации. Согласно данным табл. 2, маршрут передается как множество координат маршрутных точек без привязки ко времени и указания планируемой скорости на каждом из участков маршрута (рис. 1).

Предположим, что судно-цель движется строго по заданному маршруту, который передается в виде множества маршрутных точек: $M = \{m_i\}_{i=1...16}$. На самом же судне маршрут задается другим множеством маршрутных точек $M^* = \{m_i^*\}_{i=1...N}$, где $m_i^*(\varphi_i, \lambda_i, T_i)$ — совокупность координат маршрутной точки и планового времени прихода в эту точку. При этом значение времени в сообщениях АИС с маршрутной информацией не передается, что может приводить к ошибкам прогнозирования положения судна-цели.

Введем следующие обозначения:

T_c — текущее время;

T_i — плановое время прихода в маршрутную точку m_i ;

T_p — время прогноза: $T_p = T_c + t_p$;
 t_p — период прогноза;
 $s_c(T_c)$ — текущее положение цели;
 $s_c(T_p)$ — прогнозируемое положение цели на время прогноза T_p ;
 d_{i-1} — расстояние от текущего положения цели до следующей маршрутной точки (m_i);
 d_i — расстояние от маршрутной точки (m_i) до прогнозируемого положения цели на время прогноза T_p .

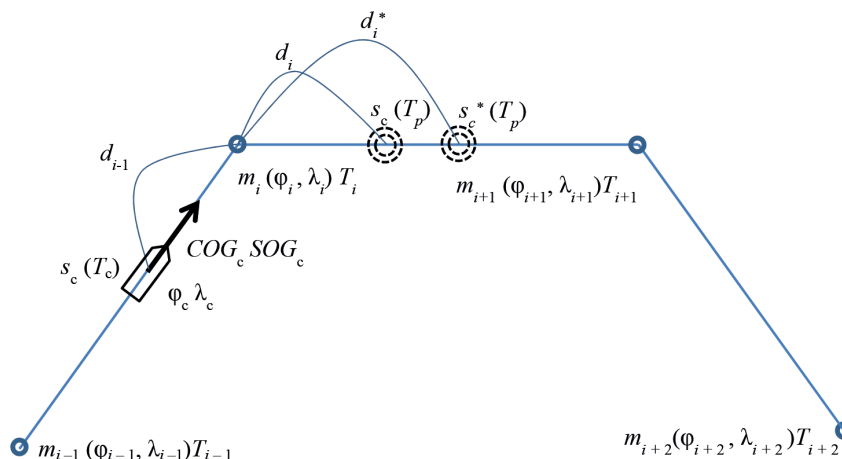


Рис. 1. Ситуация передачи маршрута
в виде множества координат маршрутных точек

Система прогноза траектории движения цели имеет следующую информацию о нем, полученную по каналу АИС:

- текущие координаты цели: φ_c, λ_c ;
- параметры движения цели: $COG_c, SOG_c, HDG_c, ROT_c$;
- маршрут $M = \{m_i\}_{0 \leq i \leq 16}$.

Предположим, что маневрирование цели в поворотных точках не учитывается. Прогнозируемое положение цели на время прогноза $s_c(T_p)$ будет определяться системой на отрезке $[m_i, m_{i+1}]$ через расстояние d_i , которое может быть рассчитано по формуле

$$d_i = V_c t_p - d_{i-1}.$$

При этом расстояние d_{i-1} определяется с использованием известной информации: текущим координатам цели и координатам следующей маршрутной точки:

$$d_{i-1} = d(s_c, m_i).$$

В качестве скорости может использоваться текущая скорость цели:

$$V_c = SOG_c.$$

Это справедливо, если скорость цели на маршруте не изменяется, и текущая скорость цели соответствует плановой. Однако это предположение в реальности может не выполняться.

Рассчитаем расстояние d_i^* с учетом планового времени прихода в каждую маршрутную точку:

$$d_i^* = V_i t_i;$$

$$V_i = \frac{d(m_{i+1}, m_i)}{T_{i+1} - T_i};$$

$$t_i = t_p - t_{i-1};$$

$$t_{i-1} = \frac{d(s_c, m_i)}{SOG_c}.$$

В случае если на участках маршрута задана скорость, отличная от текущей скорости цели, то расстояния d_i и d_i^* будут различны, как и координаты прогноза места цели (см. рис. 1).

Вторая проблема заключается в необходимости учитывать тот факт, что в реальных условиях судно-цель может не находиться на линии заданного маршрута. При отклонении от линии заданного маршрута целью может быть реализована одна из двух стратегий: движение в маршрутную точку или движение параллельно линии заданного маршрута до пересечения со следующим коленом маршрута, как показано на рис. 2. Причем, какая из стратегий используется, по АИС не передается, ее необходимо определить по наблюдениям за движением цели.

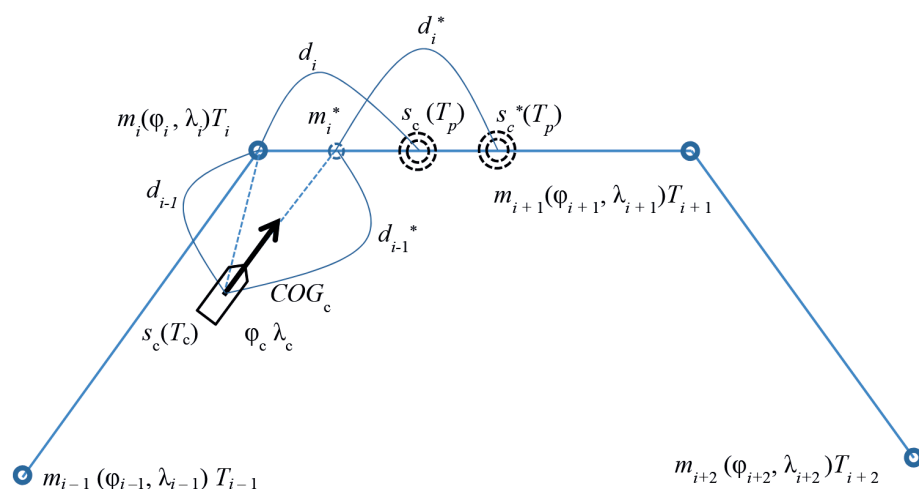


Рис. 2. Учет разных стратегий движения цели при ее отклонении от линии заданного маршрута

Для определения стратегии, реализуемой в данный момент целью, используются следующие данные:

- текущие координаты цели: φ_c, λ_c ;
- координаты следующей маршрутной точки: φ_i, λ_i ;
- координаты предыдущей маршрутной точки: $\varphi_{i-1}, \lambda_{i-1}$;
- направление движения цели относительно грунта: COG_c .

По приведенным данным можно рассчитать $P(m_{i-1}, m_i)$ — направление из точки m_{i-1} в точку m_i . Сравнивая текущее направление движения цели COG_c с этими направлениями можно определить, движется ли цель в поворотную точку m_i или параллельно до пересечения с линией следующего отрезка маршрута в точку m_i^* . Если не рассматривать возможное изменение скорости и считать, что скорость на всех участках маршрута одинакова:

$$V_{i-1} = V_i = SOG_c,$$

то справедливо равенство:

$$d_{iCBPC-1} + d_i = d_{i-1}^* + d_i^*,$$

откуда получим

$$d_i = d_i^* + (d_{i-1}^* - d_{i-1}).$$

Из свойств треугольника $s_c(T), m_i, m_i^*$ следует, что расстояние между точками m_i и m_i^* больше, чем разность расстояний от текущего места цели до точек m_i и m_i^* :

$$d(m_i, m_i^*) > (d_{i-1}^* - d_{i-1}).$$

Таким образом, места положения цели на время прогноза при учете разных стратегий движения цели $s_c(T_p)$ и $s_c^*(T_p)$ различны, как показано на рис. 2, и в случае неверного определения или неучета реальной стратегии движения цели возможны ошибки в прогнозе ее местоположения.

Третья проблема заключается в том, передает ли судно-цель посредством АИС новый маршрут при маневрировании для расхождения с другими судами. В случае если, согласно МППСС-72, встречное судно-цель должно уступить дорогу, оно для этого осуществляет маневр по расхождению. Важно, чтобы система безопасного расхождения на судне, которому уступают дорогу, имела информацию о намерениях другого судна. В этом случае передача посредством АИС, измененного в соответствии с маневром по расхождению маршрута, может решить задачу информированности окружающих судов о предстоящих маневрах. Однако для этого необходимо, чтобы на судне-цели выполнялись следующие условия:

- СБРС принимала решения по расхождению в форме измененного маршрута;
- измененный маршрут должен передаваться посредством системы АИС окружающим судам.

Получив сообщения об измененном маршруте, СБРС других судов смогут построить прогноз движения судна-цели более корректно. Однако и в этом случае возможны ошибки прогнозирования. Причиной этого является ограниченность информации, передаваемой в существующих сообщениях ID = 6, 8.

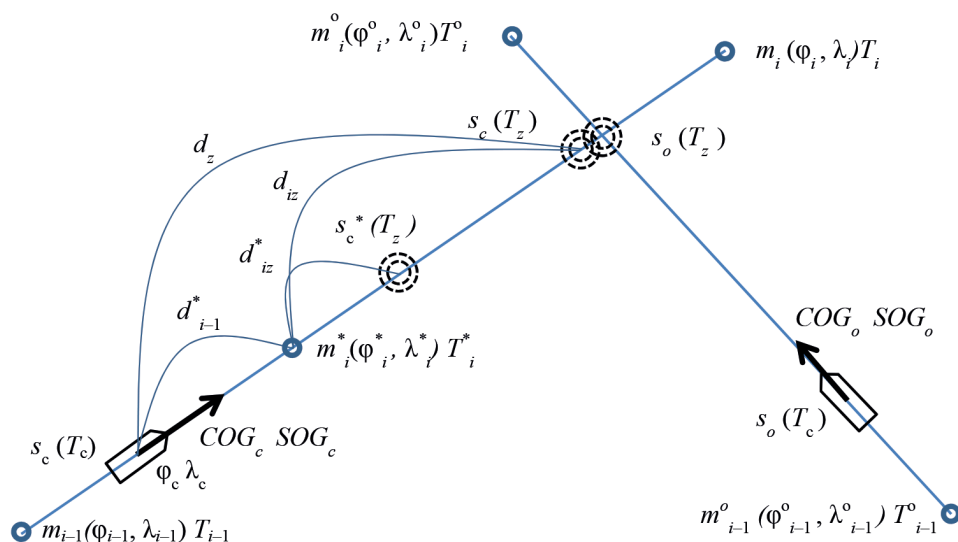


Рис. 3. Ситуация встречи двух судов на пересекающихся курсах

В качестве примера рассмотрим ситуацию встречи двух судов на пересекающихся курсах (рис. 3). Введем следующие обозначения:

- T_c — текущее время;
- T_z — время кратчайшего сближения судов;
- $s_c(T_c), s_o(T_c)$ — текущие положения цели и собственного судна;
- $s_c(T_z), s_o(T_z)$ — положения цели и собственного судна в момент опасного сближения;
- $m_i(\varphi_i, \lambda_i)T_i$ — маршрутная точка цели (координаты и время прихода в точку);
- $m_i(\varphi_i, \lambda_i)T_i$ — маршрутная точка собственного судна (координаты и время прихода в точку);
- d_{i-1} — расстояние от текущего положения цели до следующей маршрутной точки (m_i);
- d_{iz} — расстояние от маршрутной точки (m_i) до прогнозируемого положения цели на время кратчайшего сближения T_z .

Система прогноза траектории движения цели на собственном судне имеет следующую информацию о цели, полученной по каналу АИС:

- текущие координаты цели: φ_c, λ_c ;
- параметры движения цели: $COG_c, SOG_c, HDG_c, ROT_c$;
- маршрут $M = \{m_i\}_{0 \leq i \leq 16}$.

Предположим, что на собственном судне и судне-цели в момент T_c определяется ситуация опасного сближения с целью в момент $T_z = T_c + TCPA$. Системы прогнозирования на обоих судах

определяют положение судов в момент опасного сближения как $s_c(T_z)$ и $s_o(T_z)$. В соответствии с МППСС-72 цель должна уступить дорогу, и ее система расхождения принимает решение о выполнении маневра скоростью: в момент T_i^* в точке m_i^* изменить скорость на SOG_c^* , а в точке m_i вернуться к прежней скорости SOG_c .

Измененный маршрут, включающий точку m_i^* , передается с помощью сообщения ID = 8 окружающим судам. Однако, как следует из данных табл. 2, в маршрутном сообщении АИС передаются только координаты маршрутных точек, без указания планируемого времени прихода в точку или скорости на участках маршрута. Это приведет тому, что цель будет рассчитывать прогноз своего положения в точке $s_c^*(T_z)$, считая, что от маршрутной точки m_i^* до точки $s_c^*(T_z)$ она движется с новой скоростью SOG_c^* и пройдет расстояние:

$$d_{iz}^* = SOG_c^* (T_z - T_i^*);$$

$$T_i^* = \frac{d(m_i^*, s_c)}{SOG_c^*}.$$

Таким образом, СБРС цели будет считать, что ситуация опасного сближения разрешена. Остальные суда, приняв сообщение о новом маршруте, будут рассчитывать прогноз положения цели в точке $s_c(T_z)$, считая, что от маршрутной точки m_i^* до точки $s_c(T_z)$ она движется с прежней скоростью SOG_c и пройдет расстояние:

$$d_{iz} = SOG_c (T_z - T_i^*);$$

$$T_i^* = \frac{d(m_i^*, s_c)}{SOG_c}.$$

Соответственно окружающие суда не смогут учесть планируемое изменение скорости целью в маршрутной точке m_i^* и будут считать, что ситуация по-прежнему остается опасной. Возможно, при этом судно, которому должны уступать дорогу, ошибочно считая, что другое судно игнорирует правила расхождения, будет предпринимать действия в соответствии с Правилем 17 МППСС-72, что в данном случае может только усугубить ситуацию.

Обсуждение (Discussion)

Использование маршрутов, передаваемых судами, возможно в задаче прогнозирования движения судов-целей в системах безопасного расхождения. Это, безусловно, лучше, чем отсутствие какой-либо информации о планируемом движении судна. Однако при использовании такой информации в задаче прогноза траектории движения цели могут возникнуть проблемы, рассмотренные в предыдущем разделе работы. Их причиной является то, что существующие сообщения АИС с ID = 6, 8 предназначены в первую очередь для передачи статических маршрутов без привязки ко времени прихода в маршрутные точки и скоростям на участках маршрута.

Для корректного использования маршрутной информации в задаче прогнозирования траектории движения судна-цели необходимо ввести новые сообщения в системе АИС (например, с ID = 6, 8 DAC = 001), но с другим FI. Наилучшим решением может быть периодическая передача сообщений о точках траектории судна, предварительно вычисляемая на самом судне с использованием известной модели и планируемых маневров (например, передача множества точек прогнозируемой траектории на заданное время прогноза с определенной дискретностью). Возможно, эти параметры должны зависеть от скорости судна и кривизны планируемой траектории. Таким образом, можно обеспечить окружающие суда информацией о планируемой траектории не только в виде ломаной линии, но и криволинейной траектории. Однако передача этой информации всеми судами может значительно загрузить каналы АИС, что неприемлемо. Для уменьшения нагрузки на каналы возможна передача маршрутной информации в виде множества координат маршрутных точек и заданных скоростей движения судна на участках между ними. Эта информация позволит

более корректно прогнозировать траекторию движения судна-цели, но, разумеется, только в виде ломаной линии, а не криволинейной.

Выводы (Summary)

На основе проведенного исследования можно сделать следующие выводы:

1. Рассмотрены вопросы использования в системах безопасного расхождения судов маршрутной информации, передаваемой в адресуемых и широковещательных сообщениях АИС.
2. Определено, что в задаче прогнозирования траекторий движения судов-целей могут быть использованы сообщения АИС с ID = 1, 2, 3 и ID = 5 (динамическая и статическая информация), а также сообщения с ID = 6, 8 (маршрутная информация).
3. Отмечено, что использование маршрутной информации в задаче прогноза траектории движения судна-цели позволяет более точно строить такие прогнозы и, соответственно, лучше оценивать навигационную ситуацию. Указаны некоторые проблемы использования маршрутной информации и приведены примеры некорректной работы системы прогноза траектории движения судна-цели.
4. Сделан вывод о том, что источником указанных проблем является тот факт, что существующая система передачи маршрутной информации изначально не предусматривала использование этой информации в задаче прогноза траекторий.
5. В результате рассмотренных проблем с использованием маршрутной информации показана ограниченная применимость существующих сообщений АИС и обоснована необходимость разработки системы передачи маршрутной информации по каналам АИС, ориентированной на решение с ее помощью задачи прогноза траекторий судов-целей. Сформулированы предложения по содержанию сообщений АИС в такой системе.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Johansen T. A.* Ship Collision Avoidance and COLREGS Compliance Using Simulation-Based Control Behavior Selection With Predictive Hazard Assessment / T. A. Johansen, T. Perez, A. Cristofaro // IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems. — 2016. — Vol. 17. — Is. 12. — Pp. 3407–3422. DOI: 10.1109/TITS.2016.2551780.
2. *Woerner K. L.* Collision avoidance road test for COLREGS-constrained autonomous vehicles / K. L. Woerner, M. R. Benjamin, M. Novitzky, J. J. Leonard // OCEANS 2016 MTS/IEEE Monterey 2016. — С. 1–6. DOI: 10.1109/OCEANS.2016.7761413.
3. *Смоленцев С. В.* Формализация задачи расхождения судов в море на основе теории мультиагентной системы / С. В. Смоленцев // Эксплуатация морского транспорта. — 2011. — № 2(64). — С. 19–24. — EDN NYBZLP.
4. *Каретников В. В.* К вопросу оценки рисков использования безэкипажных средств водного транспорта на участке акватории / В. В. Каретников, С. В. Козик, А. А. Буцанец // Вестник государственного университета морского и речного флота им. адмирала С. О. Макарова. — 2019. — Т. 11. — № 6. — С. 987–1002. DOI: 10.21821/2309-5180-2019-11-6-987-1002. — EDN ACCRDQ.
5. *Смоленцев С. В.* Моделирование движения судна на основе упрощенной кинематической модели / С. В. Смоленцев, Д. В. Исаков // Вестник государственного университета морского и речного флота имени адмирала С. О. Макарова. — 2018. — Т. 10. — № 6. — С. 1111–1121. DOI: 10.21821/2309-5180-2018-10-6-1111-1121. — EDN YYEITB.
6. *Смоленцев С. В.* Простая аналитическая модель движения судна / С. В. Смоленцев, Д. В. Исаков // Вестник государственного университета морского и речного флота им. адмирала С. О. Макарова. — 2019. — Т. 11. — № 1. — С. 7–21. DOI: 10.21821/2309-5180-2019-11-1-7-21. — EDN NSMBPQ.
7. *Гриняк В. М.* Планирование маршрутов судов на основе кластеризации ретроспективных данных трафика акватории / В. М. Гриняк // Территория новых возможностей. Вестник Владивостокского государственного университета экономики и сервиса. — 2021. — Т. 13. — № 2. — С. 61–78. DOI: 10.24866/VVSU/2073-3984/2021-2/061-078. — EDN UVXZYX.

8. Гриняк В. М. Оценка опасности трафика морской акватории по данным Автоматической идентификационной системы / В. М. Гриняк, А. С. Девятисильный, В. И. Люлько // Вестник государственного университета морского и речного флота им. адмирала С. О. Макарова. — 2017. — Т. 9. — № 4. — С. 681–690. DOI: 10.21821/2309-5180-2017-9-4-681-690. — EDN ZEUQDL.

9. Naus K. Drafting Route Plan Templates for Ships on the Basis of AIS Historical Data / K. Naus // Journal of Navigation. — 2020. — Vol. 73. — Is. 3. — Pp. 726–745. DOI: 10.1017/S0373463319000948.

10. Wang L. Use of AIS data for performance evaluation of ship traffic with speed control L. Wang, Y. Li, Z. Wan, Z. Yang, T. Wang, K. Guan, L. Fu // Ocean Engineering. — 2020. — Vol. 204. — Pp. 107259. DOI: 10.1016/j.oceaneng.2020.107259.

11. Смоленцев С. В. Проблема прогнозирования траекторий движения судов в акватории / С. В. Смоленцев, Д. В. Исаков, М. Б. Солодовниченко // Вестник государственного университета морского и речного флота им. адмирала С. О. Макарова. — 2022. — Т. 14. — № 1. — С. 7–16. DOI: 10.21821/2309-5180-2022-14-1-7-16. — EDN HUUGUA.

REFERENCES

1. Johansen, T. A., T. Perez and A. Cristofaro. “Ship Collision Avoidance and COLREGS Compliance Using Simulation-Based Control Behavior Selection With Predictive Hazard Assessment.” *IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems* 17.12 (2016): 3407–3422. DOI: 10.1109/TITS.2016.2551780.

2. Woerner, K. L., M. R. Benjamin, M. Novitzky and J. J. Leonard. “Collision avoidance road test for COLREGS-constrained autonomous vehicles.” *OCEANS 2016 MTS/IEEE Monterey* 2016: 1–6. DOI: 10.1109/OCEANS.2016.7761413.

3. Smolentsev, S. V. “Formalization of the ships’ collision avoidance at sea on the basis of mas theory.” *Ekspluatatsiya morskogo transporta* 2(64) (2011): 19–24.

4. Karetnikov, V. V., S. V. Kozik and A. A. Butsanets. “Risks assessment of applying unmanned means of water transport in the water area.” *Vestnik gosudarstvennogo universiteta morskogo i rechnogo flota im. admirala S. O. Makarova* 11.6 (2019): 987–1002. DOI: 10.21821/2309-5180-2019-11-6-987-1002.

5. Smolentsev, S. V. and D. V. Isakov. “Simulation of ship movement based on a simplified kinematic model.” *Vestnik gosudarstvennogo universiteta morskogo i rechnogo flota im. admirala S. O. Makarova* 10.6 (2018): 1111–1121. DOI: 10.21821/2309-5180-2018-10-6-1111-1121.

6. Smolentsev, S. V. and D. V. Isakov. “A simple analytical model of ship movement.” *Vestnik gosudarstvennogo universiteta morskogo i rechnogo flota im. admirala S. O. Makarova* 11.1 (2019): 7–21. DOI: 10.21821/2309-5180-2019-11-1-7-21.

7. Grinyak, V. M. “Vessel route planning based on traffic historical data clustering.” *The Territory Of New Opportunities. The Herald Of Vladivostok State University Of Economics And Service* 13.2 (2021): 61–78. DOI: 10.24866/VVSU/2073-3984/2021-2/061-078.

8. Grinyak, V. M., A. S. Devyatitsil’nyy and V. I. Lyul’ko. “Use of automatic identification system data for estimation of marine traffic safety.” *Vestnik gosudarstvennogo universiteta morskogo i rechnogo flota im. admirala S. O. Makarova* 9.4 (2017): 681–690. DOI: 10.21821/2309-5180-2017-9-4-681-690.

9. Naus, K. “Drafting Route Plan Templates for Ships on the Basis of AIS Historical Data.” *Journal of Navigation* 73.3 (2020): 726–745. DOI: 10.1017/S0373463319000948.

10. Wang, L., L. Fu, et al. “Use of AIS data for performance evaluation of ship traffic with speed control.” *Ocean Engineering* 204 (2020): 107259. DOI: 10.1016/j.oceaneng.2020.107259.

11. Smolentsev, S. V., D. V. Isakov and M. B. Solodovnichenko. “The problem of forecasting vessels trajectories in the water area.” *Vestnik gosudarstvennogo universiteta morskogo i rechnogo flota im. admirala S. O. Makarova* 14.1 (2022): 7–16. DOI: 10.21821/2309-5180-2022-14-1-7-16.

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

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

INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Smolentsev, Sergey 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: sswasily@mail.ru, SmolencevSV@gumrf.ru

Исаков Дмитрий Владимирович —

доцент

ФГБОУ ВО «ГУМРФ имени адмирала

С. О. Макарова»

198035, Российская Федерация, Санкт-Петербург,

ул. Двинская, 5/7

e-mail: kaf_avt@gumrf.ru

Солодовниченко Михаил Борисович —

кандидат технических наук, профессор

ФГБОУ ВО «ГУМРФ имени адмирала

С. О. Макарова»

198035, Российская Федерация, Санкт-Петербург,

ул. Двинская, 5/7

e-mail: solodovnichenkomb@gumrf.ru

Isakov Dmitry V. —

assistant professor

Admiral Makarov State University of Maritime

and Inland Shipping

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

Russian Federation

e-mail: kaf_avt@gumrf.ru

Solodovnichenko Mikhail V. —

professor

Admiral Makarov State University of Maritime

and Inland Shipping

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

Russian Federation

e-mail: solodovnichenkomb@gumrf.ru

Статья поступила в редакцию 07 февраля 2025 г.

Received: Feb. 7, 2025.

ISSUES OF ENSURING SAFE OPERATION OF M-PR CLASS VESSELS IN THE NORTH-EASTERN PART OF THE BLACK SEA

I. S. Onishchenko^{1,2}, A. E. Sergeev^{1,2}, V. V. Karetnikov²

¹ — CNIMF, JSC, St. Petersburg, Russian Federation

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

The article analyzes the current operating conditions for "M-PR" class mixed navigation vessels within the anchorage areas of Port Kavkaz. The analysis considers the geographic regions and navigation seasons for "M-PR" vessels in the Kerch Strait and adjacent Black Sea areas, as regulated by the Rules of the Russian Classification Society. To extend the operating season for self-propelled cargo ships of the "M-PR" class in this region, an approach is proposed based on maintaining equivalent safety levels compared to a reference route. Characteristic navigation conditions for these vessels are determined for the period from March to November, inclusive, within the 10-mile coastal zone extending from the Kerch Strait to the port of Novorossiysk. This determination incorporates an analysis of available shelter locations and the current navigational situation in this water area. A calculation of safety criterion fulfillment is suggested for three routes to account for the specific operational characteristics of mixed navigation vessels within the anchorage areas of Port Kavkaz, where cargo is transshipped to storage vessels. Emergency situations involving mixed navigation vessels in the Kerch Strait area are analyzed. Based on the study results, adjustments to the Russian Classification Society's regulatory framework are proposed regarding the operating season for "M-PR" class vessels in the 10-mile coastal zone from the port of Novorossiysk to the Kerch Strait. For the months with the most severe hydrometeorological conditions (from March to November), the introduction of a wave height restriction of $h_{3\%} \leq 2.0$ m is justified. Other measures aimed at improving navigation safety under current conditions are also considered.

Keywords: safety of navigation, mixed navigation vessels, Black Sea, Kerch Strait, Port Kavkaz, wind waves, water area zoning, place of refuge, navigational situation, ship operation safety.

For citation:

Onishchenko, Irina S., A. E. Sergeev and V. V. Karetnikov "Issues of ensuring safe operation of M-PR class vessels in the north-eastern part of the black sea." *Vestnik Gosudarstvennogo universiteta morskogo i rechnogo flota imeni admirala S. O. Makarova* 17.2 (2025): 175–184. DOI: 10.21821/2309-5180-2025-17-2-175-184.

УДК 656.6

ВОПРОСЫ ОБЕСПЕЧЕНИЯ БЕЗОПАСНОСТИ ЭКСПЛУАТАЦИИ СУДОВ КЛАССА «М-ПР» В СЕВЕРО-ВОСТОЧНОЙ ЧАСТИ ЧЕРНОГО МОРЯ

И. С. Онищенко^{1,2}, А. Е. Сергеев^{1,2}, Каретников В. В.²

¹ — АО «ЦНИИМФ», Санкт-Петербург, Российская Федерация

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

В статье выполнен анализ современных условий эксплуатации судов смешанного плавания класса «М-ПР» в районе якорных стоянок порта Кавказ. Рассмотрены регламентируемые Правилами Российского Классификационного Общества географические районы и сезоны плавания судов «М-ПР» в Керченском проливе и прилегающих к нему районах Черного моря. Решение задачи о расширении сезона эксплуатации грузовых самоходных судов класса «М-ПР» в данном районе предложено осуществлять с использованием подхода, основанного на критерии равной безопасности работы судов в новых условиях по отношению к эталонной трассе. Определение характерных условий плавания таких судов в период с марта по ноябрь включительно в 10-мильной прибрежной зоне от Керченского пролива до порта Новороссийск выполнено с учетом анализа доступных мест убежищ и актуальной навигационной обстановки в данной акватории.

Предложено расчетную оценку выполнения критерия безопасности выполнять для трех трасс, что позволяет учесть специфику работы судов смешанного плавания в районе якорных стоянок порта Кавказ, где осуществляется перевалка грузов на суда-накопители. Проанализированы аварийные ситуации с участием судов смешанного плавания в районе Керченского пролива. По результатам исследования предложены корректировки нормативной базы Российского Классификационного Общества относительно сезона эксплуатации судов класса «М-ПР» в 10-мильной прибрежной зоне от порта Новороссийск до Керченского пролива. Для наиболее тяжелых месяцев по гидрометеорологическим условиям за сезон с марта по ноябрь обосновано введение ограничения по режиму волнения $h_{3\%}$ не более 2,0 м. Рассмотрены иные меры, направленные на повышение безопасности судоходства в современной навигационной обстановке.

Ключевые слова: безопасность мореплавания, суда смешанного плавания, Черное море, Керченский пролив, порт Кавказ, ветровое волнение, районирование акваторий, места убежища, навигационная обстановка, безопасность эксплуатации судов.

Для цитирования:

Онищенко И. С. Вопросы обеспечения безопасности эксплуатации судов класса «М-ПР» в северо-восточной части Черного моря / И. С. Онищенко, А. Е. Сергеев, В. В. Каретников // Вестник Государственного университета морского и речного флота имени адмирала С. О. Макарова. — 2025. — Т. 17. — № 2. — С. 175–184. DOI: 10.21821/2309-5180-2025-17-2-175-184. — EDN BGDQAZ.

Введение (Introduction)

Черное и Азовское моря традиционно являлись ключевыми транспортными коридорами южной части России. Развитие морской инфраструктуры является базовым аспектом, влияющим на грузопоток торгового флота, который, в свою очередь, позволяет разгрузить трафик автомобильных и железных дорог в данном регионе. Поэтому развитие потенциала водного транспорта в XXI в. для России является ключевым фактором в улучшении социально-экономического состояния государства [1], [2]. В целом за последние десять лет реализован ряд исследований [3], [4], направленных на повышение безопасности судоходства судов, результаты которых могут найти широкое применение в отечественном и зарубежном флоте.

В настоящее время суда смешанного плавания являются неотъемлемой частью гражданского флота, обеспечивающего доставку российских грузов в Черном море. Такие суда способны перемещаться по внутренним водным путям всей европейской части страны, а также беспрепятственно преодолевать Азовское море и выходить в глубоководное Черное море. Основной задачей судов данного класса является перевалка грузов в море на суда-накопители, которые из-за своей осадки не могут пройти из Черного моря в Азовское. Основной район эксплуатации судов данного класса в регионе — это 10-мильная прибрежная зона Черного моря и акватория Азовского моря без ограничений.

В 2023 г. в связи с переносом якорных стоянок, где осуществляется перевалка грузов с судов смешанного плавания на суда-накопители, возникла необходимость корректировки разрешенных границ района эксплуатации судов класса «М-ПР», так как новые места стоянок находятся за пределами указанных акваторий.

Целью работы является оценка возможности эксплуатации грузовых самоходных судов класса «М-ПР» в марте – ноябре в 10-мильной прибрежной зоне Черного моря от Керченского пролива до порта Новороссийск. Поставленная задача требовала оперативного решения из-за большого количества судов, которым следовало произвести доставку грузов в ноябре 2023 г., при этом необходимо было обеспечить существующий уровень безопасности эксплуатации флота в оживленной акватории порта Кавказ.

Методы и материалы (Methods and Materials)

Суда класса «М-ПР» Российского Классификационного Общества (РКО) до 2023 г. допускались к эксплуатации в 10-мильной прибрежной зоне от порта Новороссийск до Керченского пролива в период с апреля по октябрь¹ включительно. При этом в Керченском проливе и непосредственно

¹ Российское Классификационное Общество. Правила классификации и постройки судов. Ч I: Классификация. М.: ФАУ «Российский морской регистр судоходства», 2019.

прилегающем к нему районе Черного моря эксплуатация грузовых судов разрешалась при введении дополнительного ограничения по волнению $[h_{3\%}] \leq 2,0$ м в марте и ноябре. На рис. 1 показаны места якорных стоянок, действовавших до 2023 г. (красные границы), на которых осуществлялась перегрузка судов с судов смешанного (река – море) плавания на суда-накопители, и после внесенных изменений (зеленые границы). Перенос якорных стоянок в более открытую часть акватории обусловлен, в первую очередь, сложной навигационной обстановкой в районе входа в Керченский пролив. Эта мера направлена на обеспечение безопасности судоходства.

Якорные стоянки были перенесены юго-восточнее, за пределы морского района, в котором разрешена работа судов класса «М-ПР» в марте и ноябре. Таким образом, доступ флота к зоне разгрузки оказался ограничен из-за существующих ограничений в зависимости от сезона эксплуатации (апрель – октябрь). В соответствии с действующими приказами Министерства транспорта и Министерства обороны РФ движение судов также было ограничено в Керченском проливе. Возможность укрытия судов от неблагоприятных погодных условий в защищенных акваториях северной части Керченского пролива и Азовского моря существенно ограничена навигационной обстановкой.

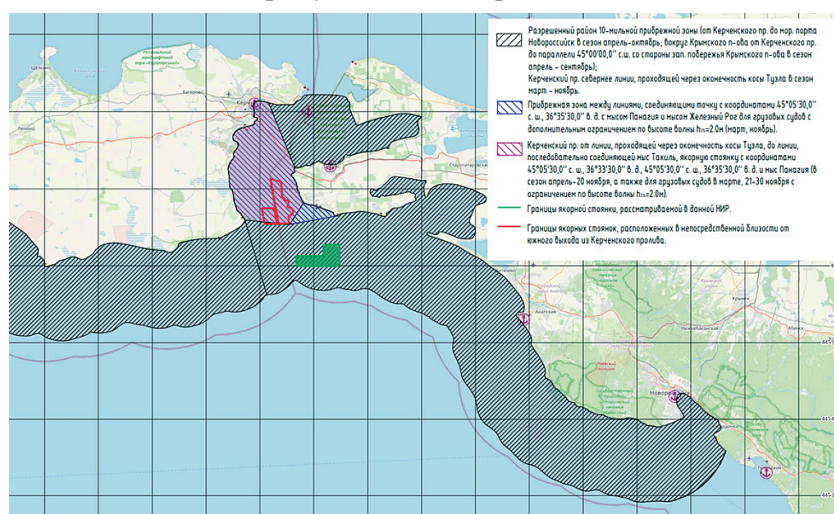


Рис. 1. Схема разрешенных районов плавания судов класса «М-ПР» в Керченском проливе и 10-мильной зоне до порта Новороссийск

Опыт эксплуатации судов класса «М-ПР» (на момент начала работы в морских акваториях относились к классу «М») в северо-восточной части Черного моря получен начиная с 70-х гг. XX в., когда впервые возникла необходимость плавания в 20-мильной прибрежной зоне от Керченского пролива до портов Феодосия и Новороссийск. С этого момента начался выход судов внутреннего плавания в морские прибрежные районы. Совокупность экспериментальных разовых рейсов единичных речных судов в морских районах показала положительный результат, что повлекло за собой выход в прибрежные районы целые группы судов различных проектов. Так возникло понятие «суда смешанного плавания». Впоследствии с каждым последующим десятилетием расширялась база нормативных документов, применяемых к данным судам, проводилось множество исследований, а также было предложено множество методик возможности расширения районов и сезонов эксплуатации судов внутреннего и смешанного плавания.

По мере появления и внедрения современных технологий проведения наблюдений за гидрометеорологической обстановкой в Мировом океане и обработки полученных результатов росла точность статистических данных. Как следствие, применяемые в задачах районирования бассейнов методики тоже претерпевали существенные изменения.

Районы и сезоны эксплуатации судов класса «М-ПР», зафиксированные в Протоколе 1997 г.², в большинстве до сих пор дублируются в современных Правилах РКО, однако данные ограничения

² Протокол по установлению условий плавания в море судов с классом Российского Речного Регистра (Протокол-97). Приложение к Приказу Минтранса РФ от 01.08.97 г. № 86, 1997.

требуют пересмотра и развития по мере возникновения новых практических задач. Применительно к району северо-восточной части Черного моря сезоны и географические границы разрешенных зон плавания судов данного класса неоднократно пересматривались: данный вопрос подробно рассмотрен в статье [5].

Решение поставленной задачи в рамках данного исследования по расширению сезона эксплуатации грузовых судов класса «М-ПР» в Черном море возможно при использовании подходов, которые неоднократно применялись в ранее выполненных обоснованиях аналогичного характера. Детализированное описание методики отражено в статьях [6], [7]. Для оценки возможности эксплуатации используется критериальное неравенство, учитывающее условия эксплуатации в новом районе по отношению к эталонной трассе:

$$\alpha_x = \frac{\lg Q(X | (y_1, y_2, \dots, y_n))}{\lg Q_n(X_n | (z_1, z_2, \dots, z_m))} \geq 1, \quad (1)$$

где $Q(X | (y_1, y_2, \dots, y_n))$ — долгосрочная обеспеченность расчетного значения нормируемой мореходной характеристики для рассматриваемого судна в новых условиях эксплуатации, характеризующих совокупностью параметров $y_1, y_2, \dots, y_n$;

$Q_n(X_n | (z_1, z_2, \dots, z_m))$ — долгосрочная обеспеченность расчетного значения нормируемой мореходной характеристики для рассматриваемого судна-эталона при установленных такому судну эксплуатационных ограничениях, характеризующих совокупностью параметров $z_1, z_2, \dots, z_m$ в разрешенном районе и сезоне эксплуатации;

X — расчетная величина нормируемой мореходной характеристики для эксплуатируемого судна согласно Правилам РКО;

X_n — расчетная величина неявно нормируемой мореходной характеристики для судна эталона согласно Правилам РКО.

В качестве нормируемой мореходной характеристики предложено использовать высоту волн h . В этом случае выполнение неравенства (1) позволяет считать, что необходимый уровень безопасности обеспечивается как для нормируемых мореходных характеристик (общая и местная прочность, остойчивость, надводный борт), так и неявно нормируемых характеристик (заливаемость, обитаемость и др.).

Обеспеченность $Q(X | (y_1, y_2, \dots, y_n))$, входящая в выражение (1), рассчитывается по следующей формуле:

$$Q(X | (y_1, y_2, \dots, y_n)) = \frac{1}{S_{\max}} \int_0^{S_{\max}} \int_0^{h_{3\%}^{\max}} \left(\frac{Q}{h_{3\%}^{\max}} \right) f_p(h_{3\%}) dh_{3\%} dx, \quad (2)$$

где $\frac{Q}{h_{3\%}^{\max}}$ — условная обеспеченность нормируемой величины мореходной характеристики рассма-

триваемого судна на квазистационарном режиме волнения, характеризующем высотой волны $h_{3\%}$;

$S_{\max}$ — максимальное расстояние между местами убежища, миль;

$h_{3\%}^{\max}(x)$ — максимальное значение режима волнения $h_{3\%}$, с которой может встретиться судно во время рейса из-за опасной ошибки в прогнозе волнения при уходе с произвольной точки трассы с координатой x в ближайшее место убежища, отстоящее от рассматриваемой точки трассы на расстояние $l(x)$;

$f_p(h_{3\%})$ — долгосрочная функция плотности распределения вероятностей высот волн $h_{3\%}$, на которые попадает судно при движении по морской трассе с учетом ограничения по волнению $[h_{3\%}]$ и возможности укрытия в местах убежища от неблагоприятных погодных условий (редуцированное волнение).

Данный подход применялся в ранее выполненных работах [6], [7], где учитывались такие факторы, как обеспеченность трассы местами убежища, долгосрочные ветро-волновые характеристики, устанавливаемое ограничение $[h_{3\%}]$, вероятность попадания судна на режимы волнения, превышающие установленное ограничение в результате реализации опасной ошибки при благо-

приятном прогнозе, потеря скорости хода судна на волнении. В качестве эталона в описанной методике принимаются условия эксплуатации судов на трассе, имеющей схожие характеристики с новым районом, в котором наблюдается продолжительный опыт плавания судов без существенных происшествий. Так, эксплуатация судов класса «О-ПР» и «М-ПР» до ранее разрешенных якорных стоянок началась в 2006 г. и продолжается в настоящее время. При этом опыт работы судов в рассматриваемом районе нельзя признать полностью положительным, так как имела место аварийная ситуация. 11–12 ноября 2007 г. произошли массовые аварии судов, в результате которых возникли крушения нескольких судов из-за длительного воздействия штормового волнения и ветра [8].

Необходимо отметить, что наиболее выраженные негативные последствия повлек за собой перелом корпуса танкера «Волгонефть-139» в 2007 г., из-за которого в акваторию Керченского пролива вылилось до 2000 т нефтепродуктов³. Первопричиной возникших 11 ноября 2007 г. кораблекрушений явилось нарушение установленных эксплуатационных ограничений по режиму волнения и скорости ветра, предписанных классом судна. Неблагоприятный прогноз погоды был передан заблаговременно, однако часть судов осталась в открытой части пролива в районе якорной стоянки. Таким образом, эталонная трасса судов «М-ПР» была выбрана для сезона и акватории, в которой опыт навигации в целом характеризуется как «положительный»: принят маршрут Феодосия – Севастополь (проходит вдоль 10-мильной прибрежной зоны Крымского полуострова), на котором грузовые самоходные суда класса «М - ПР» успешно эксплуатируются в течение сезона апрель – сентябрь.

Надежное место убежища в Керченском проливе находится в его северной части, куда не доходит волнение со стороны Черного моря. Иные защищенные акватории, доступные для судов класса «М-ПР» в марте и ноябре (см. рис. 1), в проливе отсутствуют, что усугубляет и без того сложную навигационную обстановку. В связи с этим в рамках выполняемого исследования целесообразно предусмотреть альтернативные места убежища с учетом особенностей акватории.

Альтернативным местом убежища был выбран п. Новороссийск как наиболее близко расположенный к новым якорным стоянкам. Порты Крымского полуострова не рассматривались ввиду наличия ограничений на эксплуатацию гражданского флота в данном районе. Таким образом, исследование возможности расширения сезона работы судов класса «М-ПР» свелось к сопоставлению условий плавания на эталонном маршруте и на новых трассах (рис. 2):

- трасса № 1: Якорная стоянка — северная часть Керченского пролива;
- трасса № 2: Якорная стоянка — п. Новороссийск;
- трасса № 3: Керченский пролив — п. Новороссийск.

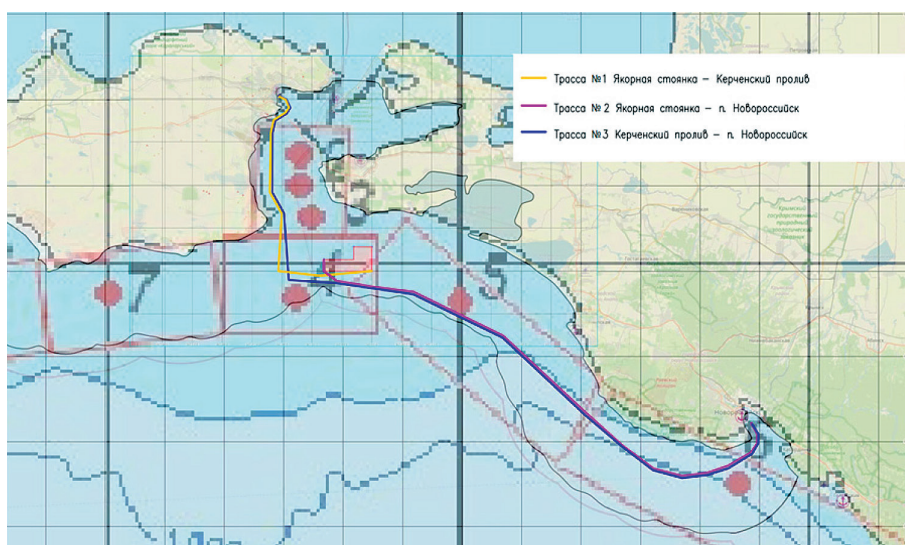


Рис. 2. Рассматриваемые трассы
с учетом районирования Черного моря по данным работы [9]

³ Министерство транспорта Российской Федерации. [Электронный ресурс]. Режим доступа: <https://mintrans.gov.ru/press-center/news/5753> (Дата обращения: 01.03.2025 г.).

На рис. 2 также указаны зоны, для которых выполнено исследование ветро-волновых параметров в прибрежных районах северного побережья Черного моря [9]. Указанная работа являлась основанием последнего пересмотра географических границ районов плавания и погодных ограничений для судов РКО. В настоящем исследовании характеристики режимов волнения и ветра принимались по данным работы [9] как наиболее надежному источнику, так как гидрометеорологические условия в прибрежных районах зачастую значительно отличаются от открытых акваторий, для которых выполняется большая часть реанализа. Также в качестве исходных данных для расчетов по указанной методике использовались параметры, полученные с помощью обработки современных справочных данных по ветровому волнению [10].

Результаты (Results)

Критериальное неравенство $\alpha_x > 1$ (1) определялось как для долгосрочных волновых условий в целом за рассматриваемый сезон, так и для наиболее тяжелого по волновым условиям месяца. Расчеты выполнены в соответствии с предложенным подходом для грузовых самоходных судов класса «М-ПР» характерной длины 25, 60, 100 и 140 м.

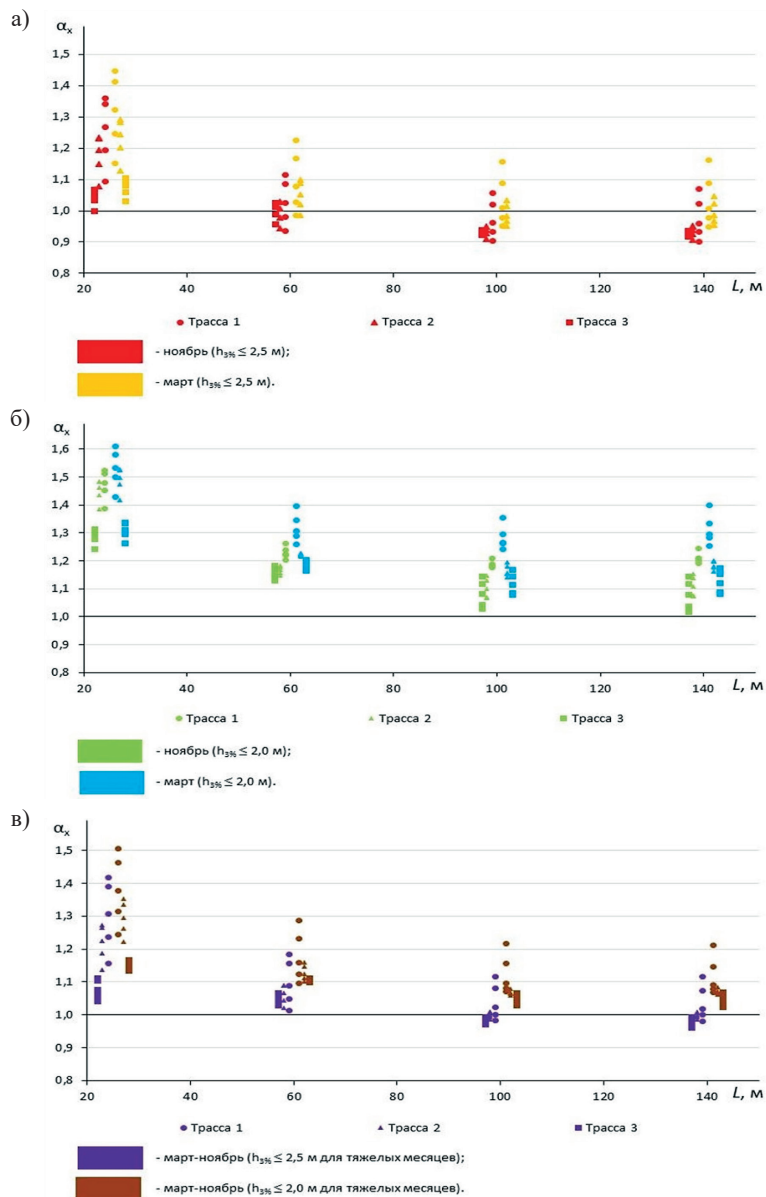


Рис. 3. Зависимость критерия безопасности α_x от длины судна L для марта и ноября:

а — для наиболее тяжелых месяцев при ограничении $[h_{3\%}] \leq 2,5$ м;
б — для наиболее тяжелых месяцев при ограничении $[h_{3\%}] \leq 2,0$ м; в — для всего сезона март – ноябрь

На рис. 3 представлены результаты расчетов, на основании которых можно сделать вывод о том, что для эксплуатации судов в марте и ноябре при ограничении по режиму волнения $[h_{3\%}] \leq 2,5$ м критерий безопасности не обеспечивается ни для сезона в целом, ни для «тяжелого» месяца. Вследствие этого было предложено по аналогии с действующими в Правилах РКО ограничениями установить допустимый режим волнения $[h_{3\%}] \leq 2,0$ м для марта и ноября.

Выполненные в настоящем исследовании расчеты по критериальному неравенству (1) представлены на рис. 4 в виде схемы, на которой указаны номера точек (районов), по данным работы [9], и названия трасс, приведенных на рис. 2.

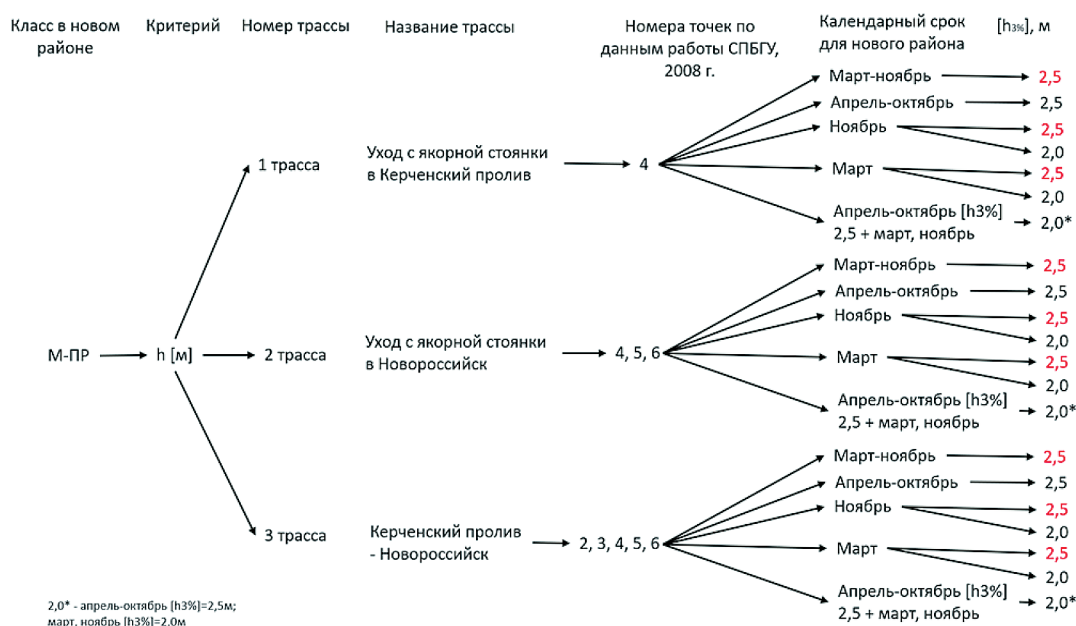


Рис. 4. Схема выполнения расчетной оценки по критериальному неравенству

Расчетная оценка показала, что безопасность эксплуатации судов класса «М-ПР» в 10-мильной прибрежной зоне от п. Новороссийск до Керченского пролива обеспечена. По результатам исследования для РКО были сформулированы следующие предложения об изменении пп. 2 и 3 табл. 7.8-2 ч. 0 «Классификация» ПКПС⁴:

- разрешить плавание судов класса «М-ПР» с апреля по октябрь с ограничением по высоте волны $[h_{3\%}] \leq 2,5$ м;
- разрешить эксплуатацию данного класса в 10-мильной прибрежной зоне от Керченского пролива до п. Новороссийск также в марте и ноябре при ограничении $[h_{3\%}] \leq 2,0$ м.

Указанные предложения реализованы в Правилах РКО в полной мере, что позволило организовать беспрепятственный доступ судов смешанного плавания класса «М-ПР» к судам-накопителям в навигацию 2024 г.

Обсуждение (Discussion)

В процессе выполнения данного исследования особое внимание уделялось аварии 2007 г., в результате которой возникли серьезные экологические последствия для акватории Керченского пролива. Как отмечалось ранее, крушение танкера «Волгонефть-139» — наиболее тяжелый, но, к сожалению, не единственный итог шторма в ноябре 2007 г. Так же затонули четыре сухогрузных судна с грузом серы на борту и баржа «Дон-2», танкер «Волгонефть-123» получил трещину в корпусе из-за потери устойчивости палубы и подпалубных балок набора. Уведомление о надвигающемся шторме было разослано на суда накануне 10.10.2007 г. в 17 ч 00 мин, а долгосрочные

⁴ Российское Классификационное Общество. Правила классификации и постройки судов. Ч I: Классификация. М.: ФАУ «Российский морской регистр судоходства», 2019.

прогнозы свидетельствовали о неблагоприятных погодных условиях за несколько суток, однако лишь малая часть судов проследовала в место убежища. Также ситуацию усугубила ошибка, допущенная в прогнозе погоды, вследствие чего гидрометеорологические условия в районе якорной стоянки значительно превысили погодные ограничения, регламентированные нормативами РКО.

Схожая ситуация возникла 15 декабря 2024 г. в районе новых якорных стоянок морского порта Кавказ, где под воздействием неблагоприятных погодных условий произошел разлом корпусов танкеров «Волгонефть-212» и «Волгонефть-239», повлекший разлив нефтепродуктов в акваторию и гибель одного члена экипажа. Причины возникновения аварийного случая в настоящий момент выясняются компетентными органами, однако необходимо отметить, что теплоход «Волгонефть-212» имел класс «М-ПР», а «Волгонефть-239» — «О-ПР» (ограничение по режиму волнения $[h_{3\%}] \leq 2,0$ м). Таким образом, учитывая указанные ранее результаты исследования, следует отметить, что эксплуатация данных танкеров в районе новых якорных стоянок порта Кавказ в декабре не предусмотрена нормативной базой РКО.

Данные МЧС России по Республике Крым⁵ характеризуют погодные условия как «сильный шквалистый ветер, волнение моря до 7 баллов», т. е. высота волн достигала 3,0–5,0 м, что значительно превышает расчетные эксплуатационные ограничения для судов класса «М-ПР», описанные в настоящем исследовании. На данный момент доподлинно неизвестно, наблюдалась ли при этом опасная ошибка в прогнозе погоды, возникшая в 2007 г.

Заключение (Conclusion)

На основе результатов выполненного исследования можно сделать следующие выводы:

1. Анализ возможных мест убежищ в 10-мильной прибрежной зоне северо-восточной части Черного моря показал, что доступных в современной навигационной обстановке укрытий всего два: северная часть Керченского пролива и п. Новороссийск.

2. Расчетная оценка подтвердила возможность эксплуатации судов класса «М-ПР» в 10-мильной прибрежной зоне от Керченского пролива до п. Новороссийск при введении дополнительного ограничения для марта и ноября по допускаемой высоте волны $[h_{3\%}] \leq 2,0$ м. При этом нормируемый режим волнения $[h_{3\%}] \leq 2,5$ м для сезона апрель – октябрь предусмотрено сохранить.

3. Важным условием при проведении грузовых операций в море является возможность прерывания грузовой операции в случае возникновения опасной ситуации, связанной с погодными условиями: неблагоприятным прогнозом погоды или ошибкой при благоприятном прогнозе. В этом случае предлагается предусмотреть на судах «Инструкцию по погрузке-выгрузке» и «Информацию об остойчивости с дополнительными эксплуатационными ограничениями и сведениями о балластировке судна». Данные документы будут использованы при необходимости ухода в место убежища в частично разгруженном состоянии.

4. Результаты исследования отражены в действующих Правилах РКО, что позволило обеспечить плановую работу грузового флота класса «М-ПР» РКО в районе новых якорных стоянок северо-восточной части Черного моря в навигацию 2024 г. с марта по ноябрь включительно.

5. Нарушение регламентируемых нормативной базой РКО районов и сезонов эксплуатации, а также ограничений по режиму волнения и ветра на судах смешанного (река – море) плавания могут привести к необратимым последствиям. В частности, превышение допускаемых погодных ограничений может повлечь разрушение корпусных конструкций на регулярном волнении и затопление судна.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Цыганов А. С. Влияние особенностей северо-западной части Черного моря на развитие морской деятельности в регионе / А. С. Цыганов // Вестник Астраханского государственного технического университета. Серия: Морская техника и технология. — 2023. — № 2. — С. 95–100. DOI: 10.24143/2073-1574-2023-2-95-100. — EDN CPTJVP.

⁵ Главное управление МЧС России по Республике Крым. [Электронный ресурс]. Режим доступа: <https://82.mchs.gov.ru/deyatelnost/press-centr/operativnaya-informaciya/5420041> (Дата обращения: 01.03.2025 г.).

2. Иванова Е. Ю. Анализ деятельности морских портов России и ее влияние на развитие экономики страны / Е. Ю. Иванова // Транспортное дело России. — 2022. — № 2. — С. 227–230. DOI: 10.52375/20728689_2022_2_227. — EDN PYYFOJ.
3. Каретников В. В. К вопросу разработки основных концептуальных положений системы дистанционного управления техническим флотом / В. В. Каретников, С. В. Рудых, А. А. Буцанец // Вестник Астраханского государственного технического университета. Серия: Морская техника и технология. — 2019. — № 2. — С. 7–15. DOI: 10.24143/2073-1574-2019-2-7-15. — EDN KFIHYI.
4. Каретников В. В. Перспективы развития электронных навигационных карт внутренних водных путей Российской Федерации / В. В. Каретников, В. А. Бекряшев // Речной транспорт (XXI век). — 2014. — № 1(66). — С. 30–33. — EDN RUPNGD.
5. Онищенко И. С. Обзор условий эксплуатации грузовых самоходных судов класса «М-ПР» в северо-восточной части Черного моря / И. С. Онищенко, А. Е. Сергеев // Современные вызовы транспортной отрасли: новые возможности: материалы межвузовской научно-практической конференции транспортных вузов, Москва, 27–28 февраля 2024 года. — М.: Издательско-торговая корпорация «Дашков и К», 2024. — С. 181–184. — EDN CXHCNP.
6. Ефименков Ю. И. Нормирование допускаемых эксплуатационных ограничений судов ограниченного района плавания R3 / Ю. И. Ефименков, И. С. Онищенко, А. В. Дидковский // Труды Крыловского государственного научного центра. — 2020. — № S1. — С. 40–46. DOI: 10.24937/2542-2324-2020-1-S-I-40-46. — EDN VOZBBM.
7. Ефименков Ю. И. Требования к допустимым условиям эксплуатации судов класса «М-СП4,5» и возможность их уточнения на примере Черного и Каспийского морей / Ю. И. Ефименков, И. С. Онищенко // Труды Крыловского государственного научного центра. — 2019. — № S1. — С. 53–58. DOI: 10.24937/2542-2324-2019-1-S-I-53-58. — EDN JCKLRA.
8. Овсиенко С. Н. Шторм 11 ноября 2007 Г. В Керченском проливе: хроника событий, математическое моделирование и географоэкологический анализ нефтяного разлива / С. Н. Овсиенко, Д. Я. Фашук, С. Н. Зацепя [и др.] // Труды Государственного океанографического института. — 2008. — № 211. — С. 307–339. — EDN PXMGNF.
9. СПбГУ. Исследование волнения в 10-мильной прибрежной зоне Черного моря от Дунайской Провры до порта Новороссийск, включая Керченский пролив: отчет по НИР / Рук. работы Л. И. Лопатухин. — СПб., 2008. — 172 с.
10. Российский морской регистр судоходства. Справочные данные по режиму ветра и волнения Баренцева, Северного, Черного, Азовского и Средиземного морей. — СПб.: «Российский морской регистр судоходства», 2006. — 452 с.

REFERENCES

1. Tsyganov A. S. “Influence of specific features of north-western part of Black Sea on development of maritime activities in region.” *Vestnik of Astrakhan State Technical University. Series: Marine engineering and technologies* 2 (2023): 95–100. DOI: 10.24143/2073-1574-2023-2-95-100.
2. Ivanova, E. Yu. “Analysis of the activities of russian sea ports and its impact on the development of the country’s economy.” *Transport Business Of Russia* 2 (2022): 227–230. DOI: 10.52375/20728689_2022_2_227.
3. Karetnikov, V. V., S. V. Rudykh and A. A. Butsanets. “On the issue of developing conceptual statements of technical fleet remote control system.” *Vestnik Astrakhanskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta. Seriya: Morskaya tekhnika i tekhnologiya* 2 (2019): 7–15. DOI: 10.24143/2073-1574-2019-2-7-15.
4. Karetnikov, V. V. and V. A. Bekryashev. “Perspektivy razvitiya elektronnykh navigatsionnykh kart vnutrennikh vodnykh putey Rossiyskoy Federatsii.” *Rechnoy transport (XXI vek)* 1(66) (2014): 30–33.
5. Onishchenko, I. S. and A. E. Sergeev. “Obzor usloviy ekspluatatsii gruzovykh samokhodnykh sudov klassa “M-PR”v severo-vostochnoy chasti Chernogo morya.” *Sovremennye vyzovy transportnoy otrasli: novye vozmozhnosti: Materialy mezhvuzovskoy nauchno-prakticheskoy konferentsii transportnykh vuzov, Moskva, 27–28 fevralya 2024 goda*. Moskva: Izdatel’sko-torgovaya korporatsiya «Dashkov i K», 2024: 181–184.
6. Efimenkov, Yu. I., I. S. Onishchenko and A. V. Didkovskiy. “regulation of permissible operating restrictions for vessels with a specified operating area service r3.” *Transactions Of The Krylov State Research Centre* S1 (2020): 40–46. DOI: 10.24937/2542-2324-2020-1-S-I-40-46.
7. Efimenkov Yu. I. and I. S. Onishchenko “Requirements to acceptable operational conditions of M-SP4.5-class ships and their possible revision. Case study: operation of M-SP4.5-class ships in the Black Sea and

in the Caspian.” *Transactions of the Krylov State Research Centre* 1 (2019): 53–58. DOI: 10.24937/2542-2324-2019-1-S-I-53-58.

8. Ovsienko, S. N. et al. “Storm of 11 November, 2007, in Strait of Kerch: chronology of events, mathematical modeling and geographic/ecological analysis of oil spill.” *Trudy Gosudarstvennogo okeanograficheskogo instituta* 211 (2008): 307–339.

9. SPbSU. *Issledovanie volneniya v 10-mil'noj pribrezhnoj zone Chernogo morya ot Dunajskoj Prorvy do porta Novorossiysk, vklyuchaya Kerchenskij proliv*. Research report. Head of research Lopatukhin L. I. SPb, 2008.

10. Russian Maritime Register of Shipping. *Reference data on wind and wave regime of the Baltic, North, Black, Azov and Mediterranean Seas*. SPb.: Russian Maritime Register of Shipping, 2006.

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

Онищенко Ирина Станиславовна —

заведующий сектором, аспирант

АО «ЦНИИМФ»

191015, Российская Федерация, г. Санкт-Петербург,

ул. Кавалергардская, д. 6, лит. А

ФГБОУ ВО «ГУМРФ имени адмирала

С. О. Макарова»

198035, Российская Федерация, г. Санкт-Петербург,

ул. Двинская, 5/7

e-mail: OnishchenkoIS@cniimf.ru

Сергеев Андрей Евгеньевич —

инженер 1 категории, магистрант

АО «ЦНИИМФ»

191015, Российская Федерация, г. Санкт-Петербург,

ул. Кавалергардская, д. 6, лит. А

ФГБОУ ВО «ГУМРФ имени адмирала

С. О. Макарова»

198035, Российская Федерация, г. Санкт-Петербург,

ул. Двинская, 5/7

e-mail: SergeevAE@cniimf.ru

Каретников Владимир Владимирович —

д-р техн. наук, проф.

ФГБОУ ВО «ГУМРФ имени адмирала

С. О. Макарова»

198035, Российская Федерация, Санкт-Петербург,

ул. Двинская, 5/7

e-mail: spguwc-karetnikov@yandex.ru

INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Onishchenko, Irina S. —

Head of Sector, postgraduate

CNIIMF, JSC

6A Kavalergardskaya Str., St. Petersburg, 191015,

Russian Federation

Admiral Makarov State University of Maritime

and Inland Shipping

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

Russian Federation

e-mail: OnishchenkoIS@cniimf.ru

Sergeev, Andrey E. —

first-class engineer, master's student

CNIIMF, JSC

6A Kavalergardskaya Str., St. Petersburg, 191015,

Russian Federation

Admiral Makarov State University of Maritime and

Inland Shipping

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

Federation

e-mail: SergeevAE@cniimf.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: spguwc-karetnikov@yandex.ru

Статья поступила в редакцию 03 февраля 2025 г.

Received: Feb. 3, 2025.

MODELING THE TECHNOLOGY OF LOADING AND UNLOADING OF PERISHABLE GOODS IN A SEAPORT

I. V. Zub, G. D. Kasatkin, A. K. Afanasyev

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

The handling and safety of perishable goods are key tasks in seaport operations. Perishable goods are primarily transported using specialized vehicles or insulated containers designed to maintain a specific temperature regime. These goods include seafood delivered to ports by ships equipped with refrigeration systems. Schedules are developed for processing refrigerated vessels, specifying timeframes for loading and unloading operations based on available lifting and transport equipment as well as vehicles for transporting seafood to storage facilities or consumers. The fleet of lifting and transport equipment significantly influences port operation schemes, cargo turnover, technological process costs, port throughput capacity, and warehouse storage capacity. Automation in lifting and transport equipment partially eliminates human factors from technological processes, thereby improving efficiency but potentially reducing vehicle handling speed. Modeling serves as an effective method for identifying problem areas. Prolonged loading and unloading times beyond scheduled limits or extended exposure of seafood on docks—particularly during summer—adversely impact quality characteristics; thus, minimizing outdoor exposure time is crucial. During modeling of loading and unloading technologies, specific technological operations affecting perishable goods' quality characteristics were identified. Petri nets were employed to simulate these technological processes. The analysis of simulation results revealed not only problem areas but also conflict situations that can be addressed through situational management and adjustments in loading/unloading technologies. Vehicle processing efficiency—apart from that influenced by lifting and transport equipment—is managed via an information system that ensures timely data processing, directly impacting decision-making speed in conflict scenarios.

Keywords: seaport, refrigerated cargo, loading and unloading operations, Petri nets, vehicles, refrigerated vessels, lifting and transport equipment, transshipment of perishable goods.

For citation:

Zub, Igor V., G. D. Kasatkin and A. K. Afanasyev “Modeling of the technology of loading and unloading of perishable goods in a seaport.” *Vestnik Gosudarstvennogo universiteta morskogo i rechnogo flota imeni admirala S. O. Makarova* 17.2 (2025): 185–194. DOI: 10.21821/2309-5180-2025-17-2-185-194.

УДК: 656.613.1, 656.614.35

МОДЕЛИРОВАНИЕ ТЕХНОЛОГИИ ПОГРУЗОЧНО-РАЗГРУЗОЧНЫХ РАБОТ СКОРОПОРТЯЩИХСЯ ГРУЗОВ В МОРСКОМ ПОРТУ

И. В. Зуб, Г. Д. Касаткин, А. К. Афанасьев

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

Темой работы является исследование одной из задач морского порта, к которой относится обработка и сохранность скоропортящихся грузов. Отмечается, что скоропортящиеся грузы в основном перевозятся специальным транспортом или в специальной изотермической таре, способной поддерживать заданный температурный режим. К таким грузам относятся также морепродукты, доставляемые в порт судами, имеющими рефрижераторную установку. Обращается внимание на то, что для обработки рефрижераторных судов разрабатываются планы-графики, в которых указывается время, определяемое для выполнения погрузочно-разгрузочных операций, зависящее от используемого подъемно-транспортного оборудования и наличия транспортных средств для перевозки морепродуктов к месту хранения или потребителю. При этом парк подъемно-транспортного оборудования оказывает влияние на технологические схемы работы порта, грузооборот, себестоимость технологических процессов, пропускную способность

порта и емкость склада. Подчеркивается, что погрузочно-разгрузочные работы, превышающие время, указанное в плане-графике или при нахождении морепродуктов на причале в течение длительного времени, особенно в летний период, оказывают негативное влияние на качественные характеристики, для сохранения которых время нахождения на открытом воздухе должно быть сведено к минимуму. В процессе моделирования технологии погрузочно-разгрузочных работ выявлены технологические операции, которые могут оказать влияние на качественные характеристики скоропортящихся грузов. В данной работе рассмотрен один из способов выявления проблемы, связанной со снижением скорости обработки транспортных средств, в частности с частичным исключением из технологического процесса человеческого фактора в процессе автоматизации подъемно-транспортного оборудования, такой как моделирование технологического процесса погрузочно-разгрузочных работ с использованием аппарата сетей Петри. Анализ результатов моделирования позволил выявить не только проблемные зоны, но и определить вопросы, которые можно решить с помощью ситуационного управления и корректировки технологии погрузочно-разгрузочных работ. Выполненные операции подтверждают, что от используемой информационной системы, с помощью которой осуществляется обработка парка подъемно-транспортного оборудования, зависит оперативность поступающей информации, оказывающей влияние на скорость принятия решений в возникающих конфликтных ситуациях.

Ключевые слова: морской порт, рефрижераторные грузы, погрузочно-разгрузочные работы, сети Петри, транспортные средства, рефрижераторные суда, подъемно-транспортное оборудование, перегрузка скоропортящихся грузов.

Для цитирования:

Зуб И. В. Моделирование технологии погрузочно-разгрузочных работ скоропортящихся грузов в морском порту / И. В. Зуб, Г. Д. Касаткин, А. К. Афанасьев // Вестник Государственного университета морского и речного флота имени адмирала С. О. Макарова. — 2025. — Т. 17. — № 2. — С. 185–194. DOI: 10.21821/2309-5180-2025-17-2-185-194. — EDN BGIBLN.

Введение (Introduction)

Морской порт является объектом, в котором сосредоточены практически все виды транспорта: водный (морской и речной), железнодорожный и автомобильный. В порту происходит перегрузка и хранение, а также комплектование и разукрупнение грузовых мест. Технология погрузочно-разгрузочных работ (ПРР) на каждом грузовом фронте должна быть отражена в технологических картах. При разработке технологии ПРР особого внимания требуют опасные и скоропортящиеся грузы. Первые — из-за потенциальной опасности для жизни сотрудников порта и окружающей среды, вторые — из-за потери своих качеств (порча груза). В работах [1]–[5] рассмотрена технология перевозки скоропортящихся грузов, а также используемые транспортные средства (ТС), основу которых составляют рефрижераторные контейнеры [6] и рефрижераторные фуры, осуществляющие перевозку практически всех скоропортящихся грузов, кроме экзотических продуктов, которые перевозят с использованием авиации [7]. Наибольший грузопоток обеспечивает водный транспорт, в основном морской. В частности, для перевозки скоропортящихся грузов используются *сухогрузные суда*, выполняющие перевозку рефрижераторных контейнеров, электропитание которых осуществляется от судовых генераторов, и *специализированные суда*, оборудованные рефрижераторной установкой (рефрижераторное судно).

Рефрижераторные суда в основном осуществляют доставку определенного вида груза, в связи с чем этот груз может одновременно складироваться на отдельных участках рефрижераторного склада в порту и небольшими партиями отправляться потребителю. При обработке рефрижераторных судов, доставляющих продукцию с промысла, на одном из них могут находиться несколько видов морепродуктов, при разгрузке которых каждый вид скоропортящихся грузов должен быть доставлен в определенное место хранения.

При перевозке скоропортящихся грузов на любом виде ТС должен быть обеспечен заданный температурный режим независимо от срока транспортировки и температуры окружающей среды [8]. Перегрузка скоропортящихся грузов с / на ТС является одним из звеньев технологической цепи, где существует вероятность утраты их качественных характеристик, особенно в летний период, из-за высокой температуры окружающей среды [9]. Во время разгрузки рефрижераторных

судов трюмы остаются открытыми, рефрижераторная установка не работает, температура в трюме возрастает, что может привести к порче груза. Для обработки рефрижераторных судов разрабатываются планы-графики, в которых определяется время на операции по ПРР, зависящее от используемого подъемно-транспортного оборудования (ПТО). В зависимости от используемого оборудования разрабатывается технология ПРР. Если технология разработана при проектировании порта, то выполняется моделирование парка ПТО [10].

Целью исследования является разработка и визуализация модели технологии ПРР для поиска технологических операций, оказывающих влияние на $T_{\text{ПРР}}$ и выработка оптимальных решений для достижения целевого показателя.

Методы и материалы (Methods and Materials)

Последовательность обработки рефрижераторного судна (H_{rv}) можно представить в следующем виде: судно $\rightarrow$ причальное ПТО $\rightarrow$ технологический транспорт $\rightarrow$ рефрижераторный склад или рефрижераторный контейнер. Как видно из приведенной последовательности, проблемным этапом обработки скоропортящихся грузов являются технологический процесс ПРР и процесс доставки к месту хранения. Продолжительность ПРР, которая зависит от надежности и типа ПТО, оказывает существенное влияние на конкурентоспособность порта. В случае отказа ПТО или отсутствия технологического транспорта ПРР прекращается или увеличивается время обработки ТС. В связи с этим продолжительность ПРР ($T_{\text{ПРР}}$) скоропортящихся грузов является одним из целевых показателей: $T_{\text{ПРР}} \rightarrow \min$, выполнение которого возможно при обеспечении бесперебойной работы ПТО, а также оптимально организованной внутрипортовой логистики, соединяющей взаимодействующие элементы и гибкость технологических процессов [11], [12].

В проведенном исследовании выполнен системный анализ, позволяющий определить основные тенденции развития технологии ПРР скоропортящихся грузов. При оптимизации $T_{\text{ПРР}}$ объектом управления является технология ПРР. Для задачи формального описания логико-временной структуры технологических процессов ПРР рассмотрен вариант с использованием аппарата сетей Петри [13]. Это обусловлено тем, что морской порт как система состоит из ряда подсистем, соединенных между собой функциональными связями [14], [15], а стохастический подход ТС делает процесс ПРР вероятностным [16].

Сеть Петри представляет собой ориентированный граф, вершинами которого являются позиции и переходы, соединенные между собой дугами. В позициях размещаются фишки, управляющие переходами и перемещаемые по сети. Переход запускается удалением фишки из его входных позиций и образованием новых фишек, помещенных в его входные позиции. Классические сети Петри и их применение рассмотрены в следующих работах: Котов В. Е. Сети Петри. — М.: Наука, 1984. — 160 с.; Питерсон, Дж. Теория сетей Петри и моделирование систем / Пер. с англ. — М.: Мир, 1984. — 264 с.; Вил ван дер Аалст. Управление потоками работ: модели методы и системы / Пер. с англ. В. А. Башкина, И. А. Ломазовой / Под ред. И. А. Ломазовой. — М.: Физматлит, 2007. — 316 с.

В ряду транспортных систем порт занимает специфическое место, поскольку заявки на обслуживание ТС носят стохастический характер и происходит взаимодействие с разнородными ТС. До настоящего времени в исследованиях, темой которых является моделирование портов и терминалов, использование аппарата Петри не получило достаточного развития. В частности, этот вопрос исследован только в работах [17], [18].

Результаты (Results)

Позиция p_1 (рис. 1) имеет фишку размерностью $k \geq 1$, которая показывает, что судно может иметь неоднородный груз и, следовательно, выгрузка может обеспечиваться двумя или более технологическими линиями или осуществляться последовательно. Позиция p_2 содержит встроенную сеть Петри (рис. 2), моделирующую подход судна к причалу. Переход r_1 сработает в том случае, когда в него поступят все фишки. Позиция p_7 — это готовность судна к погрузочно-разгрузочным работам (ПРР). Переход r_2 сработает в том случае, когда в него поступят фишки из позиций

p_7 и p_9 (сменно-суточный план (ССП)). В переходах r_2 , $r_5 - r_7$, r_9 , установлена «охрана», согласно терминологии [19], в виде временного параметра τ , который не должен превышать время, затрачиваемое на технологическую операцию, заданное в графике ПРР.

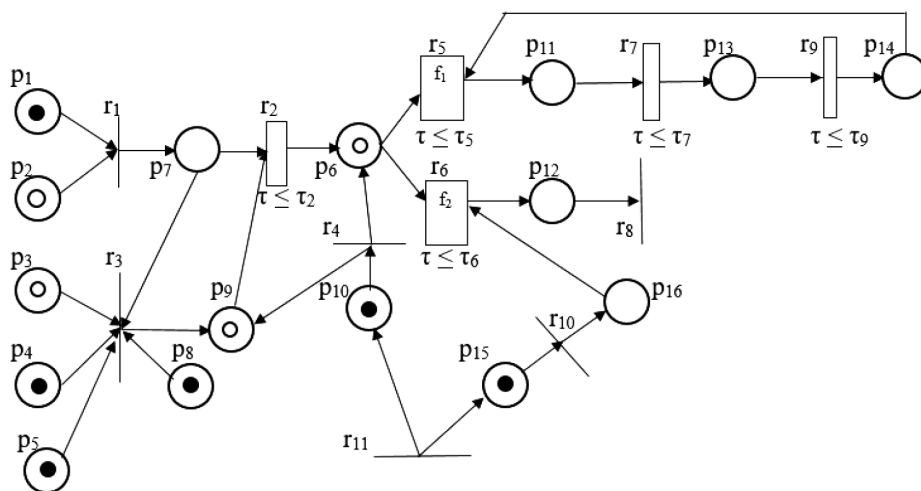


Рис. 1. Моделирование работы морского порта по перегрузке морепродуктов

Условные обозначения:

- p_1 — номенклатура груза; p_2 — судно, p_3 — парк подъемно-транспортного оборудования;
 p_4 — бригада докеров-механизаторов; p_5 — наличие мест в рефрижераторном складе;
 p_6 — партия груза на причале, p_7 — судно готово к выгрузке; p_8 — технологический транспорт;
 p_9 — сменно-суточный план; p_{10} — заявка на вывоз партии груза;
 p_{11} — продукция на технологическом транспорте;
 p_{12} — продукция в рефрижераторном контейнере (рефрижераторной автофуре);
 p_{13} — продукция доставлена к месту хранения; p_{14} — технологический транспорт свободен;
 p_{15} — транспортное средство (рефрижераторная автофур, железнодорожные платформы с рефрижераторными контейнерами); p_{16} — транспортное средство готово к погрузке;
 r_1 — оформление прихода судна; r_2 — производство погрузочно-разгрузочных работ,
 r_3 — разработка сменно-суточного плана; r_4 — поступление заявки на обработку транспортного средства;
 r_5 — погрузка продукции на технологический транспорт; r_6 — погрузка продукции на внешний транспорт;
 r_7 — перевозка продукции к месту хранения;
 r_8 — убытие рефрижераторного контейнера (рефрижераторной автофуры);
 r_9 — перегрузка продукции с технологического транспорта на место хранения;
 r_{10} — прибытие транспортного средства под погрузку; r_{11} — планирование вывоза партии груза

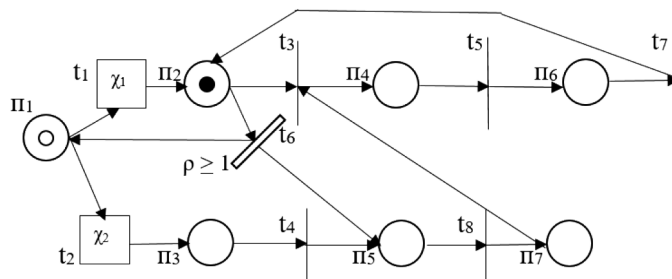


Рис. 2. Вложенная сеть Петри позиции p_2

Условные обозначения:

- $п_1$ — судно; $п_2$ — причал свободен;
 $п_3$ — причал не готов к швартовным операциям; $п_4$ — готовность судна к швартовным операциям;
 $п_5$ — ожидание судна на якоре; $п_6$ — стоянка судна у причала; $п_7$ — готовность судна к заходу в порт;
 t_1 — заход в порт; t_2 — подход судна на рейдовую стоянку; t_3 — подход судна к причалу;
 t_4 — постановка на якорь; t_5 — швартовка судна к причалу; t_6 — получение разрешения на швартовку;
 t_7 — отшвартовка судна, выход в рейс; t_8 — снятие с якоря

Переход r_3 (формирование ССП) выполняется в том случае, когда фишки поступают из позиций $p_3 - p_5, p_7, p_8$. Позиция p_3 имеет n -ю размерность, так как в парк ПТО входят порталные краны, автопогрузчики и технологический транспорт. При недостаточном количестве единиц работающей и находящейся в резерве техники, необходимой для реализации ССП, целевой показатель не выполняется. Позиция p_9 имеет вложенную сеть (рис. 3)

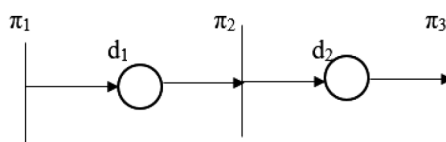


Рис. 3. Вложенная сеть позиции p_9

Условные обозначения:

- π_1 — поступление информации; π_2 — обработка поступившей информации;
 π_3 — передача данных сменно-суточного плана в подразделения;
 d_1 — информация поступила; d_2 — информация обработана

В позиции p_6 возникает конфликтная ситуация, которая разрешается посредством ситуационного управления и визуализируется встроенной сетью Петри (рис. 4). Переходы r_1 и r_5 имеют соответствующие метки f_1 и f_2 , которым соответствуют метки во встроенной сети f'_1 и f'_2 в переходах λ'_2 и λ'_3 . Эти метки являются взаимно дополняющими и служат для синхронизации переходов, которые срабатывают одновременно.

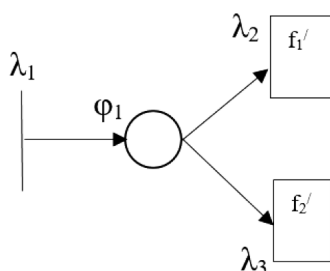


Рис. 4. Вложенная сеть позиции p_6

Условные обозначения:

- λ_1 — обработка поступившей заявки;
 λ_2 — выгрузка на технологический транспорт;
 λ_3 — погрузка на внешний транспорт; ϕ_1 — заявка обработана

Функционирование порта — это деятельность, основанная на причинно-следственных связях, что позволяет идентифицировать конфликтные ситуации (по терминологии [16], *передний конфликт*), под которыми понимается такое положение в сети Петри, когда позиция имеет выходы на два и более перехода. В зависимости от выбора может сработать только один переход, так как его запуск удалит фишку из позиции и другие переходы не смогут быть одновременно запущены.

В позиции p_{10} фишки имеют значение $k \geq 2$, так как одна уходит через переход r_4 в позицию p_9 , а вторая — в позицию p_6 . Технологический транспорт после разгрузки (позиция p_{14}) возвращается под погрузку (переход r_5). В позиции p_6 идет распараллеливание грузопотока. Верхнюю ветвь ($r_5 \rightarrow p_{11} \rightarrow r_7 \rightarrow p_{13} \rightarrow r_9 \rightarrow p_{14} \rightarrow r_5$) представляет модель конвейерной системы, по определению [20], основной задачей которой является проверка моделируемого процесса. В конвейерной системе каждый запуск должен быть завершен, а запуск новой операции невозможен до момента окончания предыдущей.

В позиции p_1 (см. рис. 2) конфликтная ситуация разрешается посредством встроенной сети (рис. 5), имитирующей проблемную ситуацию. В позиции p'_1 фишка имеет значение $k \geq 1$

(в зависимости от количества судов идущих в порт на выгрузку). Переходы t_1 и t_2 , имеющие соответствующие метки χ_1 и χ_2 , которым соответствуют χ'_1 и χ'_2 метки в переходах t'_1 и t'_2 , являются взаимно дополняющими и служат для синхронизации переходов. Два перехода, помеченные такими метками, могут сработать одновременно [19]. При поступлении информации о том, что причал свободен, одновременно срабатывают переходы t'_1 и t_1 . При занятом причале срабатывают одновременно переходы t'_1 и t_1 . При выходе судна в рейс фишка с перехода t_7 перемещается в позицию p_2 , откуда перемещается на переход t_6 . При поступлении фишки из позиции p_2 в переход t_6 , который имеет охрану $\rho \geq 1$, фишка при наличии судна на рейде дает разрешение на заход в порт. Если на рейде или на подходе к порту больше судов, то программируется принцип *fifo* — *first in first out* (первый пришел – первый ушел).

В данной модели рассматривается один причал, поэтому одновременно в порт под выгрузку может войти не более одного судна. В зависимости от производственной ситуации причал может быть свободным и готовым принять судно (p_2) или неготовым к приему судна (p_3), так как у причала уже стоит судно (p_6). В данной случае не рассматривается цель стоянки судна. Если причал занят, то судно ожидает на рейде (p_3), при освобождении причала судно получает разрешение на заход в порт (t_5).

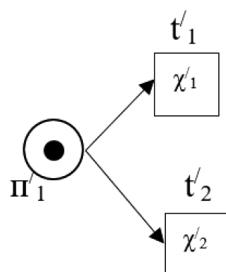


Рис. 5. Вложенная сеть Петри позиции p_1

Условные обозначения:

- p'_1 — информация о занятости причалов;
- t'_1 — получение разрешения на заход в порт;
- t'_2 — определение места якорной стоянки

Анализ сети Петри (см. рис. 1) показывает, что сеть безопасна, так как запуск операций не может происходить до завершения предыдущей. Безопасность является частным случаем ограниченности и не является обязательным требованием при анализе сетей Петри. Сеть Петри не ограничена, так как число фишек в позиции не ограничено. Переходы в сети Петри живые, так как все отметки достижимы при любой разметке. Потенциально живым переходом является переход сети Петри (см. Котов В. Е. Сети Петри. — М.: Наука, 1984. — 160 с.), который срабатывает при достижении разметки [13]. В то же время данная сеть рассматривается как модель, формализующая причинно-следственные связи, так как является асинхронной.

Асинхронность сети отражает логику функционирования морского порта, не позволяя моделировать процесс ПРР в реальном времени. Поскольку целевым показателем при обработке морепродуктов является $T_{ПРР}$, этот показатель будет являться объектом оптимизации. Для подобных целей асинхронную сеть Петри следует совместить с временными характеристиками реализуемых операций ПРР. Для этого в алгоритме имитационного моделирования каждому переходу r_j , обозначающему отдельную операцию ПРР, приписывается время его реализации τ_j . Значение времени τ_j в ходе моделирования может задаваться как среднее выборочное по статистическим данным или с помощью разыгрывания эмпирической функции распределения.

Заключение (Conclusion)

Моделирование технологических процессов ПРР в течение последних 15 лет сосредоточено на контейнерных грузах. Это связано с тем, что перевозка грузов в контейнерах находит все

большее применение. Технология ПРР с морепродуктами имеет важное значение, но этот вопрос в научных работах пока не получил достаточного развития. В настоящей работе посредством аппарата сетей Петри выполнена модель технологии ПРР для морепродуктов. При моделировании в сеть Петри были введены временные ограничения, которые должны соответствовать графику обработки судна.

Продолжительность ПРР ($T_{\text{ПРР}}$) рассматривается как параметр, оптимизируемый в процессе моделирования, который повышает эффективность и качество обслуживания ТС. Обслуживание ТС, в соответствии с планом-графиком, зависит от организации ПРР, которая обеспечивается информационной системой, способствующей нахождению решений по оптимальному управлению, скорости оформления транспортных документов и принятию оперативных решений по управлению портом [21]. Еще одним важным направлением, включающим информационные потоки и технические средства, являются автоматизированные системы управления технологическими процессами и ПТО, которые способствуют частичному сокращению влияния человеческого фактора и повышению скорости обработки ТС [22], [23].

Анализ модели показывает, что минимизация времени ПРР ($T_{\text{ПРР}}$) может быть достигнута при помощи следующих средств:

- проведения организационных мероприятий;
- использования необходимого количества или более производительного ПТО;
- применения своевременного подхода ТС для отгрузки морепродуктов по прямому варианту.

Для выполнения заданного параметра $T_{\text{ПРР}}$ необходимо выполнить анализ парка ПТО, обеспечив его при необходимости достаточным количеством оборудования или осуществив техническое перевооружение порта.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Pogarskaya A. S. Minimization of Logistical Risks in the Transportation of Perishable Goods / A. S. Pogarskaya // Labour and Social Relations Journal. — 2021. — Vol. 32. — Is. 5. — Pp. 79–86. DOI 10.20410/2073-7815-2021-32-5-79-86. — EDN XYUUKY.
2. Гришкова Д. Ю. Оценка транспортно-логистических схем доставки скоропортящихся грузов в Западно-Сибирском регионе / Д. Ю. Гришкова, И. О. Тесленко // Вестник Сибирского государственного университета путей сообщения. — 2022. — № 3(62). — С. 6–14. DOI: 10.52170/1815-9265_2022_62_6. — EDN GOSDIE.
3. Турсынбаев Е. Е. Применение технических усовершенствований в организации перевозок скоропортящихся грузов / Е. Е. Турсынбаев, Е. Е. Жайлаубек, А. Н. Немасипова, С. Ш. Сарбаев // Вестник Казахской академии транспорта и коммуникаций им. М. Тынышпаева. — 2020. — № 2(113). — С. 151–160. DOI: 10.52167/1609-1817-2020-113-2-151-160. — EDN XDKEPO.
4. Эглит Я. Я. Методика обоснования оптимального варианта доставки скоропортящихся грузов / Я. Я. Эглит, К. Я. Эглите, А. В. Андорская, М. А. Шаповалова // Морские интеллектуальные технологии. — 2019. — № 4–3(46). — С. 126–130. — EDN OSSHEM.
5. Яньшин А. А. Формирование Транспортно-технологических схем доставки Скоропортящихся грузов / А. А. Яньшин // Научно-техническое и экономическое сотрудничество стран АТР в XXI веке. — 2011. — Т. 2. — С. 34–39. — EDN RYLOET.
6. Эглит Я. Я. Перспективы перевозок скоропортящихся грузов в России / Я. Я. Эглит, А. В. Андорская, М. А. Шаповалова, Е. Р. Денисова // Системный анализ и логистика. — 2019. — № 2(20). — С. 16–21. — EDN IZZNUV.
7. Полешкина И. О. Перевозка скоропортящихся грузов воздушным транспортом: проблемы обработки в российских аэропортах / И. О. Полешкина // Научный вестник МГТУ ГА. — 2020. — Т. 23. — № 6. — С. 65–83. DOI: 10.26467/2079-0619-2020-23-6-65-83. — EDN KTSQUY.
8. Багинова В. В. Об организации перевозок скоропортящихся грузов в транспортной системе: подходы и моделирование / В. В. Багинова, Д. В. Ушаков // Вестник Ростовского государственного университета путей сообщения. — 2021. — № 3(83). — С. 98–104. DOI: 10.46973/0201-727X_2021_3_98. — EDN DQFHYV.

9. Ушаков Д. В. Особенности изменения качественных характеристик скоропортящихся грузов при внешних воздействиях на начальных этапах холодной цепи / Д. В. Ушаков, В. В. Багинова // Бюллетень транспортной информации. — 2019. — № 3(285). — С. 9–12. — EDN GHPNUH.
10. Зуб И. В. Модель выбора портового перегрузочного оборудования на основе моделирования технологической линии порта / И. В. Зуб, Ю. Е. Ежов, Н. Н. Стенин // Вестник государственного университета морского и речного флота им. адмирала С. О. Макарова. — 2020. — Т. 12. — № 6. — С. 1016–1028. DOI: 10.21821/2309-5180-2020-12-6-1016-1028. — EDN GTLQDP.
11. Стрельникова И. А. О методе расчета вероятности безотказной работы грузопередающих цепочек морского порта / И. А. Стрельникова, Д. Д. Стрельников // Эксплуатация морского транспорта. — 2015. — № 3(76). — С. 15–19. — EDN UYBIKV.
12. Цверов В. В. Совершенствование процесса складского обслуживания как фактор повышения надежности доставки в срок / В. В. Цверов, А. В. Пучкова // Вестник Волжской государственной академии водного транспорта. — 2018. — № 55. — С. 154–166. — EDN UQIEDK.
13. Питерсон Дж. Теория сетей Петри и моделирование систем / Дж. Питерсон; пер. с англ. М. В. Горбатовой, В. Л. Торхова, В. Н. Четверикова. — М: Мир, 1984. — 264 с.
14. Зуб И. В. Аппарат сетей Петри в задаче исследования контейнерного терминала / И. В. Зуб // Высокие технологии, фундаментальные и прикладные исследования, образование: сборник трудов пятой междунар. науч.-практ. конф., Санкт-Петербург, 28–30 апреля 2008 года. Т. 13. — СПб.: СПб. гос. политехн. ун-т, 2008. — С. 66–68. — EDN UTJBST.
15. Зуб И. В. Вложенные синхронизированные сети Петри в задаче моделирования работы контейнерного терминала / И. В. Зуб // Информационные технологии и системы: управление, экономика, транспорт, право: сб. науч. тр. — Вып. 1 (6) / Под ред д-ра техн. наук, проф. Е. П. Истомина. — СПб.: ООО «Андреевский издательский дом», 2008. — С. 126–135.
16. Лескин А. А. Сети Петри в моделировании и управлении / А. А. Лескин, П. А. Мальцев, А. М. Спиридонов. — Л: Наука, 1989. — 133 с.
17. Зуб И. В. Моделирование функционирования транспортного терминала вложенными сетями Петри / И. В. Зуб, Ю. Е. Ежов // Вестник Государственного университета морского и речного флота имени адмирала С. О. Макарова. — СПб.: ГУМРФ имени адмирала С. О. Макарова, 2016. — Вып. 2 (36). — С. 41–48.
18. Зуб И. В. Имитационная модель на основе сетей Петри как средство диагностики перегрузочной техники / И. В. Зуб, Ю. Е. Ежов, С. С. Соколов и [др.] // Речной транспорт (XXI век). — № 4, 2016. — С. 52–58.
19. Ломазова И. А. Вложенные сети Петри: моделирование и анализ распределённых систем с объективной структурой / И. А. Ломазова. — М.: Научный мир, 2004. — 208 с.
20. Руднев В. В. К вопросу об описании конвейерных процессов сетями Петри / В. В. Руднев // Автоматика и телемеханика. — 1985. — № 8. — С. 115–121.
21. Зуб И. В. Информационные системы как инструмент повышения производительности морских портов / И. В. Зуб, Ю. Е. Ежов, Т. С. Анголенко // Вестник государственного университета морского и речного флота им. адмирала С. О. Макарова. — 2022. — Т. 14. — № 2. — С. 218–229. DOI: 10.21821/2309-5180-2022-14-2-218-229. — EDN FPECTY.
22. Зуб И. В. Анализ нормативной документации по проектированию морских портов в части автоматизации технологических процессов на контейнерных терминалах / И. В. Зуб, Ю. Е. Ежов, Г. Д. Касаткин // Вестник государственного университета морского и речного флота им. адмирала С. О. Макарова. — 2023. — Т. 15. — № 2. — С. 262–271. DOI: 10.21821/2309-5180-2023-15-2-262-271. — EDN VEFNME.
23. Зуб И. В. Исследование некоторых вопросов автоматизации элементов терминальных комплексов по перегрузке крупнотоннажных контейнеров / И. В. Зуб, Ю. Е. Ежов, В. Л. Щемелев // Вестник государственного университета морского и речного флота им. адмирала С. О. Макарова. — 2024. — Т. 16. — № 4. — С. 604–619. DOI: 10.21821/2309-5180-2024-16-4-604-619. — EDN LFMUYUW.

REFERENCES

1. Pogarskaya, A. S. “Minimization of Logistical Risks in the Transportation of Perishable Goods.” *Labour and Social Relations Journal* 32.5 (2021): 79–86. DOI 10.20410/2073-7815-2021-32-5-79-86.

2. Grishkova, D. Yu. and I. O. Teslenko. "Evaluation of transport and logistics schemes for the delivery of perishable goods in the west-siberian region." *Vestnik Sibirskogo gosudarstvennogo universiteta putey soobscheniya* 3(62) (2022): 6–14. DOI: 10.52170/1815-9265_2022_62_6.
3. Tursynbaev, E. E., E. E. Zhaylaubek, A. N. Nemasipova and S. Sh. Sarbaev. "Primenenie tekhnicheskikh usovershenstvovaniy v organizatsii perevozok skoroportyaschikhsya грузов." *Vestnik Kazakhskoy akademii transporta i kommunikatsiy im. M. Tynyshpaeva* 2(113) (2020): 151–160. DOI: 10.52167/1609-1817-2020-113-2-151-160.
4. Eglit, Ya. Ya., K. Ya. Eglite, A. V. Andorskaya and M. A. Shapovalova. "Methods of substantiation of the optimal variant of delivery of perishable goods." *Morskie Intellekturnye Tekhnologii* 4–3(46) (2019): 126–130.
5. Yan'shin, A. A. "Formirovanie Transportno-tekhnologicheskikh skhem dostavki Skoroportyaschikhsya грузов." *Scientifically Technical And Economical Cooperation In Asia-Pacific Countries In The 21st Century* 2 (2011): 34–39.
6. Eglit, Ya. Ya., A. V. Andorskaya, M. A. Shapovalova and E. R. Denisova. "Prospects of transportation of perishable goods in Russia." *System Analysis and Logistics* 2(20) (2019): 16–21.
7. Poleshkina, I. O. "Transportation of perishable goods by air: handling problems at Russian airports." *Civil Aviation High Technologies* 23.6 (2020): 65–83. DOI: 10.26467/2079-0619-2020-23-6-65-83.
8. Baginova, V. V. and D. V. Ushakov. "About the organization of perishable goods transportation in the transport system approaches and modeling." *Vestnik RGUPS* 3(83) (2021): 98–104. DOI: 10.46973/0201-727X_2021_3_98.
9. Ushakov, D. V. and V. V. Baginova. "Features of change in qualitative characteristics of perishable cargoes exposed to external influences at the initial stages of the cold chain." *Byulleten' transportnoy informatsii* 3(285) (2019): 9–12.
10. Zub, I. V., Yu. E. Ezhov and N. N. Stenin. "Model for selecting the port cargo handling equipment on the basis of modeling the port technological line." *Vestnik gosudarstvennogo universiteta morskogo i rechnogo flota im. admirala S. O. Makarova* 12.6 (2020): 1016–1028. DOI: 10.21821/2309-5180-2020-12-6-1016-1028.
11. Strel'nikova, I. A. and D. D. Strel'nikov. "About the method of calculating the probability of failure-free operation cargo transmitting chains of the seaport." *Ekspluatatsiya morskogo transporta* 3(76) (2015): 15–19.
12. Tsverov, V. V. and A. V. Puchkova. "Improving the process of the warehouse service as a factor of increasing the reliability of delivery in time." *Bulletin Of The Volga State Academy Of Water Transport* 55 (2018): 154–166.
13. Piterson, Dzh. *Piterson, Dzh. Teoriya setey Petri i modelirovanie sistem* M: Mir, 1984: 264.
14. Zub, I. V. "Apparat setey Petri v zadache issledovaniya konteynernogo terminala." *Vysokie tekhnologii, fundamental'nye i prikladnye issledovaniya, obrazovanie: Sbornik trudov pyatoy mezhdunarodnoy nauchno-prakticheskoy konferentsii, Sankt-Peterburg, 28–30 aprelya 2008 goda. Tom 13.* Sankt-Peterburg: Sankt-Peterburgskiy gosudarstvennyy politekhnicheskii universitet, 2008: 66–68.
15. Zub, I. V. "Vlozhennye sinhronizirovannye seti Petri v zadache modelirovaniya raboty kontejnernogo terminala." *Informacionnye tekhnologii i sistemy: upravlenie, ekonomika, transport, pravo: Sb. nauch. tr. Vol. 1* (6). SPb.: OOO "Andreevskiy izdatel'skiy dom", 2008: 126–135.
16. Leskin, A. A., P. A. Mal'tsev and A. M. Spiridonov. *Seti Petri v modelirovanii i upravlenii* L: Nauka, 1989: 133.
17. Zub, I. V., Yu. E. Ezhov "Modeling of functioning of the transport terminal nested petri nets." *Vestnik gosudarstvennogo universiteta morskogo i rechnogo flota im. admirala S. O. Makarova*, 2016. — Tom 2 (36). — P. 41–48.
18. Zub, I. V. Simulation model based on Petri nets as a diagnostic tool for transshipment equipment / I. V. Zubov, Yu. E. Yezhov, S. S. Sokolov and [others]// *River transport (XXI century)*. — No. 4, 2016. — Pp. 52–58.
19. Lomazova, I. A. *Vlozhennye seti Petri: modelirovanie i analiz raspredelennykh sistem s ob'ektivnoy strukturoy* M: Nauchnyy mir, 2004: 208.
20. Rudnev, V. V. "K voprosu ob opisani konveyernykh protsessov setyami Petri." *Avtomatika i telemekhanika* 8 (1985): 115–121.
21. Zub, I. V., Yu. E. Ezhov and T. S. Angolenko. "Information systems as a tool for improving the seaports productivity." *Vestnik gosudarstvennogo universiteta morskogo i rechnogo flota im. admirala S. O. Makarova* 14.2 (2022): 218–229. DOI: 10.21821/2309-5180-2022-14-2-218-229.
22. Zub, I. V., Yu. E. Ezhov and G. D. Kasatkin. "Analysis of regulatory documentation on seaports design in terms of technological processes automation at container terminals." *Vestnik gosudarstvennogo universiteta morskogo i rechnogo flota im. admirala S. O. Makarova* 15.2 (2023): 262–271. DOI: 10.21821/2309-5180-2023-15-2-262-271.
23. Zub, I. V., Yu. E. Ezhov and V. L. Schemelev. "Investigation of some issues of automation of elements of terminal complexes for transshipment of large-capacity containers." *Vestnik gosudarstvennogo universiteta morskogo i rechnogo flota im. admirala S. O. Makarova* 16.4 (2024): 604–619. DOI: 10.21821/2309-5180-2024-16-4-604-619.

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

Зуб Игорь Васильевич —

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

Касаткин Глеб Денисович — аспирант

ФГБОУ ВО «ГУМРФ имени адмирала
С. О. Макарова»
198035, Российская Федерация, Санкт-Петербург,
ул. Двинская, 5/7
e-mail: cool.bleb.1999@yandex.ru

Афанасьев Андрей Константинович —

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

INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Zub, 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: zubiv@gumrf.ru

Kasatkin, Gleb D. — postgraduate

Admiral Makarov State University of Maritime
and Inland Shipping
5/7 Dvinskaya Str., St. Petersburg, 198035,
Russian Federation
e-mail: cool.bleb.1999@yandex.ru

Afanasyev, Andrey K. —

PhD,
Admiral Makarov State University of Maritime
and Inland Shipping
5/7 Dvinskaya Str., St. Petersburg, 198035,
Russian Federation
e-mail: kaf_texp@gumrf.ru

Статья поступила в редакцию 12 февраля 2025

Received: Feb. 12, 2025

ANALYSIS OF THE FEATURES OF REMOTE CONTROL OF A MARINE AUTONOMOUS SURFACE SHIP IN PORT WATERS USING CONVENTIONAL NAVIGATION TECHNICAL MEANS

A. V. Bryliakov

Admiral Ushakov Maritime University,
Novorossiysk, Russian Federation

The article analyzes the peculiarities of remote control of a marine autonomous surface ship in port waters using data obtained from conventional navigational technical means. It highlights that for the effective operation of an automated navigation system controlling a marine autonomous surface ship, a monitoring system must be developed. This system's task is to collect data from the technical means of the controlled object in real-time, analyze them, and subsequently determine and forecast the ship's condition (safe or unsafe) with necessary reliability. Based on these results, possible scenario variants are formed to ensure vessel safety, aiding the automated navigation system or external captain in making optimal decisions. Differences between controlling a classical vessel with a crew on the navigation bridge and remotely controlling an autonomous surface vessel by an external captain under port conditions are presented. The accuracy of classical navigation tasks is calculated based on international and national requirements for measuring capabilities of conventional navigational equipment in relation to remote control without detailing individual equipment models' characteristics. A comparison of the obtained calculation results with international and national safety requirements is made, identifying weaknesses in current technologies and providing recommendations for improving navigation data quality to successfully perform ship-to-ship operations in remote control mode within port waters. The importance of developing new technologies for autonomous ship control to overcome existing navigation aids' shortcomings and enhance safety in port conditions is emphasized.

Key words: port waters, autonomous ship navigation, sea watch, remote control, navigational technical aids, maritime safety, full functional equivalence.

For citation:

Bryliakov, Andrei V. "Analysis of the features of remote control of a marine autonomous surface ship in port waters using conventional navigation technical means." *Vestnik Gosudarstvennogo universiteta morskogo i rechnogo flota imeni admirala S. O. Makarova* 17.2 (2025): 195–207. DOI: 10.21821/2309-5180-2025-17-2-195-207.

УДК: 656.61.052

АНАЛИЗ ОСОБЕННОСТЕЙ ДИСТАНЦИОННОГО УПРАВЛЕНИЯ МОРСКИМ АВТОНОМНЫМ НАДВОДНЫМ СУДНОМ В ПОРТОВЫХ ВОДАХ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ КОНВЕНЦИОНАЛЬНЫХ НАВИГАЦИОННЫХ ТЕХНИЧЕСКИХ СРЕДСТВ

А. В. Брыляков

Государственный морской университет имени адмирала Ф. Ф. Ушакова,
Новороссийск, Российская Федерация

Работа посвящена анализу особенностей дистанционного управления морским автономным надводным судном в портовых водах с использованием данных, полученных от конвенционных навигационных технических средств. Отмечается, что для эффективной работы автоматизированной навигационной системы управления морским автономным надводным судном необходимо развивать систему мониторинга. Задачей этой системы является сбор данных с технических средств управляемого объекта в режиме реального времени, их анализ с последующим определением и прогнозированием состояния судна (безопасное оно или нет) с необходимой достоверностью. На основе этих результатов формируются

возможные варианты сценариев для поддержания безопасности судна, что помогает принять оптимальное решение автоматизированной навигационной системе или внешнему капитану. Приведены отличия в управлении классическим судном с экипажем на навигационном мостике от дистанционного управления морским автономным надводным судном внешним капитаном в условиях порта. Выполнен расчет точности решения классических задач судовождения на основе международных и национальных требований к измерительным возможностям только конвенционной навигационной аппаратуры применительно к дистанционному управлению, без детализации характеристик отдельных моделей оборудования. Выполнено сравнение полученных результатов расчетов с международными и национальными требованиями по безопасности мореплавания, позволяющее выявить слабые места в используемых технологиях и разработать рекомендации по улучшению качества навигационных данных для успешного выполнения морских операций типа судно – судно в дистанционном режиме управления в портовых водах. Отмечается важность разработки новых технологий для автономного управления судном, которые смогут компенсировать недостатки существующих навигационных средств и повысить безопасность мореплавания в портовых условиях.

Ключевые слова: портовые воды, автономное судовождение, ходовая вахта, дистанционное управление, навигационные технические средства, обеспечение безопасности мореплавания, полная функциональная эквивалентность.

Для цитирования:

Брыляков А. В. Анализ особенностей дистанционного управления морским автономным надводным судном в портовых водах с использованием конвенциональных навигационных технических средств / А. В. Брыляков // Вестник Государственного университета морского и речного флота имени адмирала С. О. Макарова. — 2025. — Т. 17. — № 2. — С. 195–207. DOI: 10.21821/2309-5180-2025-17-2-195-207. — EDN GRSFHH.

Введение (Introduction)

Правительство Российской Федерации заинтересовано в развитии отечественных технологий. В связи с этим, в соответствии с дорожной картой «Маринет», с 2016 г. активно разрабатываются технические средства автономного (бэзэкипажного) судовождения с целью их внедрения на грузовых судах гражданского флота¹. Технологии автоматизации движения судна по маршруту были реализованы в судовых автопилотах в начале 1990-х гг. [1]. Практика применения такого управления движением судна по заданному маршруту не нашла применения, так как она способствовала ослаблению контроля несения ходовой вахты и, как следствие, косвенно явилась причиной увеличения числа морских аварий.

К новым инновационным технологиям в процессе решения вопроса автономности судов [2] предъявляются требования о соблюдении общих правил обеспечения безопасности мореплавания по принципу *полной функциональной эквивалентности*. Эти требования направлены на то, чтобы реализованные технологии автономного судовождения были идентичны в основных функциональных возможностях классическому судовождению (судам с экипажем на борту) с соблюдением Международных правил предупреждения столкновения с судами (МППСС-72) независимо от навигационной обстановки и погодных условий, потери спутникового позиционирования или связи с внешним постом управления, чтобы они имели возможность распознавания навигационных опасностей и т. д.

В литературе, посвященной безэкипажному судовождению [2]–[4], [7], рассмотрены методы автономного управления судами (в зависимости от категории автономности) применительно к их автоматизированному плаванию по запланированному маршруту с выполнением условий безопасности мореплавания. Таким образом, работа исследователей и разработчиков направлена на то, чтобы морские автономные надводные суда (МАНС) в дистанционном или автономном режиме управления соблюдали безопасную дистанцию при движении с другими надводными объектами и навигационными опасностями. Однако выполнение указанных условий рассматривается преимущественно для плавания в открытом море на относительно больших дистанциях от навигационных опасностей.

¹ План мероприятий («Дорожная карта») «МариНет» Национальной технологической инициативы. [Электронный ресурс]. Режим доступа: https://nti2035.ru/markets/docs/DK_marinet.pdf (дата обращения: 26.11.2024).

Целью данной работы является анализ особенностей дистанционного управления МАНС (3-й категории автономности) в портовых водах при условии использования данных, полученных от конвенционных навигационных технических средств.

Для достижения поставленной цели необходимо решить следующие задачи:

1. Выделить отличия в управлении судном на классическом экипажном навигационном мостике от дистанционного управления МАНС (3-й категории автономности) *внешним капитаном* в условиях порта.
2. На основе международных и национальных требований к измерительным возможностям навигационной аппаратуры выполнить расчет точности классических задач судовождения, которые должны выполняться дистанционно, без детальных характеристик конкретных моделей разных производителей.
3. Сравнить полученные результаты расчетов с международными и национальными требованиями к навигационной безопасности мореплавания.

Методы и материалы (Methods and Materials)

Выполнение задач необходимо начать с детального рассмотрения МАНС. Новые методы управления получили возможность реализации благодаря установке на судах навигационных оптических систем видеонаблюдения, позволяющих автоматизировать непрерывное визуальное наблюдение за окружающей обстановкой в соответствии с правилами МППСС-72. При этом основными источниками о навигационной обстановке вокруг управляемого судна являются конвенционные технические средства, утвержденные правилами РМРС и ИМО². Переход к автоматизации управления происходит поэтапно непосредственно под контролем человека, поэтому безэкипажное судовождение сначала рассматривается в дистанционном режиме, а затем в автономном в соответствии с НД № 2–030101–037 «Положение по классификации морских автономных и дистанционно управляемых надводных судов (МАНС). — СПб.: Российский морской регистр судоходства, 2020. — 96 с. и публикацией [5]. Примером такого внедрения технологий являются грузовые МАНС, способные маневрировать в автономном или дистанционном режиме управления в открытом море от ТВЛ одного порта до ТВЛ другого [4].

Вне зависимости от категории автономности или наличия людей на борту, автономное судно является самоходным судном, процессы управления движением которого не требуют непрерывной ходовой вахты³. Отсутствие постоянного контроля человека за процессом движением судна в основном реализуется за счет возложения обязанностей несения вахты на автоматизированную навигационную систему (АНС).

Анализ научной литературы, посвященной АНС, в частности «Положения по классификации морских автономных и дистанционно управляемых надводных судов (МАНС)» НД № 2–030101–037. — СПб.: Российский морской регистр судоходства, 2020. — 96 с., и библиографических источников [4]–[7], показывает, что на АНС возложено выполнение следующих функций в автоматическом режиме:

- контроль и анализ окружающей обстановки;
- планирование и следование по маршруту в место назначения;
- маневрирования с учетом положений МППСС-72 и навигационных опасностей.

Для реализации указанных функций в аппаратной части АНС должна обладать дополнительными возможностями. Например, автоматизированное маневрирование судна с целью расхождения с другим судном связано с такими процессами в АНС, как генерация альтернативных решений (траекторий) и, как следствие, выбор окончательного маневра (принятия конкретного решения).

² Правила по оборудованию морских судов, ч. V. Навигационное оборудование. СПб.: Российский морской регистр судоходства. [Электронный ресурс]: Режим доступа: <https://lk.rs-class.org/regbook/rules> (дата обращения: 27.11.2024).

³ Российская Федерация. Законы. Кодекс торгового мореплавания Российской Федерации: Федеральный закон № 81-ФЗ [Электронный ресурс]: Режим доступа: https://www.consultant.ru/document/cons_doc_LAW_22916/?ysclid=m56qzjb4fn451640431 (дата обращения: 27.11.2024).

Очевидно, что любая реализация АНС является следующим шагом в развитии систем поддержки принятия решения (СППР). В научных работах [8], [9], посвященных исследованию СППР, выделяют их слабое место в процессе технической реализации — *систему мониторинга*, основной задачей которой является то, чтобы в процессе получения информации от внешних и внутренних датчиков в режиме реального времени непрерывно анализировать текущую обстановку с целью оценки и прогнозирования состояния судна (опасное или безопасное) с необходимой достоверностью (точностью и дискретностью). Результаты работы системы мониторинга оказывают влияние на формирование альтернативных решений по обеспечению безопасности судна и, в итоге, на принятие окончательного решения.

На основании ранее изложенного необходимо проанализировать требования, предъявляемые к системе мониторинга автономного судна (3-я категория автономности) при дистанционном управлении в портовых водах. Особое внимание следует уделить дискретности и точности информации о текущей навигационной обстановке, вырабатываемой этой системой автономного судна.

Основные отличия в условиях плавания в портовых водах и в открытом море:

1. *Стесненные условия плавания* — инфраструктура, якорные места, оживленный трафик пассажирских, грузовых, специализированных и вспомогательных судов разного тоннажа, совместный с навигационными опасностями на относительно близкой дистанции судов друг от друга.

2. *Наличие локальных правил плавания* — местные правила могут иметь отличие от международных и должны быть заранее учтены в АНС.

3. *Увеличение рисков плавания* — любое изменение в навигационной обстановке во время следования в портовых водах значительно усиливает влияние рисков на судно относительно открытого моря.

4. *Локальные гидрометеорологические условия* — наличие местных уникальных погодных явлений и переменчивое влияние ветра, течения, приливов в разных районах одного порта.

5. *Операции*. Порт — это защищенное и оборудованное место для различных взаимодействий: *судно – берег, судно – судно*. Поэтому применительно к теме автономного судовождения необходимо исходить не только из задач следования в стесненных условиях и динамичной среды с соблюдением безопасной дистанции с другими объектами, но и рассматривать требования для автоматизации взаимодействия *судно – судно, судно – берег*.

Указанные условия определяют необходимость усиления ходовой вахты в классическом судовождении. Если на судне с экипажем на борту во время прохода в портовых водах все слабые места навигационного оборудования компенсируются хорошей морской практикой и опытом экипажа, то для автономного плавания необходимо устранить подобные недостатки в технических средствах, которые вызывают споры в вопросах реализации автономного судовождения.

Отличие в назначении навигационных средств для судов с экипажем на борту и без него заключается в том, что измерительные приборы на классическом навигационном мостике предназначены для предоставления информации лицу, принимающему решения (ЛПР), в целях оказания помощи в более детальной оценке навигационной обстановки. Принятие решения и дальнейшее управление судном производится исходя из опыта и восприятия экипажа на борту. Под восприятием подразумевается способность людей чувствовать инертные характеристики судна, такие как тормозной путь, время реакции на изменение курса или скорости, а также отслеживать изменения окружающей обстановки, включая движение других судов, навигационные опасности и погодные условия. Такое восприятие основывается на собственных чувствах людей, таких как зрительное наблюдение, ощущение движения, слуховое восприятие и способность предвидеть возможные ситуации. При дистанционном управлении МАНС бортовые технические средства должны передавать в центр дистанционного управления (ЦДУ) информацию

о состоянии управляемого объекта для *внешнего капитана* в удобном и наглядном виде, чтобы ЛПР ЦДУ мог адекватно анализировать в реальном времени происходящие изменения навигационной обстановки, прогнозировать последствия своего действия или бездействия и оперативно реагировать на нештатные ситуации.

Основной задачей судовождения является обеспечение безопасного, эффективного и экономичного перемещения судна из одного пункта в другой. В рамках управления движением судовождение включает следующие задачи: точность позиционирования, контроль местоположения и движения судна, обеспечение навигационной безопасности судна.

Точность позиционирования. Резолюция ИМО А. 1046 (27) определяет нормативные требования к точности координат при наличии на судне радионавигационных систем. Согласно этой резолюции ИМО, допустимая величина погрешности определения места в стесненных водах составляет не более 10 м с вероятностью 0,95, а интервал дискретности обновления координат — не более 2 с. Национальными правилами РМРС⁴ применительно к автономным судам установлены требования к точности позиционирования при маневрировании в порту, равной 1 м.

В современном гражданском судовождении основными источниками позиционирования, которые могут соответствовать международным и национальным требованиям, являются:

1. *Глобальные навигационные спутниковые системы* (ГНСС). Приемник ГНСС, согласно документам^{5, 6}, работе [5], данным Мореходных таблиц (МТ-2000). № 9011. — СПб.: ГУНиО МО РФ, 2002. — 576 с., способен определять позицию с погрешностью 13–36 м в стандартном режиме и 1–5 м в дифференциальном.

2. *Радиолокационная станция* (РЛС). Правилами MSC.192(79) и РМРС⁷ установлены следующие требования к работе радара:

- результаты измерения дистанции должны иметь погрешность не более 30 м или 1 % от максимального значения используемой шкалы дальности в зависимости от того, что больше;
- пеленг с погрешностью не более 1°.

Точность определения места судна (ОМС) с помощью радара рассчитывается с помощью радиальной средней квадратичной погрешности M_o и зависит от следующих факторов:

- дистанции до ориентиров D ;
- взаимного расположения ориентиров относительно судна;
- средней квадратичной погрешности навигационного параметра (СКП НП) пеленга m_n или дистанции m_D , а также способов ОМС (см. *Дмитриев В. И.* Навигация и лоция: учеб. для студентов (курсантов), обучающихся по специальности 240200 «Судовождение» в вузах водного транспорта. — М.: Академкнига, 2004. — 471 с.):
- по трем дистанциям:

$$M_o = \frac{\sqrt{3}m_D}{\sqrt{\sin^2 \theta_1 + \sin^2 \theta_2 + \sin^2 (\theta_1 + \theta_2)}}, \quad (1)$$

где θ — углы пересечения между линиями положения (ЛП);

⁴ НД № 2–030101–037. Положения по классификации морских автономных и дистанционно управляемых надводных судов (МАНС). СПб.: Российский морской регистр судоходства, 2020. 96 с.

⁵ The International Association of Marine Aids to Navigation and Lighthouse Authorities (IALA): [сайт]. URL: <https://www.iala.int> (дата обращения: 27.11.2024).

⁶ Руководство по эксплуатации «NavCom Gamma 10П». НАДС.468137.030РЭ. [Электронный ресурс]: Режим доступа: https://navmarine.ru/wa-data/public/site/documents/gnss/navcom_gamma_10_p_re_210524.pdf (дата обращения: 26.11.2024).

⁷ Правила по оборудованию морских судов, ч. V. Навигационное оборудование. СПб.: Российский морской регистр судоходства. [Электронный ресурс]: Режим доступа: <https://lk.rs-class.org/regbook/rules> (дата обращения: 27.11.2024).

– по трем пеленгам:

$$M_o = \frac{m_n^0}{57,3} \sqrt{\frac{D_1^2 D_2^2 + D_2^2 D_3^2 + D_3^2 D_1^2}{D_1^2 \sin^2 \alpha + D_2^2 \sin^2 \beta + \sin^2(\alpha + \beta)}}, \quad (2)$$

где α, β — углы между пеленгами;

– по пеленгу и дистанции:

$$M_o = \sqrt{\left(\frac{m_n^0 D}{57,3}\right)^2 + m_D^2}. \quad (3)$$

Для сравнения точности позиционирования с помощью морского радара указанными способами зададим следующие параметры:

- СКП радиолокационного пеленга $m_n = 1^\circ$, в соответствии с требованиями ИМО и средним значением, согласно табл. 4.3 МТ-2000;
- углы α, β, θ между пеленгами и между ЛПП имеющие оптимальное значение, равное 60° ;
- СКП дистанции m_D радара, которая может трактоваться по-разному или исходя из практики в соответствии с требованиями либо на основе теории и следующих возможностей радара: $m_D = 30$ м или 1 % от используемой шкалы дальности, в зависимости от того что больше^{8,9}; $m_D = 0,005D$ (см. Мореходные таблицы (МТ-2000). № 9011. — СПб.: ГУНиО МО РФ, 2002. — 576 с.).

Таким образом, получим следующие графики зависимости радиальной СКП ОМС от дистанции до ориентиров до 4 миль, так как рассматриваем плавание в портовых водах (рис. 1, табл. 1).

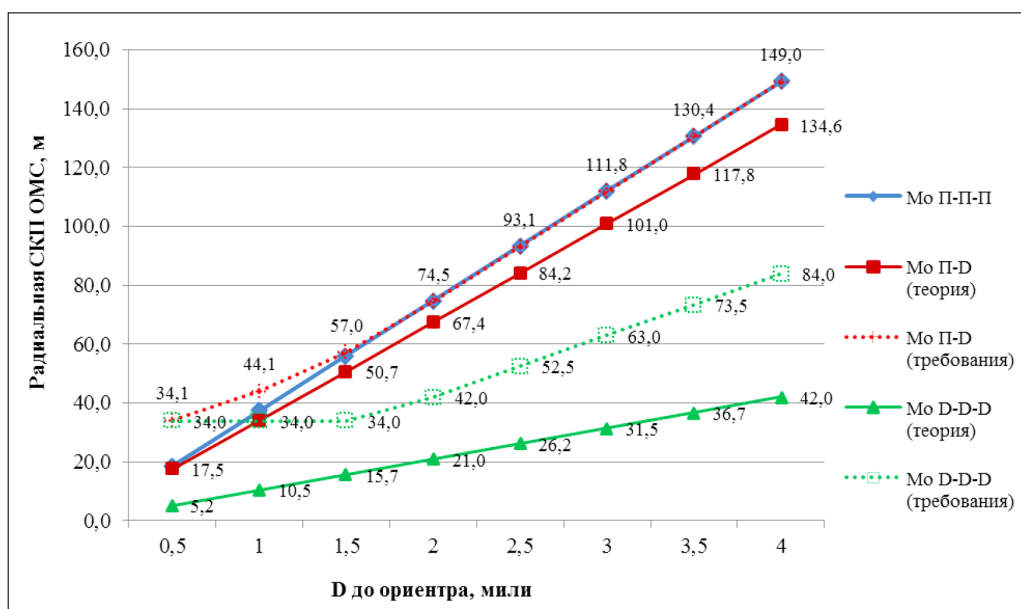


Рис. 1. Зависимость радиальной СКП ОМС от дистанции до ориентиров

⁸ Resolution MSC.192(79). Adoption of the revised performance standards for radar equipment. IMO, 2004 [Электронный ресурс]. Режим доступа: [https://www.wcdn.imo.org/localresources/en/KnowledgeCentre/IndexofIMOResolutions/MSCResolutions/MS.C.192\(79\).pdf](https://www.wcdn.imo.org/localresources/en/KnowledgeCentre/IndexofIMOResolutions/MSCResolutions/MS.C.192(79).pdf) (дата обращения: 27.11.2024).

⁹ Правила по оборудованию морских судов, ч. V: Навигационное оборудование. СПб.: Российский морской регистр судоходства. [Электронный ресурс]: Режим доступа: <https://lk.rs-class.org/regbook/rules> (дата обращения: 27.11.2024).

Таблица 1

Зависимость радиальной СКП ОМС от дистанции до ориентиров

Дистанция до ориентира, мили	M_o п-п-п (радиочастотные пеленги), м	M_o п-п-п (визуальные пеленги), м	M_o п-Д (теория), м	M_o п-Д (требования), м	M_o D-D-D (теория), м	M_o D-D-D (требования), м
0,5	18,7	9,3	17,5	34,1	5,2	34,0
1,0	37,3	18,7	34,0	44,1	10,5	34,0
1,5	56,0	28,0	50,7	57,0	15,7	34,0
2,0	74,6	37,3	67,4	74,5	21,0	42,0
2,5	93,3	46,7	84,2	93,1	26,2	52,5
3,0	112,0	56,0	101,0	111,8	31,5	63,0
3,5	130,6	65,3	117,8	130,4	36,7	73,5
4,0	149,3	74,6	134,6	149,0	42,0	84,0

На судах используется СКП пеленга $m_n = 0,5^\circ$, так как согласно требованиям *хорошей морской практики* при верификации позиции пеленг определяется визуально, а дальность — с морского радара. На рис. 1 показан график при СКП радиопеленга $m_n = 1^\circ$ для того, чтобы показать радиальную погрешность позиции при дистанционном определении местоположения МАНС с помощью радара.

Контроль местоположения и движения судна является ключевой задачей судовождения, обеспечивающей безопасное управление судном в реальном времени. Эта задача заключается в постоянном отслеживании координат, курса, скорости и траектории перемещения с использованием современных навигационных средств. Особенность ее состоит в том, что информация о местоположении и движении должна обновляться максимально быстро, чтобы оставаться актуальной, особенно в сложных условиях, таких как узкости или высокая плотность судоходства. Эффективность методов оценивается по точности определения координат, времени их получения и частоте обновления данных. Для выполнения данной задачи применяются различные технические средства, каждое из которых имеет свои особенности и преимущества:

1. *ГНСС*. Согласно публикациям [5], [10] известно, что аппаратура ГНСС позволяет получать непрерывные координаты с дискретностью не более 1 с, что дает возможность в режиме онлайн контролировать элементы движения судна в абсолютных значениях: *Latitude*, *Longitude*, *Course over Ground (COG)*, *Speed over Ground (SOG)* и др.

2. *РЛС*. Известные ускоренные лощманские методы с помощью морского радара позволяют непрерывно контролировать элементы движения судна относительно выбранного ориентира (без вычисления координат) с точностью в зависимости от выбранного НП (рис. 2):

$$m_{\text{ЛП}} = \frac{m_n}{g}, \quad (4)$$

где $m_{\text{ЛП}}$ — СКП линии положения;

m_n — СКП измеренного НП;

g — градиент НП.

Для радиолокационного пеленга: $m_n = 1,0^\circ$; $g_n = \frac{57,3}{D}$.

Для радиолокационной дистанции: $m_n = 0,005D$; $g_D = 1,0$.

Для параллельного индекса (PI): $m_{\text{ЛПИ}} = \sqrt{m_D^2 + \left(\frac{Dm_n}{57,3}\right)^2}$.

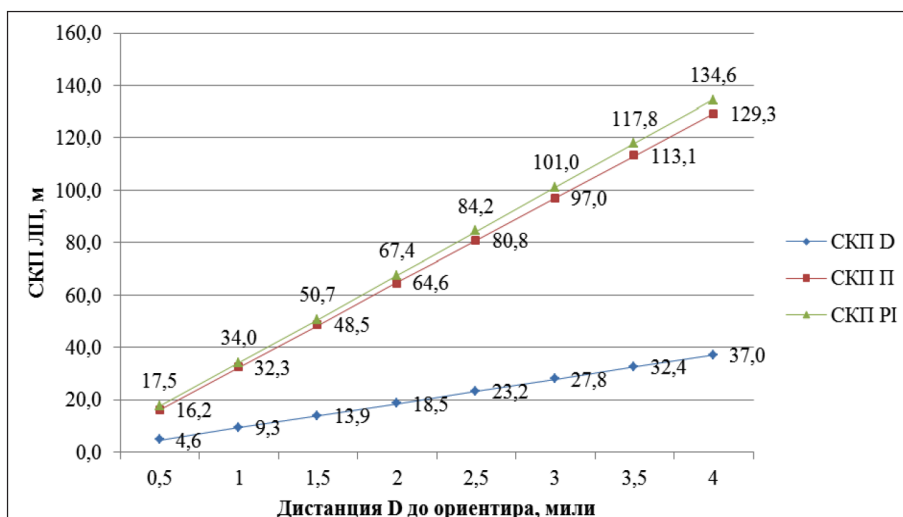


Рис. 2. СКП НП морского радара [10]

Следует отметить, что в современных ECDIS существует функция *Echo Reference*, с помощью которой можно захватить наложенный на электронную карту эхо-сигнал радара и получать рассчитанные координаты своего судна, при этом все указанные погрешности от РЛС будут сохраняться.

3. *Dead Reckoning* (счисление) — автоматизированная функция в ECDIS. Данная функция зависит от точностных характеристик лага, курсоуказателя и точности начальной обсервации. Данная опция ECDIS будет непрерывно определять и отображать координаты, погрешность которых находится в зависимости от времени согласно формуле МТ-2000:

$$M_c = \sqrt{M_o^2 + M_c^2(t)}, \quad (5)$$

где M_c — РСКП текущего счислимого места судна;

M_o — РСКП исходного обсервованного места судна;

$M_c(t)$ — РСКП счисления в зависимости от времени от исходной обсервации, определяемой по формуле

$$M_c(t) = \begin{cases} 0,7K_c & \text{при } t \leq 2^u; \\ K_c \sqrt{t} & \text{при } t > 2^u, \end{cases} \quad (6)$$

где K_c — коэффициент точности счисления можно взять из табл. 4.9а МТ-2000 или рассчитать по формуле

$$K_c = 0,01 \sqrt{K_{\text{пу}}^2 + K_v^2 + K_{K_r}^2 + K_{v_r}^2}, \quad (7)$$

где $K_{\text{пу}}$ — коэффициент погрешности направления движения судна относительно воды;

K_v — коэффициент погрешности скорости движения судна относительно воды;

K_{K_r} — коэффициент погрешности направления действующего течения;

K_{v_r} — коэффициент погрешности скорости действующего течения.

Для анализа, принимая значение $K_c = 0,1$ согласно МТ-2000 в качестве оптимального коэффициента и взяв изначальную обсервацию от разного оборудования, составим табл. 2.

Таблица 2

Зависимость счислимого места от времени и начальной обсервации

M_o (изначальная обсервация)		K_c	t , мин	$M_c(t)$, м	M_c , м
Источник	Точность, м				
DGNSS	1–3	0,1	1–3	2,2–8,6	2,4–8,7
РЛС	5,2–10,0	0,1	1–3	2,2–8,6	5,6–10,1

Обеспечение навигационной безопасности судна. На мостике обеспечение навигационной безопасности судна выполняется за счет постоянного наблюдения, оценки опасности столкновения и маневрирования с целью взаимодействия с другими объектами. Не учитывая данные, нанесенные на навигационные карты (глубины, изобаты, СНО и т. д.), для получения информации об окружающих надводных объектах вокруг судна и ее оценки используют следующие автоматизированные средства:

1. *РЛС*. На основе обработки радиолокационной информации система автоматической радиолокационной прокладки (САРП) способно определять параметры движения надводных целей и сближения с ними. Согласно Резолюции MSC.192(79) и правилам РМРС¹⁰, предъявляемым к РЛС и САРП, установлены следующие требования, представленные в табл. 3 и 4.

Таблица 3

Требования к минимальной дальности обнаружения РЛС

Описание цели ¹	Характеристика цели, высота над уровнем моря, м	Дальность обнаружения, мили ²	
		Диапазон 3 см	Диапазон 10 см
Береговая черта	Возвышение до 60 м	20,0	20,0
Береговая черта	Возвышение до 6 м	8,0	8,0
Береговая черта	Возвышение до 3 м	6,0	6,0
Суда валовой вместимостью > 5000	10,0	11,0	11,0
Суда валовой вместимостью > 500	5,0	8,0	8,0
Маломерное судно с радиолокационным отражателем ³	4,0	5	3,7
Навигационный буй с угловым отражателем ⁴	3,5	4,9	3,6
Навигационный буй ⁵	3,5	4,6	3,0
Маломерное судно длиной 10 м без радиолокационного отражателя ⁶	2,0	3,4	3,0

¹ Радиолокационные отражатели рассматриваются как точечные цели, суда — как сложные цели, а береговая черта — как распределенные цели (указано среднее возвышение скалистой береговой черты с учетом ее профиля).

² Допускается изменение дальности обнаружения в зависимости от различных факторов, таких как атмосферные условия, скорости цели, ее ракурса, материала и конструкции корпуса цели.

³ Эффективная площадь рассеяния (ЭПР) радиолокационного отражателя должна быть: 7,5 м² — для диапазона 3 см и 0,5 м² — для диапазона 10 см.

⁴ ЭПР углового отражателя должна быть: 10 м² — для диапазона 3 см и 1 м² — для диапазона 10 см.

⁵ Навигационный буй должен иметь ЭПР: 5 м² — для диапазона 3 см и 0,5 м² — для диапазона 10 см.

Для буйв ограждения фарватера и имеющих ЭПР 1,0 м² (в диапазоне 3 см) и 0,1 м² (в диапазоне 10 см) при высоте 1 м их дальность обнаружения должна быть 2,0 и 1,0 мили соответственно.

⁶ ЭПР маломерного судна длиной 10 м должна быть: 2,5 м² для диапазона 3 см и 1,4 м² — для диапазона 10 см.

¹⁰ Правила по оборудованию морских судов, ч. V: Навигационное оборудование. СПб., Российский морской регистр судоходства. [Электронный ресурс]: Режим доступа: <https://lk.rs-class.org/regbook/rules> (дата обращения: 27.11.2024).

Таблица 4

Погрешности определения параметров движения целей САРП РЛС (с вероятностью 95 %)

Время сопровождения, мин	Относительный курс, град.	Относительная скорость, уз	$D_{кр}$, мили	$T_{кр}$, мин	Истинный курс, град.	Истинная скорость, уз
1 мин — тенденция движения	11	1,5 или 10 % (в зависимости от того, что больше)	1	—	—	—
3 мин — перемещение цели	3	0,8 % или 1 % (в зависимости от того, что больше)	0,3	0,5	5	0,5 или 1 % (в зависимости от того, что больше)

Допускается значительное ухудшение точности определения параметров движения цели при соблюдении следующих условий:

- короткий промежуток времени после захвата;
- маневр собственного судна;
- маневр цели;
- срыв сопровождения;
- изменение погрешностей датчиков.

Погрешности измерения дальности и пеленга цели должны быть не более:

- по дальности — 50 м (или 1 % от дальности до цели);
- по направлению — 2°.

Согласно требованиям РС, частота вращения антенны РЛС должна быть не менее 18 об/мин.

2. Автоматическая идентификационная система (АИС). Согласно Резолюции А.1106 (29), АИС передает свою и получает от других судов статическую и динамическую информацию, маршрутные данные и может обмениваться сообщениями по безопасности. В зависимости от навигационного статуса судна АИС передает свою динамическую информацию со следующей дискретностью (табл. 5).

Таблица 5

Интервалы передачи динамической информации¹¹

Навигационный статус судна	Интервал передач динамической информации
Судно на якорной стоянке или на ходу со скоростью не более 3 уз	3 мин
Судно на якорной стоянке или на ходу со скоростью более 3 уз	10 с
Судно на ходу (скорость 0–14 уз)	10 с
Судно на ходу (скорость 0–14 уз) при изменении курса	3,3 с
Судно на ходу (скорость 14–23 уз)	6 с
Судно на ходу (скорость 14–23 уз) при изменении курса	2 с
Судно на ходу (скорость более 23 уз)	2 с
Судно на ходу (скорость более 23 уз) при изменении курса	2 с

Таким образом, детально рассмотрены ключевые задачи судовождения, включая обеспечение точности позиционирования, контроль местоположения и движения судна, а также поддержание навигационной безопасности. Для решения этих задач применяются современные технические средства, соответствующие международным и национальным конвенционным требованиям, такие как ГНСС, РЛС, ECDIS и АИС.

¹¹ Resolution A.1106(29). Revised guidelines for the onboard operational use of shipborne automatic identification systems (AIS). IMO, 2015 [Электронный ресурс]. Режим доступа: [https://www.wcdn.imo.org/localresources/en/OurWork/Safety/Documents/AIS/Resolution%20A.1106\(29\).pdf](https://www.wcdn.imo.org/localresources/en/OurWork/Safety/Documents/AIS/Resolution%20A.1106(29).pdf) (дата обращения: 27.11.2024).

Результаты (Results)

1. Позиционирование. Исходя из национальных требований РМРС, предъявляемых к автономным судам, можно достичь маневрирования в порту с точностью 1 м в случае, если использовать ГНСС-позиционирование с дифференциальными поправками.

Относительно требований ИМО, в которых пока не определены требования к МАНС, можно теоретически достичь точности местоположения до 10 м дополнительно к DGNSS с помощью РЛС, используя метод по трем дистанциям при плавании не далее 1 мили от ориентиров, исходя не из требований к радару (СКП 30 м^2), а из возможности его измерения по формулам (1) и (4). Кроме того, на способность позиционирования по РЛС оказывают влияние опыт судоводителя (*внешнего капитана*) и форм-фактор береговых ориентиров.

2. Контроль местоположения и движения судна. Дополнительно к DGNSS (COG, SOG) с помощью РЛС можно непрерывно контролировать элементы движения судна с точностью до 10 м, используя НП (пеленг, дистанция, PI), при плавании не далее 1 мили от ориентиров. С помощью опции ECDIS (*Echo Reference*) через РЛС можно получать непрерывные координаты судна.

Dead Reckoning (DR) ECDIS в состоянии удерживать заданную точность на очень короткое время при условии, если *внешний капитан* дистанционно-управляемого судна непрерывно выявляет элементы сноса из-за влияния внешней среды. Данную функцию можно использовать, чтобы дать время судоводителю выбрать ориентир, опознать его и выполнить расчет обсервации или все указанные действия может выполнить АНС.

3. Проблемы позиционирования и контроля движения судна. DGNSS и РЛС подвержены влиянию внешней среды. Спутниковые навигационные системы глушатся наземной аппаратурой непосредственно в портовых водах или теряется сигнал для дифференциальных поправок. Результаты позиционирования по РЛС, уступающих спутниковым средствам в точности, ухудшаются также из-за влияния следующих факторов: увеличение дистанции, метеорологические явления, близость других РЛС, индивидуальная настройка и т. д.

4. Оценка навигационной обстановки. Совместное использование АИС и РЛС при дистанционном управлении МАНС (3-я категория автономности), как известно, неспособно выполнять постоянное круговое наблюдение. АИС зависит от работы ГНСС, от ее установки на других объектах и может иметь задержки в передаче данных. РЛС имеет ряд ограничений, такие как неспособность обнаружения маленьких объектов и не дает полноту картины ракурса окружающих судов, что будет затруднять выполнения правил МППСС-72 и т. д., так как РЛС изначально предназначен только для помощи судоводителю в оценке навигационной обстановки. Поэтому для автономных судов необходима установка дополнительного оборудования кругового видеонаблюдения с возможностью автоматического распознавания образов обнаруженных объектов, например, обзорно-поисковой системы (ОПС) [4], которая дополнительно даст возможность определять местоположение судна и выявлять элементы движения других надводных объектов.

Постоянный контроль навигационной обстановки выполняется с целью управления движением судна относительно других объектов, а именно: *расхождение* или *сближение* (для морских операций типа *судно – судно*). Обе указанные задачи зависят от точности измерений. Для того, чтобы дистанционно управляя МАНС без человека на борту, намеренно приближаться к другому объекту, измерительных способностей АИС (1–3 м) и РЛС (0,005D) явно недостаточно. Для сближения с другим судном в дистанционном режиме управления движением необходимо учитывать дополнительные факторы к стандартным данным от САРП (координаты всех точек корпуса судна; ракурс образа; продольную, поперечную и угловую скорость) и их погрешности при измерении на маленькой дистанции (от 5 м и до касания). Таким образом, для выполнения подобных операций на МАНС должны быть установлены измерительные средства в дополнение к конвенционным навигационным приборам экипажного судовождения, такие как измерители малых расстояний на основе оптических устройств (ОПС, лидары и др.).

¹² Правила по оборудованию морских судов, ч. V: Навигационное оборудование. СПб.: Российский морской регистр судоходства. [Электронный ресурс]: Режим доступа: <https://lk.rs-class.org/regbook/rules> (дата обращения: 27.11.2024).

Выводы (Summary)

В результате проведенного исследования можно сделать следующие выводы:

1. Выделено отличие классического судовождения с экипажем на борту от дистанционного управления МАНС (3-й категории управления) при условии плавания в портовых водах. В первом случае управление судном выполняется при усиленной навигационной вахте, а недостатки конвенционных навигационных приборов компенсируются опытом экипажа. Во втором случае один *внешний капитан* должен получать информацию о навигационном состоянии управляемого объекта в удобной и наглядной форме для возможности отслеживания изменений навигационной обстановки в режиме реального времени, прогнозирования последствий своих действий или бездействия и быстрого реагирования на нештатные ситуации.

2. Используя разные методы классических задач судовождения, выполнен расчет РСКП ОМС и СКП ЛП в метрах в зависимости от дистанции до ориентира на основе данных только от РЛС (СКП радиопеленга $m_n = 1^\circ$) применительно к дистанционному управлению без визуального контроля. Выделено отличие в результатах расчетов РСКП ОМС в зависимости от СКП дистанции m_D , рассчитанное по формуле или взятое исходя из международных требований к РЛС. Результаты представлены на графиках.

3. Выполнен сравнительный анализ результатов расчетов РСКП ОМС и СКП ЛП применительно к дистанционному управлению без визуального контроля на соответствие международным и национальным требованиям навигационной безопасности мореплавания.

4. Отмечены недостатки конвенционного навигационного оборудования для дистанционного управления МАНС (3-я категория управления) в портовых водах, особенно в вопросе его использования для сложных морских операций типа *судно – судно*.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Вагущенко Л. Л. Системы автоматического управления движением судна / Л. Л. Вагущенко, Н. Н. Цымбал. — 2-е изд., перераб. и доп. — Одесса: Латстар, 2002. — 310 с.
2. Пинский А. С. Е-Навигация и безэкипажное судовождение / А. С. Пинский // Транспорт Российской Федерации. — 2016. — № 4(65). — С. 50–54. — EDN WMAHYT.
3. Москаленко М. А. Технологии автономного судоходства, тенденции и перспективы / М. А. Москаленко, С. Е. Черняхович, И. И. Пушкарев, А. В. Титов // Морские интеллектуальные технологии. — 2023. — № 1–1(59). — С. 18–28. DOI: 10.37220/MIT.2023.59.1.001. — EDN BGJEZU.
4. Корнев А. С. Автономное судовождение на действующих судах / А. С. Корнев, А. С. Скрыпка, С. П. Хабаров // Морской вестник. — 2022. — № 1(81). — С. 92–95. — EDN MIPIOP.
5. Буцанец А. А. Организация системы дистанционного управления беспилотным техническим флотом для обеспечения судоходства на внутренних водных путях: дисс. на соискание ученой степени канд. техн. наук; специальность: 05.22.19 «Эксплуатация водного транспорта, судовождение» / А. А. Буцанец. — СПб.: ГУМРФ им адм. С. О. Макарова, 2021. — EDN MFMQJR.
6. Янчин И. А. К вопросу об автономных и безэкипажных судах: вызовы и преимущества для отрасли информационных технологий и телекоммуникаций / И. А. Янчин, О. Н. Петров // T-Comm: Телекоммуникации и транспорт. — 2020. — Т. 14. — № 11. — С. 46–56. DOI: 10.36724/2072-8735-2020-14-11-46-56. — EDN ODUSHF.
7. Дмитриев В. И. Методы обеспечения безопасности мореплавания при внедрении беспилотных технологий / В. И. Дмитриев, В. В. Каретников // Вестник государственного университета морского и речного флота им. адмирала С. О. Макарова. — 2017. — Т. 9. — № 6. — С. 1149–1158. DOI: 10.21821/2309-5180-2017-9-6-1149-1158. — EDN YLUEYQ.
8. Астреин В. В. О проблеме и задачах автоматического мониторинга в СППР безопасности судовождения / В. В. Астреин, С. И. Кондратьев // Эксплуатация морского транспорта. — 2022. — № 2(103). — С. 148–153. DOI: 10.34046/aumsuomt103/1. — EDN QRMJGL.
9. Астреин В. В. Математические методы принятия решений в СППР безопасности судовождения / В. В. Астреин // Эксплуатация морского транспорта. — 2020. — № 3(96). — С. 64–74. DOI: 10.34046/aumsuomt96/9. — EDN IMBIZX.

10. Васьков А. С. Контроль движения судна по навигационным параметрам и параллельным индексам / А. С. Васьков, А. А. Мироненко // Вестник государственного университета морского и речного флота им. адмирала С. О. Макарова. — 2022. — Т. 14. — № 6. — С. 826–836. DOI: 10.21821/2309-5180-2022-14-6-826-836. — EDN PLVFQU.

REFERENCES

1. Vaguschenko, L. L. and N. N. Tsymbal. *Sistemy avtomaticheskogo upravleniya dvizheniem sudna* Second edition. Odessa: Latstar, 2002: 310.
2. Pinskiy, A. S. “E-Navigation and unmanned ship navigation.” *Transport Rossiyskoy Federatsii* 4(65) (2016): 50–54.
3. Moskalenko, M. A., S. E. Chernyakhovich, I. I. Pushkarev and A. V. Titov. “Autonomous shipping technologies, trends and prospects.” *Morskie intellektual'nye tekhnologii* 1–1(59) (2023): 18–28. DOI: 10.37220/MIT.2023.59.1.001.
4. Korenev, A. S., A. S. Skrypka and S. P. Khabarov. “Avtonomnoe sudovozhdenie na deystvuyuschikh sudakh.” *Morskoy vestnik* 1(81) (2022): 92–95.
5. Butsanets, A. A. Organizatsiya sistemy distantsionnogo upravleniya bespilotnym tekhnicheskimi flotom dlya obespecheniya sudokhodstva na vnutrennikh vodnykh putyakh. PhD diss. SPb., 2021.
6. Yanchin, I. A. and O. N. Petrov. “On autonomous and smart ships: challenges and benefits for compute sciences and telecommunications.” *T-Comm* 14.11 (2020): 46–56. DOI: 10.36724/2072-8735-2020-14-11-46-56.
7. Dmitriev, V. I. and V. V. Karetnikov. “Methods of ensuring the safety of navigation when implement unmanned technology.” *Vestnik gosudarstvennogo universiteta morskogo i rechnogo flota im. admirala S. O. Makarova* 9.6 (2017): 1149–1158. DOI: 10.21821/2309-5180-2017-9-6-1149-1158.
8. Astrein, V. V. and S. I. Kondrat'ev. “On the problem and tasks of automatic monitoring in DSS safety navigation.” *Ekspluatatsiya morskogo transporta* 2(103) (2022): 148–153. DOI: 10.34046/aumsuomt103/1.
9. Astrein, V. V. “Mathematical decision-making methods in dss of navigation safety.” *Ekspluatatsiya morskogo transporta* 3(96) (2020): 64–74. DOI: 10.34046/aumsuomt96/9.
10. Vas'kov, A. S. and A. A. Mironenko. “The ship motion control by navigational parameters and parallel indexes.” *Vestnik gosudarstvennogo universiteta morskogo i rechnogo flota im. admirala S. O. Makarova* 14.6 (2022): 826–836. DOI: 10.21821/2309-5180-2022-14-6-826-836.

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРЕ

Брыляков Андрей Витальевич — аспирант
ФГБОУ ВО «Государственный морской
университет имени адмирала Ф. Ф. Ушакова»
353922, Российская Федерация, г. Новороссийск,
пр. Ленина, 93.
e-mail: brylyakov99@inbox.ru

INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Bryliakov Andrei V. — post-graduate student
Admiral Ushakov Maritime
State University
93 Lenin Ave., Novorossisk, 353918,
Russian Federation
e-mail: brylyakov99@inbox.ru

Статья поступила в редакцию 30 января 2025

Received: Jan 30, 2025

JUSTIFICATION OF THE POSSIBILITY OF PROCESSING CONTAINERIZED BULK CARGOES AT A MARINE TERMINAL

O. A. Izotov, N. S. Polubotko

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

The study examines the feasibility of organizing the delivery and processing of bulk cargo at marine container terminals experiencing reduced cargo turnover due to the sanctions imposed by Western countries. It is emphasized that such a task arises from the need to maximize the transport potential of delivery modes bringing goods to the port and the capacity of transshipment complexes not initially designed for handling bulk cargo. Modeling a transport system capable of optimizing this process necessitates a comprehensive evaluation of the operational performance of transport means throughout the entire route—from the manufacturing plant to the marine container terminal. The paper explores the possibility of developing a model for creating a transport system based on forming a container train unit consisting of "railway platform – bulk containers" and provides a brief description of this concept. During the analysis of related processes, it is highlighted that the accumulation of bulk containers depends on several factors: the circulation period of the circular container train delivering goods to the terminal, delivery schedules, vessel carrying capacity at the terminal, and meteorological conditions that may delay vessel operations. The study presents examples calculating the required number of bulk containers under various projected transport system parameters, including cargo delivery times to the terminal, waiting times for marine tonnage availability, and delays due to atmospheric conditions. The conclusion suggests that employing innovative technologies for handling bulk cargo could lead to significant increases in cargo turnover and expansion of the hinterland boundaries served by the marine terminal.

Keywords: bulk cargoes, cargo accumulation at terminals, container technologies, transport systems, transshipment processes, ship handling, terminal operational efficiency, container trains.

For citation:

Izotov, Oleg A. and N. S. Polubotko "Justification of the possibility of processing containerized bulk cargoes at a marine terminal." *Vestnik Gosudarstvennogo universiteta morskogo i rechnogo flota imeni admirala S. O. Makarova* 17.2 (2025): 208–215. DOI: 10.21821/2309-5180-2025-17-2-208-215.

УДК 656.073.7

ОБОСНОВАНИЕ ВОЗМОЖНОСТИ ОБРАБОТКИ КОНТЕЙНЕРИЗИРОВАННЫХ НАВАЛОЧНЫХ ГРУЗОВ НА МОРСКОМ ТЕРМИНАЛЕ

О. А. Изотов, Н. С. Полуботко

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

Темой исследования является оценка возможности организации доставки и обработки насыпных грузов на морских контейнерных терминалах, испытывающих снижение грузооборота вследствие санкционной политики западных стран. Отмечается, что постановка такой задачи обусловлена необходимостью максимального использования транспортного потенциала видов транспорта, осуществляющих завоз грузов в порт и мощностей перегрузочных комплексов, не ориентированных на обработку насыпных грузов. Моделирование транспортной системы, способной оптимизировать обозначенный процесс, требует всесторонней оценки эксплуатационных показателей работы средств транспорта на всем пути продвижения таких грузов от завода-производителя до морского контейнерного терминала. В работе рассматривается возможность формулировки модели создания транспортной системы на основе формирования транспортной единицы контейнерного поезда «железнодорожная платформа – насыпные контейнеры» и дана ее краткая характеристика. В ходе рассмотрения происходящих процессов подчёркива-

ется, что накопление насыпных контейнеров находится в зависимости от периода обращения кольцевого контейнерного поезда, осуществляющего доставку грузов на терминал, периода подачи, грузоподъемности судна, подлежащего загрузке на терминале, а также метеорологических причин, способных привести к задержке судна под обработкой. В исследовании приведены примеры расчета потребного количества насыпных контейнеров при различных показателях проектируемой транспортной системы: времени завоза грузов на терминал, времени ожидания подачи морского тоннажа, времени ожидания по атмосферным показателям. Сделан вывод о том, что с применением инновационных технологий обработки насыпных грузов морской терминал может ожидать значительного приращения грузооборота и расширения границ своего хинтерленда.

Ключевые слова: насыпные грузы, накопление грузов на терминале, контейнерные технологии, транспортные системы, перегрузочные процессы, обработка судна, эффективность функционирования терминала, контейнерный поезд.

Для цитирования:

Изотов О. А. Обоснование возможности обработки контейнеризированных навалочных грузов на морском терминале / О. А. Изотов, Н. С. Полуботко // Вестник Государственного университета морского и речного флота имени адмирала С. О. Макарова. — 2025. — Т. 17. — № 2. — С.208–215. DOI: 10.21821/2309-5180-2025-17-2-208-215. — EDN HRYNBC.

Введение (Introduction)

В процессе развития морских контейнерных линий отмечаются значительные вложения отечественных инвесторов в наращивание мощностей контейнерных терминалов, которые в период санкционного давления на российские компании потеряли значительную часть своего грузооборота. В поиске перспективных грузов морские контейнерные терминалы используют возможность оснащения площадок специальным техническим оборудованием для перегрузки нетрадиционных для них грузов. Для комплексного решения этих задач необходим учет возможностей смежных видов транспорта, пунктов передачи грузопотоков, складских площадей грузовых терминалов, перегрузочного оборудования пунктов переработки, а также применения инновационных технологий обработки грузов в целях обеспечения выполнения требований единого технологичного процесса на всей цепи доставки [1]. Например, навалочные грузы, имеющие массовый характер, как правило, перевозят без упаковки или с использованием мягких контейнеров. Однако такие варианты не обеспечивают координацию работы видов транспорта, участвующих в процессе доставки на этапе передачи грузов на морской контейнерный терминал для накопления судовой партии. При этом погрузка насыпных грузов контейнерными перегрузчиками с грузовых площадок, оснащенных схемой механизации для хранения и обработки большегрузных контейнеров, способствует резкому снижению эффективности функционирования терминала.

В целях решения данной проблемы разработан и успешно применяется балк-контейнер совместно с наклонным спредером [2]. При этом насыпной груз на тыловой площадке хранения затаривается в балк-контейнер, транспортируется во фронтальную зону и переваливается на морское судно. В результате груз подвергается нескольким дополнительным перегрузкам, хранению на открытых площадках, выветриванию и воздействию других факторов, снижающих его качественные характеристики, а терминал — замусориванию своих площадок, в результате чего вынужден приобретать необходимое дополнительное перегрузочное оборудование, обеспечивающее работу с такими грузами.

Целью работы является оптимизация процесса переработки насыпных грузов на морском терминале путем применения балк-контейнеров на протяжении всей цепочки доставки грузов до борта судна.

Методы и материалы (Methods and Materials)

Доставка грузов, в соответствии с предъявляемыми к перевозке требованиями получателя, основывается на выборе вида транспорта и применяемой технологической схемы. При этом определение связанных с транспортировкой издержек, как правило, зависит от стоимости груза и временным параметрам, заданных клиентом. Приведенные параметры чаще всего минимизируются

при обращении с дорогостоящими грузами или в процессе решения задачи доставки «точно в срок». При этом доставка таких грузов, как удобрения насыпью, требует учета иных приоритетных показателей, к которым в первую очередь относится характер производства и потребления продукта [3].

Возможность выполнения заданного объема перевозок определяется параметрами выбранного магистрального вида транспорта на основе следующих факторов:

- уровень развития выбранного вида транспорта, мощностей материально-технической базы и провозных способностей транспортных средств;
- развитие транспортной сети в сфере пунктов образования и поглощения грузовых потоков;
- регулярность отправки грузов и сроков транспортировки;
- применяемое в пунктах перевалки грузов перегрузочное оборудование и технологическая оснастка;
- экономические и другие показатели, связанные с безопасностью доставки грузов, надежностью вида транспорта и т. д.

От транспортных характеристик выбранного магистрального вида транспорта зависит также время доставки насыпного груза на морской терминал.

Рассматривая сроки транспортировки, например, удобрений в контейнерах на морской терминал для дальнейшей перегрузки, без предварительной растарки контейнера на складе накопления непосредственно на морское судно, необходимо учесть все временные параметры, связанные с технологическим циклом такой отгрузки, а также выполнение сопутствующих дополнительных операций [4].

В общем виде кольцевой цикл оборота контейнерного поезда может быть выражен в следующем виде:

$$T_{\text{цикла поезда}} = T_{\text{на завод}} + T_{\text{погр. на заводе}} + T_{\text{ст.отпр. груза}} + T_{\text{груз. путь}} + T_{\text{на МТ}} + T_{\text{выгр. на МТ}} + T_{\text{погр. на МТ}} + T_{\text{порожн. на ст.отпр}} + T_{\text{порожн. путь}} \quad (1)$$

Здесь $T_{\text{на завод}}$ — подача железнодорожных платформ с порожними контейнерами на завод под погрузку; $T_{\text{погр. на заводе}}$ — погрузка насыпных грузов в контейнеры; $T_{\text{ст.отпр. груза}}$ — подача контейнерного поезда с грузом на железнодорожную станцию отправления; $T_{\text{груз. путь}}$ — следование контейнерного поезда с грузом до морского терминала; $T_{\text{на МТ}}$ — подача контейнерного поезда с грузом на морской терминал; $T_{\text{выгр. на МТ}}$ — выгрузка контейнеров с грузом с железнодорожных платформ; $T_{\text{погр. на МТ}}$ — погрузка контейнеров без груза на железнодорожные платформы; $T_{\text{порожн. на ст.отпр}}$ — подача железнодорожных платформ с порожними контейнерами на железнодорожную станцию отправления; $T_{\text{порожн. путь}}$ — следование контейнерного поезда без груза до завода погрузки.

Пример продолжительности кольцевого рейса контейнерного поезда с учетом того, что для загрузки контейнеров удобрениями на заводе-производителе отсутствует необходимость их выгрузки с железнодорожных платформ, приведен в табл. 1.

Таблица 1

Период завоза насыпных грузов в контейнерах на морской терминал [5]

Подача ж.-д. платформ с контейнерами на завод погрузки, ч	Погрузка насыпных грузов в контейнеры, ч	Подача контейнерного поезда с грузом на ЖД станцию отправления, ч	Следование контейнерного поезда до морского терминала, ч	Подача контейнерного поезда на морской терминал, ч	Выгрузка контейнеров с ж.-д. платформ, ч	Погрузка контейнеров на ж.-д. платформы, ч	Подача контейнерного поезда без груза на ж.-д. станцию отправления, ч	Следование контейнерного поезда без груза до завода погрузки, ч	Итого, ч (сут)
2	12	2	94	2	4	4	2	94	216 (9)

Таким образом, можно сформировать контейнерный поезд как систему доставки насыпных грузов в связке *железнодорожная платформа и два установленных на ней балк-контейнера*. Такой поезд будет следовать в направлении морского терминала с грузом, а обратно — без груза.

Результаты (Results)

Контейнерный поезд обеспечит сокращение времени доставки за счет уменьшения общего количества перевалок, устойчивую транспортную связь между терминалами отгрузки продукции и перевалки грузов на морской транспорт, сохранную перевозку грузов, применение специальных более низких тарифов на перевозку, что способствует улучшению показателей использования подвижного железнодорожного состава, а также оптимизации количества оборотных средств транспортировки и погрузки грузов на суда (балк-контейнеров) [5].

Чтобы задать ритмичную работу по продвижению грузов от завода-производителя до морского терминала в данном случае необходимо девять контейнерных поездов:

$$T_{\text{цикл поезда}} = N_{\text{поезд}} \cdot \quad (2)$$

Здесь $N_{\text{поезд}}$ — количество контейнерных поездов, обеспечивающих подвоз грузов на морской терминал.

Обеспечение синергетического эффекта потребует слаженной работы всех участников перевозочного процесса и прежде всего расчета необходимого количества балк-контейнеров. Обратная загрузка контейнерного поезда на морском терминале порожними контейнерами потребует дополнительного комплекта контейнеров:

$$K_{\text{конт}} = K_{\text{конт. в поезде}} (N_{\text{поезд}} + 1). \quad (3)$$

Здесь $K_{\text{конт}}$ — количество контейнеров, необходимое для организации обеспечения подвоза грузов на морской терминал ($112(9 + 1) = 1120$; $K_{\text{конт. в поезде}}$ — количество контейнеров в одном поезде.

Если длина контейнерного поезда составляет 56 платформ, то одним поездом может быть одновременно доставлено 112 контейнеров или 2016 т грузов при средней загрузке контейнера, равной 18 т [7], [8]. Дальнейшее построение системы транспортировки требует учета грузоподъемности судов, подаваемых под погрузку. В данном случае возможны два варианта развития транспортной ситуации.

Первый вариант может сформироваться в условиях, когда грузоподъемность судна меньше количества груза, подаваемого по железной дороге за девять суток:

$$Q_{\text{суд}} < K_{\text{конт}} M_{\text{груз}}. \quad (4)$$

Здесь $Q_{\text{суд}}$ — грузоподъемность судна; $M_{\text{груз}}$ — масса груза в одном контейнере.

В этом случае может наступить момент, когда на складе, емкость которого составляет 18 000 т, грузоподъемность судна равна 8 000 т, судно подается под погрузку каждые 5 сут, на 30-е сутки на морском терминале не окажется порожних контейнеров для отправки их на завод-производитель, т. е. контейнерный поезд встанет на простой, что нарушит ритмичность поставок грузов (рис. 1):

$$T_{\text{зат.скл}} = \frac{G_{\text{скл}} - Q_{\text{суд}}}{G_{\text{подача, сут}}} T_{\text{выб}}. \quad (5)$$

Здесь $T_{\text{зат.скл}}$ — период затаривания склада, сут; $G_{\text{скл}}$ — емкость склада, т; $G_{\text{подача, сут}}$ — объем ежесуточного поступления груза, т; $T_{\text{выб}}$ — период выборки грузов со склада, сут.

Решением проблемы перезатаривания морского терминала может быть сокращение контейнерных поездов между заводом и терминалом.

Второй вариант развития транспортной ситуации может сформироваться в условиях, когда грузоподъемность судна больше количества груза, подаваемого по железной дороге за девять суток:

$$Q_{\text{суд}} > K_{\text{конт}} M_{\text{груз}}. \quad (6)$$

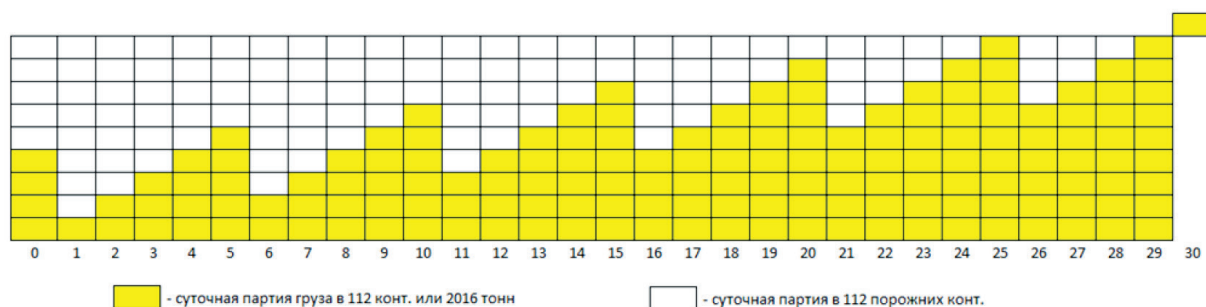


Рис. 1. Движение контейнеров (грузов) на морском терминале

В данном случае, во избежание задержек судна под погрузкой, подача грузов может быть компенсирована увеличением количества контейнерных поездов, обслуживающих транспортную систему. Тогда количество требуемых контейнеров можно рассчитать следующим образом:

$$K_{\text{конт}} = K_{\text{конт. в поезде}} (N_{\text{поезд}} + N_{\text{доп}} + 1). \quad (7)$$

Здесь $N_{\text{доп}}$ — количество дополнительных контейнерных поездов.

Кроме того, приведенная форма подачи в порт такого груза, как удобрения, предполагает соблюдение особых требований к производству перегрузочных операций, связанных с тем, что такой груз боится избытков влаги и не может обрабатываться при неблагоприятных метеорологических условиях. Таким образом, задержка судна в порту обработки может быть связана с атмосферными явлениями [9].

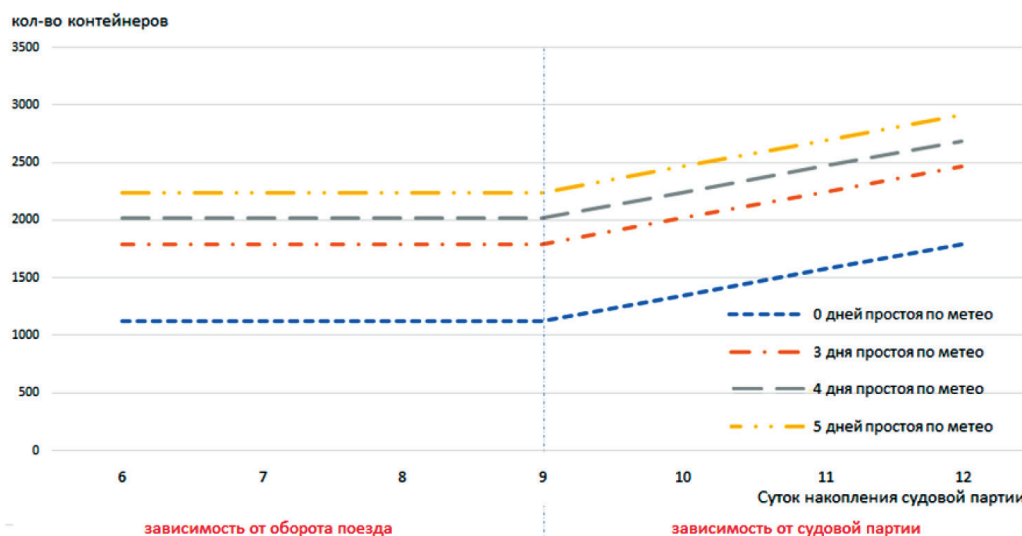


Рис. 2. Зависимость парка контейнеров от периода оборота поезда и сроков накопления судовой партии

Учитывая, что организация работы контейнерных поездов в этом случае требует отгрузки порожних контейнеров с морского терминала на каждый поданный под обработку поезд с учетом периода накопления судовой партии и возможного простоя судна по метеорологическим причинам, как показано в табл. 2, общее количество контейнеров может увеличиться (рис. 2):

$$K_{\text{конт}} = K_{\text{конт. в поезде}} (N_{\text{поезд}} + 2T_{\text{метео}} + 1). \quad (8)$$

Здесь $T_{\text{метео}}$ — период возможного ожидания обработки судна по метеорологическим причинам.

Таблица 2

Потребность в контейнерах для обеспечения бесперебойной подачи насыпных грузов

Период накопления судовой партии, сут	6	7	8	9	10	11	12
Без простоя по метеопричинам	1120	1120	1120	1120	1344	1568	1792
Три дня простоя по метеопричинам	1792	1792	1792	1792	2016	2240	2464
Четыре дня простоя по метеопричинам	2016	2016	2016	2016	2240	2464	2688
Пять дней простоя по метеопричинам	2240	2240	2240	2240	2464	2688	2912

Таким образом, организация доставки и обработки насыпных грузов на контейнерном терминале зависит от возможностей видов транспорта, периода подачи грузов на терминал, периода подачи морского судна под обработку и его грузоподъемности, а также требует учета возможной задержки судна под обработкой из-за неблагоприятных погодных условий [10], [11].

Заключение (Conclusion)

Предложенная модель системы доставки и обработки насыпных грузов на морском контейнерном терминале (1)–(8) имеет ряд преимуществ. Работа взаимоувязанной системы *железнодорожная платформа — насыпные контейнеры* представляет собой формирование контейнерного поезда прямого сообщения между заводом-производителем и морским терминалом перевалки грузов, что способствует сокращению сроков доставки грузов, количества перевалок грузов, снижению стоимости транспортировки за счет ритмичного графика поставок.

Морской терминал при этом может получить значительное приращение грузооборота на основе максимальной загрузки своих перегрузочных и складских мощностей, не прибегая при этом к дополнительным затратам на совершенствование и наращивание своих технологических возможностей [12].

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. 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 им. адмирала С. О. Макарова. — 2021. — Т. 13. — № 3. — С. 372–383. DOI: 10.21821/2309-5180-2021-13-3-372-383. — EDN TNLNKM.
2. Черкин Э. А. Управление цепями поставок: лучшая российская и мировая практика / Э. А. Черкин // Транспорт Российской Федерации. — 2013. — № 5(48). — С. 52–54. — EDN RSSCEF.
3. Lv B. Operational optimization of transit consolidation in multimodal transport / B. Lv, B. Yang, X. Zhu, J. Li // Computers & Industrial Engineering. — 2019. — Vol. 129. — Pp. 454–464. DOI: 10.1016/j.cie.2019.02.001.
4. Купцов Н. В. Разработка модели вероятностной оценки пропускной способности морского грузового фронта экспортного угольного терминала / Н. В. Купцов, А. Л. Кузнецов, А. В. Шатилин // Вестник государственного университета морского и речного флота им. адмирала С. О. Макарова. — 2020. — Т. 12. — № 1. — С. 17–34. DOI: 10.21821/2309-5180-2020-12-1-17-34. — EDN OCQYWM.
5. Полуботко Н. С. Перевалка минеральных удобрений на неспециализированном причале // Электронная библиотека методических материалов ГУМРФ. — URL: <https://edu.gumrf.ru/electronnaya-biblioteka-metodicheskikh-materialov/vypusknye-kvalifikatsionnye-raboty-2024>.
6. Ветрова Е. Н. Методические подходы к локализации промышленного производства на современном этапе / Е. Н. Ветрова, Г. С. Азирова // Научный журнал НИУ ИТМО. Серия: Экономика и экологический менеджмент. — 2023. — № 1. — С. 3–12. DOI: 10.17586/2310-1172-2023-16-1-3-12. — EDN QYCLSD.

7. 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 им. адмирала С. О. Макарова. — 2020. — Т. 12. — № 2. — С. 252–261. DOI: 10.21821/2309-5180-2020-12-2-252-261. — EDN VILYCW.

8. Изотов О. А. Расчет количества насыпных контейнеров при организации перевалки навалочных грузов на неспециализированном причале / О. А. Изотов, А. В. Гульяев // Вестник государственного университета морского и речного флота им. адмирала С. О. Макарова. — 2017. — Т. 9. — № 6. — С. 1209–1216. DOI: 10.21821/2309-5180-2017-9-6-1209-1216. — EDN YLUFAS.

9. Кузнецов А. Л. Имитационное моделирование работы порта с учетом дифференцированных метеоусловий / А. Л. Кузнецов, В. А. Погодин, Я. Б. Спасский // Эксплуатация морского транспорта. — 2011. — № 1(63). — С. 3–8. — EDN NYDLMV.

10. Kuzmicz K. A. Approaches to empty container repositioning problems in the context of Eurasian intermodal transportation / K. A. Kuzmicz, E. Pesch // Omega. — 2019. — Vol. 85. — Pp. 194–213. DOI: 10.1016/j.omega.2018.06.004.

11. Almetova Z. Optimization of Delivery Lot Volumes in Terminal Complexes / Z. Almetova, V. Shepelev, S. Shepelev // Transportation Research Procedia. — 2017. — Vol. 27. — Pp. 396–403. DOI: 10.1016/j.trpro.2017.12.020.

12. Lee C-Y. Ocean container transport in global supply chains: Overview and research opportunities / C-Y. Lee, D-P. Song // Transportation Research Part B: Methodological. — 2017. — Vol. 95. — Pp. 442–474. DOI: 10.1016/j.trb.2016.05.001.

REFERENCES

1. Kuznetsov, A. L., A. V. Kirichenko and A. D. Semenov. “Evaluating lead-time in complex supply chains by simulation technique.” *Vestnik gosudarstvennogo universiteta morskogo i rechnogo flota im. admiral S. O. Makarova* 13.3 (2021): 372–383. DOI: 10.21821/2309-5180-2021-13-3-372-383.

2. Cherkin, E. A. “Managing the supply chain: best practice in russia and internationally.” *Transport Rossiyskoy Federatsii* 5(48) (2013): 52–54.

3. Lv, B., B. Yang, X. Zhu and J. Li. “Operational optimization of transit consolidation in multimodal transport.” *Computers & Industrial Engineering* 129 (2019): 454–464. DOI: 10.1016/j.cie.2019.02.001.

4. Kuptsov, N. V., A. L. Kuznetsov and A. V. Shatilina. “Development of a model for the probabilistic assessment of annual throughput of the marine loading complex of the export coal terminal.” *Vestnik gosudarstvennogo universiteta morskogo i rechnogo flota im. admiral S. O. Makarova* 12.1 (2020): 17–34. DOI: 10.21821/2309-5180-2020-12-1-17-34.

5. Polubotko N. S. Transshipment of mineral fertilizers at a non-specialized berth // GUMRF Electronic Library of methodological materials. — URL: <https://edu.gumrf.ru/electronnaya-biblioteka-metodicheskikh-materialov/vypuskiye-kvalifikatsionnye-raboty-2024>.

6. Vetrova, E. N. and G. S. Azirov. “Methodological approaches to the localization of industrial production at the present stage.” *Nauchnyy zhurnal NIU ITMO. Seriya: Ekonomika i ekologicheskiy menedzhment* 1 (2023): 3–12. DOI: 10.17586/2310-1172-2023-16-1-3-12.

7. Izotov, O. A., Yu. I. Vasil'ev and O. A. Razhev. “Processes for forming groupage container consignments.” *Vestnik gosudarstvennogo universiteta morskogo i rechnogo flota im. admiral S. O. Makarova* 12.2 (2020): 252–261. DOI: 10.21821/2309-5180-2020-12-2-252-261.

8. Izotov, O. A. and A. V. Gul'tyaev. “The calculation of the number of bulk containers in the organization of transshipment of bulk cargoes at specialized berth.” *Vestnik gosudarstvennogo universiteta morskogo i rechnogo flota im. admiral S. O. Makarova* 9.6 (2017): 1209–1216. DOI: 10.21821/2309-5180-2017-9-6-1209-1216.

9. Kuznetsov, A. L., V. A. Pogodin and Ya. B. Spasskiy. “The simulation modeling of the port operations subject to differentiated weather conditions.” *Ekspluatatsiya morskogo transporta* 1(63) (2011): 3–8.

10. Kuzmicz, K. A. and E. Pesch. “Approaches to empty container repositioning problems in the context of Eurasian intermodal transportation.” *Omega* 85 (2019): 194–213. DOI: 10.1016/j.omega.2018.06.004.

11. Almetova, Z., V. Shepelev and S. Shepelev. “Optimization of Delivery Lot Volumes in Terminal Complexes.” *Transportation Research Procedia* 27 (2017): 396–403. DOI: 10.1016/j.trpro.2017.12.020.

12. Lee, C-Y. and D-P. Song. “Ocean container transport in global supply chains: Overview and research opportunities.” *Transportation Research Part B: Methodological* 95 (2017): 442–474. DOI: 10.1016/j.trb.2016.05.001.

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

Полуботко Никита Сергеевич — аспирант

ФГБОУ ВО «ГУМРФ имени адмирала

С. О. Макарова»

198035, Российская Федерация, Санкт-Петербург,

ул. Двинская, 5/7

e-mail: nipolubotko@inbox.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

Polubotko, Nikita S. — postgraduate student

Admiral Makarov State University of Maritime

and Inland Shipping

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

Russian Federation

e-mail: nipolubotko@inbox.ru

Статья поступила в редакцию 21 февраля 2025 г.

Received: Feb. 10, 2025.

STRUCTURING THE TERMINOLOGICAL APPARATUS USED IN THE ANALYSIS OF THE INFLUENCE OF HUMAN FACTORS ON NAVIGATION SAFETY

S. V. Kozik

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

A literature review addressing the issue of the human factor has been conducted. A representative sample was compiled, with its completeness determined by the criterion of the absence of new interpretations of the term "human factor." A list of definitions for the term "human factor" was compiled, highlighting that different sources assign varying meanings to this concept. Each definition contains a fundamental judgment. A classification of these judgments was carried out, identifying five groups: human errors, characteristics of professional activity, characteristics of a person, structural aspects, and the importance and complexity of the research subject. It is concluded that the studied topic—human activity in performing professional tasks—can be described using terms such as "human element," "human factor," "successful professional activity," "human factors," "individual psychological traits," "physical and social environment," and "human condition." Definitions were formulated for each term. A structural-logical scheme illustrating the interconnections between these concepts was proposed. As the most general concept, it is suggested to use "human element" as an essential part (element) of a complex system, specifically a complex technical device—a vessel—representing human manifestations in professional activity. The spectrum of such manifestations is extensive, forming a continuum. At one pole are human "errors" (the human factor), while the other pole lacks a universally recognized term; therefore, it is proposed to use "successful professional activity." The driving forces behind human manifestations in professional activity are human factors, encompassing individual psychological traits, physical and social environments, and the condition of the specialist executing them. The proposed structural-logical scheme enables more precise formulation of scientific objectives whose solutions will enhance navigation safety by accounting for the human element.

Keywords: Professional activity, human element, human factor, successful professional activity, human factors, individual psychological characteristics, personality traits, physical environment, social environment, human condition.

For citation:

Kozik, Sergey V. "Structuring of the terminological apparatus used in the analysis of the influence of the human factor on the safety of navigation." *Vestnik Gosudarstvennogo universiteta morskogo i rechnogo flota imeni admirala S. O. Makarova* 17.2 (2025): 216–232. DOI: 10.21821/2309-5180-2025-17-2-216-232.

УДК 656.61, 551.577.53

СТРУКТУРИРОВАНИЕ ТЕРМИНОЛОГИЧЕСКОГО АППАРАТА, ИСПОЛЬЗУЕМОГО ПРИ АНАЛИЗЕ ВЛИЯНИЯ ЧЕЛОВЕКА НА БЕЗОПАСНОСТЬ СУДОХОДСТВА

С. В. Козик

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

Выполнен анализ библиографического материала, в котором исследована проблема человеческого фактора. Составлена репрезентативная выборка, полнота которой определялась критерием отсутствия новых трактовок термина «человеческий фактор». Составлен перечень определений этого термина, в каждом из которых выделена его основная суть, имеющая в разных источниках различную интерпретацию. Выполнена классификация основополагающих толкований данного термина, из которых выделено пять групп: ошибки человека, характеристика профессиональная деятельность, характе-

ристика человека, наличие структуры, важность и сложность предмета исследования. Сделан вывод о том, что исследуемая тема деятельности человека при выполнении им профессиональных задач может быть описана следующими терминами: «человеческий элемент», «человеческий фактор», «успешная профессиональная деятельность», «человеческие факторы», «индивидуально-психологические свойства личности человека», «физическая и социальная среда», «состояние человека». Даны определения каждого из указанных терминов. Предложена структурно-логическая схема взаимосвязи данных понятий. В качестве общего предлагается использовать термин «человеческий элемент» в виде сущностной части (элемента) сложной системы, в данном случае сложного технического устройства — судна, используя его как проявление человека в процессе профессиональной деятельности. Отмечается, что обширный спектр человеческих проявлений представляет собой континуум, на одном полюсе которого находятся «ошибки» человека («человеческий фактор»), а другой полюс не имеет общепризнанного определения, поэтому предлагается использовать термин «успешная профессиональная деятельность». Мотивацией для проявления профессиональной деятельности человека являются «человеческие факторы», которые включают его индивидуально-психологические особенности, физическую и социальную среду, в которой осуществляется данного рода деятельность, а также состояние специалиста, ее реализующую. Предложенная структурно-логическая схема взаимосвязи понятий позволяет формулировать актуальные научные задачи, решение которых должно способствовать повышению безопасности плавания судна с помощью учета человеческого элемента.

Ключевые слова: профессиональная деятельность, человеческий элемент, человеческий фактор, успешная профессиональная деятельность, человеческие факторы, индивидуально-психологические особенности, свойства личности человека, физическая среда, социальная среда, состояние человека.

Для цитирования:

Козик С. В. Структурирование терминологического аппарата, используемого при анализе влияния человека на безопасность судоходства / С. В. Козик // Вестник Государственного университета морского и речного флота имени адмирала С. О. Макарова. — 2025. — Т. 17. — № 2. — С. 216–232. DOI: 10.21821/2309-5180-2025-17-2-216-232. — EDN KMRRYP.

Введение (Introduction)

Судоходство как деятельность, связанная с перемещением по морским и внутренним водным путям судов с целью перевозки грузов и пассажиров, является глобальной сферой деятельности человека, обеспечивающей международную торговлю и составляющей значительную часть мировой экономики. Морские суда являются наиболее крупными управляемыми транспортными средствами, оснащенными современными автоматизированными системами, предназначенными обеспечивать безопасность плавания. Тем не менее эффективность судоходства в настоящее время зависит не столько от технической оснащенности судна, сколько от профессионализма экипажа, управляющего этим сложным механизмом.

Результаты анализа происшествий с судами на море и внутренних водных путях, произошедших в течение последних 10 лет, позволяют сделать вывод о возрастающей роли человека в их возникновении. Гибель людей, а также огромный экологический ущерб, который может быть нанесен в результате крушения судна, по-прежнему представляют собой реальную опасность. Несмотря на цифровизацию и автоматизацию морской отрасли маловероятно, что участие людей в операционных процессах на море будет полностью исключено. Человеческий элемент на протяжении последних десяти лет является одним из направлений стратегического плана Международной морской организации¹, который предусматривает его учет при рассмотрении, разработке и реализации новых и существующих требований, включая навыки, образование и профессиональную подготовку, а также человеческие возможности, ограничения и потребности, а также то обстоятельство, что Международная морская организация (ИМО) во всех аспектах своей работы всегда учитывает потребности и благополучие моряков.

В отечественной литературе используется единый термин «человеческий фактор». В процессе исследования различных составляющих которого существуют различные определения этого понятия, что создает определенные трудности в синтезе получаемых результатов в системе

¹ Strategic plan for the organization for the six-year period 2018 to 2023. Resolution A.1110(30), 2017. Strategic plan for the organization for the six-year period 2024 to 2029. Resolution A.1173(33), 2023.

знаний этой сложной области исследования. В англоязычной литературе для описания феномена *человеческий элемент* чаще всего используются три термина: «человеческий элемент» (Human Element), «человеческие факторы» (Human Factors) и «человеческий фактор» (Human Factor). При переводе на русский язык все они объединены в один — «человеческий фактор». В статье представлен результат исследования содержательных характеристик указанных понятий и система их взаимосвязи.

Методы и материалы (Methods and Materials)

Для анализа работ, посвященных изучению проблемы человеческого фактора, были использованы следующие методы библиографического поиска: *выборочный, ограниченно сплошной, сплошной*. После применения выборочного метода был составлен список трудов, в которых в той или иной степени упоминается участие человека в нарушениях технологических процессов. Применение других методов библиографического поиска позволило уточнить и сократить количество трудов, оставив только те из них, в которых явно или косвенно содержится описание (определение) термина «человеческий фактор». Результаты этой работы представлены в табл. 1, где в графе 1 указаны ФИО автора и дана библиографическая ссылка на источник, в графе 2 — определение термина «человеческий фактор» и его основные характеристики из проанализированных библиографических источников. В связи с тем, что часто определения являются объемными, в целях дальнейшего анализа взаимосвязей в них выделены общие элементы, различия и основополагающие суждения, которые приведены в графе 3. В процессе систематизации отобранных определений и выделения основополагающих суждений библиографический поиск был продолжен, но поскольку новых содержательных элементов термина выявлено не было, в ходе дальнейшего исследования были использованы основополагающие суждения.

Таблица 1

Определения термина «человеческий фактор» и его основные характеристики

Библиографические сведения	Определения и основные характеристики	Основополагающее суждение
1. Акшат Арора [1]	«Человеческий фактор» — это термин, охватывающий способы взаимодействия людей с окружающей средой, признание наличия у людей возможностей и ограничений, а также того, что они не могут быть совершенными и необходимо создание среды, которая окажет влияние на людей таким образом, чтобы они делали все возможное для достижения целей	Способ взаимодействия людей с окружающей средой
2. Александров М. Н. [2]	Совокупность «ошибочных действий членов экипажа из-за неточного восприятия информации, неправильного решения или ошибок при реализации принятого решения»	Ошибки человека
3. Большой психологический словарь ²	Психологические, физиологические, антропометрические и другие характеристики человека, его возможности и ограничения, определяемые в конкретных условиях взаимодействия человека с объектом управления	Характеристики человека в конкретных условиях его взаимодействия с объектом управления

² Большой психологический словарь [Электронный ресурс] /https://spbguga.ru/files/03–5–01–005.pdf?ysclid=m52nld4kso251104688 (дата обращения: 24.12.2024).

Таблица 1
(Продолжение)

4. Бондарев В. А, Ермаков С. В. [3]	«Человеческий фактор» — совокупность профессиональных, психофизиологических, психологических и социальных характеристик судоводителя, обуславливающих отличие его действий и решений от «идеальных» в конкретных условиях плавания	Отличие действий и решений человека от «идеальных» в конкретных условиях плавания
5. Григорьев Н. Н. [4]	Под «человеческим фактором» понимается интегральная характеристика человека (или коллектива) как субъекта профессиональной и трудовой деятельности, которая включает параметры профессионально важных качеств (ПВК), психических состояний работника (адаптации, утомления, интерференции навыков, конечного порыва, фрустрации, напряженности и т. д.), движущих сил поведения (мотивов, интересов, отношений) и других социально-ролевых функций (формальных и неформальных), предусмотренных штатным положением и обусловленных личностными свойствами субъекта деятельности или особенностями конкретной ситуации	Интегральная характеристика человека как субъекта профессиональной деятельности
6. Данилов А. Т. ³	Аварийность на морском транспорте есть результат проявления человеческого фактора объединяющий объективные факторы (ошибки при проектировании и постройки судов, прочность и технология постройки судна, воздействие ветра, волн, льдов и других внешних факторов, подвергающих судно значительным динамическим ударам и вибрациям) и субъективные факторы (недостаток знаний и опыта, нарушение правил эксплуатации, неумение использовать на практике мореходные качества судов, потеря управляемости судами)	Аварийность на морском транспорте как результат проявления человеческого фактора
7. Дмитриев В. И. [5]	Под «человеческим фактором» в широком смысле следует понимать возможности и способности человека к приему, обработке информации и принятию решений в различных условиях функционирования», действия или ошибки (намеренные или случайные), которые отрицательно воздействуют на работу системы или успешное выполнение конкретной задачи	Возможности и способности человека, его ошибки.

³ Данилов А. Т. Современное морское судно: учебник / А. Т. Данилов, В. А. Середохо. СПб.: Судостроение, 2010. 446 с. EDN RAXENX.

Таблица 1
(Продолжение)

8. Ермаков С. В. [6]	«Человеческий фактор» является основной причиной происшествий на морском транспорте, его доля составляет 80 %	Действия человека являются основной причиной происшествий на морском транспорте
9. Каретников В. В., Козик С. В., Соколова И. А. [7]	Действие или бездействие членов экипажа, а также ошибки человека, умышленные или непреднамеренные, которые отрицательно влияют на работу системы или успешное выполнение определенной задачи	Действие или бездействие на след. строку экипажа
10. Корнев И. В., Ермаков С. В. [8]	«Человеческий фактор» является причиной всех морских аварий и инцидентов, внутренняя структура человеческого фактора, представляет собой совокупность нескольких субфакторов: физиологического, психологического, личностного, компетентностного, эргономического и организационного, а также внешней его структуры из семи уровней, отстоящих по причинно-следственной цепочке на различных расстояниях от конечного события	Причиной всех морских аварий и инцидентов является внутренняя и внешняя структура человеческого фактора
11. Коровин А. Г. [9]	Проявление деятельности человека под воздействием преобладающих факторов: в структуру человеческого фактора входят следующие восемь компонентов: профессиональная подготовка, судовые факторы, специфические факторы экипажа, факторы культуры, факторы социальной среды, внешние факторы, физическое состояние и ограничения, психологические особенности	Проявление деятельности человека, структура человеческого фактора
12. Крымов И. С. ⁴	Результат недобросовестного исполнению своих обязанностей, передоверие органам автоматики, халатность, неспособность принять нужное решение в условиях дефицита времени и правильно действовать в экстремальных ситуациях	Недобросовестное исполнение своих обязанностей
13. Маринов М. Л., В. Д. Клименко [10]	Для оценки действий судоводителей в аварийных ситуациях трудно использовать слишком широкое понятие «человеческий фактор», правильное сосредоточить внимание на его проявлении — человеческом поведении в данной конкретной ситуации	Человеческое поведение в данной конкретной ситуации

⁴ Крымов И. С. Борьба за живучесть судна и спасательные средства: учеб. пособие в сфере образования для курсантов учебных заведений водного транспорта и специалистов морского и речного флота / И. С. Крымов. М.: Транслит, 2011. 432 с.

Таблица 1
(Продолжение)

14. Оксфордский толковый словарь по психологии ³	Генетический термин, чаще всего используемый в качестве названия профессиональной специальности, которая исследует так называемую систему <i>человек-машина</i> . Основное внимание обычно сосредоточено на проблемах восприятия, психофизики, принятия решений и других аспектах обработки информации. Этот термин, однако, также употребляется иногда для обозначения тех элементов («факторов»), которые являются важными для этой специальности, включая оборудование, физическую среду, задачи и индивидов, выполняющих работу	Аспекты обработки информации человеком
15. Подход Международного морского форума нефтяных компаний (OCIMF) к человеческим факторам. Лондон, 2020	«Человеческий фактор» — это физические, психологические и социальные характеристики, которые влияют на взаимодействие человека с оборудованием, системами, процессами, другими людьми и рабочей группой (командами). В нем признается, что человеческая ошибка — это не просто особенность индивидуальной неудачи, но вызвана факторами на рабочем месте, оборудованием и структурой задач, а также организационными условиями, которые могут привести любого к ошибке или неправильному решению. В результате выбора между человеческими факторами, человеческим элементом и эффективностью работы человека было признано, что у каждого из них имеются свои преимущества и недостатки. «Человеческий элемент» — термин, используемый ИМО и признанный во многих сферах морской отрасли. После появления он был изначально сосредоточен на изменении личности для уменьшения человеческих ошибок, решении вопросов обучения, компетентности, мотивации и т. д. несмотря на то, что он распространился на базовые системы	Характеристики, оказывающие влияние на взаимодействие человека с оборудованием — человеческая ошибка
16. Резолюция ИМО А.947(23) «Принципы и цели организации в отношении концепции человеческого элемента»	Термин «человеческий элемент» следует понимать как комплексное многомерное понятие, описывающее предмет и влияющий на безопасность на море и защиту морской окружающей среды	Комплексное многомерное понятие

Таблица 1
(Продолжение)

17. Резолюция ИМО А.850 (20) «Концепция человеческого элемента, принципы и цели организации»	«Человеческий элемент» (фактор) как комплексный многогранный вопрос, затрагивающий безопасность на море и защиту морской окружающей среды	Комплексный многогранный вопрос
18. Словарь терминов по общей и социальной психологии ⁵	В широком смысле — понятие, используемое в социально-экономических дисциплинах для характеристики комплекса, оказывающих определяющее влияние на эффективность общественного производства факторов, связанных с мотивацией, системой ценностей, материальными и духовными условиями существования человека; в узком смысле — интегральные характеристики связи человека и технического устройства, проявляющиеся в конкретных условиях их взаимодействия при функционировании эргатической системы	Характеристики связи человека и технического устройства
19. Томилин А. Н. [11]	«Человеческий фактор» — феномен, являющийся причиной аварий и инцидентов на море, содержащий определенную совокупность и уровень профессиональных качеств, морально-психологических и личностных свойств, присущих членам экипажа судна, негативное проявление которых приводит к случайным (или намеренным) действиям и ошибкам личностно-психологического характера, которые отрицательно влияют на эффективность и надежность работы системы обеспечения безопасности мореплавания, а также успешное выполнение конкретной производственно-транспортной задачи, что в итоге приводит к тяжелым последствиям или гибели судна, членов экипажа и пассажиров, потере груза	Феномен, способствующий авариям и инцидентам на море, случайным (или намеренным) действиям и ошибкам личностно-психологического характера
20. Томилин А. Н., А. Л. Боран-Кешишьян, С. Н. Томилина, Р. Р. Туктаров [12]	«Человеческий фактор» представляет собой актуализированный человеческий потенциал, определяет эффективность и результативность труда моряков	Эффективность и результативность труда моряков

⁵ Оксфордский толковый словарь по психологии [Электронный ресурс] <https://809.slovaronline.com> (дата обращения: 24.12.2024).

Таблица 1
(Продолжение)

21. Томилин А. Н., Е. М. Дорофеев, А. М. Дорофеев, Е. В. Дорофеева [13]	Состав структуры человеческого фактора: психологические особенности специалиста морского транспорта, профессиональная подготовка, физическое состояние и ограничения, личностные качества, судовые факторы, специфические факторы судна и экипажа, управление на берегу, социальные факторы, внешние факторы и окружающая среда	Структура «человеческого фактора»
22. Топалов В. П., Торский В. Г. ⁶	Не выработано общепризнанного определения понятия «человеческий» фактор, под этим нередко подразумеваются отклонения от нормы поведения в решениях и действиях людей, работающих в управлении компании или на борту судна, которые повышают риск возникновения опасных ситуаций	Отклонения от нормы поведения
23. Философский энциклопедический словарь ⁷	Роль, место и влияние человека как субъекта общественно-исторической и трудовой деятельности, в узком смысле — понятие, обозначающее интегральные характеристики связи человека и технического устройства, проявляющиеся в конкретных условиях их взаимодействия	Влияние человека как субъекта трудовой деятельности
24. Цыганко Е. Н. [14]	К «человеческому фактору» относят совокупность социально-профессиональных качеств, психологических и биологических свойств человека, которые проявляются в процессе его деятельности	Совокупность качеств человека, которые проявляются в его деятельности
25. Чернышев В. Ф. [15]	Структуру человеческого фактора определяют следующие элементы: управление на берегу; внешние воздействия и социальная среда; социальные факторы; судовые факторы; условия работы, быта и жизни; судовая организация	Структура человеческого фактора
26. Dik Gregory [16]	«Человеческий фактор» — неудачное название. Люди — это не просто элемент, как погода. Они находятся в самом центре судоходного предприятия, являются секретом его успеха и жертвами его неудач. Именно человеческая природа управляет тем, что происходит каждый день на работе — от рутинных задач по оценке судна до политических решений ИМО	«Человеческий фактор» — неудачное название. Люди являются секретом его успеха и жертвами его неудач

⁶ Топалов В. П. Уроки морских аварий: практическое пособие / В. П. Топалов. Одесса: Астропринт, 2015. 336 с.

⁷ Философский энциклопедический словарь [Электронный ресурс] / <https://rus-prof-education-dict.slovaronline.com/> (дата обращения: 24.12.2024).

Таблица 1
(Продолжение)

27. Strategic plan for the organization for the six-year period 2024 to 2029. Resolution A.1173(33)	«Человеческий элемент» признан ключевым элементом обеспечения безопасности на море, ИМО учитывает человеческий элемент при разработке, внедрении и пересмотре новых и существующих требований, включая навыки, образование и подготовку, а также человеческие возможности, ограничения и потребности	«Человеческий элемент» — навыки, образование, потребности и ограничения
28. Safety Behaviours: Human Factors Resource Guide for Engineers, CASA (Australia) 2013	Несмотря на то, что в центре нашего внимания обычно находятся проблемы, связанные с «человеческим фактором», которые привели к аварии, нельзя забывать, что у человеческой деятельности есть две стороны: недостатком является способность совершать ошибки, но важным достоинством является то, что люди, как правило, легко приспосабливаются и проявляют гибкость. Положительной стороной человеческой деятельности и ошибок, например, является то, что мы хорошо умеем выявлять и исправлять свои ошибки до того, как они приведут к тяжелым последствиям. Люди с большим опытом также склонны к гибкости и способности к адаптации в процессе решения сложных проблем и часто могут разрешать ситуации, располагая ограниченной информацией	Человеческая деятельность имеет две стороны: недостатком является способность совершать ошибки, но не менее важным достоинством является то, что люди легко приспосабливаются, умеют выявлять и исправлять свои ошибки
29. Human Factors: Management and Self-Assessment., Oil Companies International Marine Forum, 2021	«Человеческий фактор» — это физические, психологические и социальные характеристики, которые влияют на взаимодействие человека с оборудованием, системами, процессами, другими людьми и рабочей группой (командами). Подход, основанный на «человеческом факторе», означает признание того, что именно люди на наших судах и в наших операционных группах и группах поддержки обеспечивают безопасность, но человеческие ошибки все еще происходят в процессе взаимодействия с условиями, системами и / или другими людьми. Решая эти вопросы взаимодействия, можно уменьшить количество человеческих ошибок, а значит, сократить количество инцидентов и повысить надежность и производительность	Характеристики человека, которые влияют на взаимодействие человека с оборудованием, обеспечивая безопасность, но ошибки все еще допускаются

Таблица 1
(Окончание)

30. Human element guidance (MGN 520)., Maritime and Coastguard Agency, 2016	«Человеческий фактор» — это способность и возможность людей эффективно и безопасно справляться с трудностями, давлением и нагрузкой, связанными с их повседневными задачами, не только в чрезвычайных ситуациях, но и во время проведения обычных операций. Двенадцать наиболее распространенных факторов, которые могут оказать влияние на человека или предшествовать человеческим ошибкам, приводящим к несчастным случаям или инцидентам: 1. Недостаток коммуникации. 2. Отвлечение внимания. 3. Нехватка ресурсов. 4. Стресс. 5. Самоуспокоенность. 6. Отсутствие командной работы. 7. Давление. 8. Недостаточная осведомленность. 9. Недостаток знаний. 10. Усталость. 11. Отсутствие настойчивости. 12. Нормы	«Человеческий фактор» — возможность людей эффективно и безопасно справляться со сложностями в обычной и чрезвычайных ситуациях, но при этом возможны ошибки
31. Ch. Кио [17]	«Человеческий фактор» рассматривается как соответствие совокупности индивидуальных качеств и характеристик человека сочетанию определенного судна, его устройств и оборудования (Hardware), компьютерных программ, процедур и инструкций (Software), рабочей среды (Working Environment), организационной культуры при эффективном выполнении производственных функций	Соответствие индивидуальных качеств человека и рабочей среды
32. CAP 715: An Introduction to Aircraft Maintenance Engineering Human Factors for JAR 66, 2002	«Человеческий фактор» относится к изучению возможностей и ограничений человека на рабочем месте. Целью его изучения является оптимизация взаимодействия обслуживающего персонала и систем с целью повышения безопасности, эффективности и благополучия	Возможности и ограничения человека на рабочем месте

Приведенные в табл. 1 определения и характеристики охватывают различные аспекты влияния человека на процессы и результаты его деятельности. Отмечается множество определений и подходов, отражающих разные точки зрения на особенности влияния человека на безопасность судоходства. Основные направления исследований касаются роли человека в системе управления, его способностей и ограничений, а также влияния на него внешних и внутренних факторов.

Одним из ключевых аспектов является признание того, что человек не может быть совершенным и его действия всегда будут ограничены возможностями. Это приводит к необходимости создания таких условий, которые позволят человеку эффективно выполнять свои функции, минимизируя риски возникновения ошибок. В других направлениях исследования внимание акцентировано на том, что человеческий фактор включает профессиональные, психологические и социальные

характеристики человека, которые определяют его поведение и действия в различных ситуациях. Также подчеркивается важность учета этих характеристик при разработке технических систем в целях обеспечения максимальной безопасности и эффективности судоходства.

Изучение влияния человека на безопасность плавания судна охватывает широкий спектр вопросов, касающихся взаимодействия человека с окружающей средой, системами и процессами. Все это требует комплексного подхода к анализу и управлению, в целях минимизации и улучшения результатов деятельности. Однако для более глубокого понимания этой сложной темы важно четко структурировать термины, описывающие проблематику. Это позволит достичь согласованности в понимании используемых понятий, точности научного анализа и интерпретации данных, обеспечит более последовательный подход к анализу влияния профессиональной деятельности человека на обеспечение безопасности судоходства.

Результаты (Results)

В результате содержательного анализа основополагающих определений и характеристик сделан вывод о возможности их объединения (см. табл. 1) в следующие пять групп:

- ошибки человека;
- профессиональная деятельность;
- характеристика человека
- структура;
- важность и сложность предмета исследования.

В табл. 2 основополагающие определения и характеристики термина «человеческий фактор» сгруппированы в соответствии с номерами подпунктов, указанных в табл. 1.

Таблица 2

Группировка основополагающих суждений

Ошибки человека	Профессиональная деятельность	Характеристики человека	Структура	Важность и сложность предмета исследования
Действие или бездействие членов экипажа (пп. 9 табл. 1)	Как люди взаимодействуют с окружающей средой (пп. 1 табл. 1)	Возможности и способности человека (пп. 7 табл. 1)	Внутренняя и внешняя структура человеческого фактора (пп. 30 табл. 1)	Аварийность на морском транспорте является результатом проявления человеческого фактора (пп. 6 табл. 1)
Недобросовестного исполнению своих обязанностей (пп. 12 табл. 1)	Интегральная характеристика человека как субъекта профессиональной деятельности (пп. 5 табл. 1)	В аспектах обработки информации человеком (пп. 14 табл. 1)	Структура человеческого фактора (пп. 21 табл. 1)	Основной причиной происшествий на морском транспорте (пп. 8 табл. 1)
Человеческая ошибка (пп. 7 табл. 1)	Человеческое поведение в данной конкретной ситуации (пп. 13 табл. 1)	Совокупность качеств человека, которые проявляются в его деятельности (пп. 24 табл. 1)	Структура человеческого фактора (пп. 25 табл. 1)	Причиной всех морских аварий и инцидентов (пп. 10 табл. 1)
Ошибки человека (пп. 2 табл. 1)	Характеристики, которые влияют на взаимодействие человека с оборудованием (пп. 15 табл. 1)	Человеческий элемент: навыки, образование, потребности и ограничения (пп. 27 табл. 1)	Структура человеческого фактора (пп. 11 табл. 1)	Феномен, способствующий авариям и инцидентам на море (пп. 19 табл. 1)

Таблица 2
(Продолжение)

Отклонения от нормы поведения (пп. 22 табл. 1)	Характеристики связи человека и технического устройства (пп. 18 табл. 1)	37. Возможностей и ограничений человека на рабочем месте (пп. 32 табл. 1)	—	Комплексный, многогранный вопрос (пп. 17 табл. 1)
Отличие его действий и решений от «идеальных» в конкретных условиях плавания (пп. 4 табл. 1)	Влияние человека как субъекта трудовой деятельности (пп. 23 табл. 1)	Характеристики человека, которые влияют на взаимодействие человека с оборудованием, обеспечивая безопасность (пп. 29 табл. 1)	—	Комплексное многомерное понятие (пп. 16 табл. 1)
Случайные (или намеренные) действия и ошибки личностно-психологического характера (пп. 19 табл. 1)	Проявление деятельности человека (пп. 11 табл. 1)	Характеристики человека в конкретных условиях его взаимодействия с объектом управления (пп. 3 табл. 1)	—	—
Человеческая ошибка (пп. 5 табл. 1)	Эффективность и результативность труда моряков (пп. 20 табл. 1)	—	—	—
Способность совершать ошибки (пп. 28 табл. 1)	Соответствие индивидуальных качеств человека и рабочей среды (пп. 31 табл. 1)	—	—	—
Возможны ошибки (пп. 30 табл. 1)	Две стороны человеческой деятельности: недостатком является способность совершать ошибки, но не менее важным плюсом является то, что люди, легко приспосабливаются, умеют выявлять и исправлять свои ошибки (пп. 28 табл. 1)	—	—	—
Ошибки все еще происходят (пп. 29 табл. 1)	Человеческий фактор — возможность людей эффективно и безопасно справляться со сложностью в обычных и чрезвычайных ситуациях, (пп. 30 табл. 1)	—	—	—

Таблица 2
(Окончание)

—	Человеческий фактор» — неудачное название. Люди являются секретом его успеха и жертвами его неудач (пп. 26 табл. 1)	—	—	—
---	---	---	---	---

Таким образом, анализ групп суждений позволяет сделать вывод о том, что не представляется возможным объединить в одно определение понятия «человеческий фактор» следующие группы суждений:

- предметная область — важная и сложная для исследования;
- предметная область, имеющая структуру.

Эти суждения могут быть использованы как фоновые данные при анализе структуры следующих групп суждений:

- ошибки человека;
- характеристика человека (свойства личности);
- характеристика профессиональной деятельности человека.

Для описания предметной области необходимо использовать также термины «человеческий элемент» и «человеческие факторы».

Обсуждение (Discussion)

Из трех указанных ранее групп суждений, используемых как фоновые данные, наиболее общий смысл имеет такое суждение, как *характеристика профессиональной деятельности*, для описания которого используется термин «человеческий элемент». Первая составляющая этого термина включает понятие «элемент» как сущностную часть общей системы, в частности такой сложной транспортной системы, как судно. Вторая составляющая термина подчеркивает значимость человека, управляющего этим судном. В данном случае *человеческий элемент* — это *проявления человека в процессе профессиональной деятельности*.

Одним из вариантов подобного рода проявлений служат ошибочные действия человека. При наличии одного из указанных проявлений деятельности человека в профессии, существуют и другие. Значит, существует *континуум явлений*, на одной стороне которого находятся отрицательные явления, т. е. ошибки человека, совершенные им в процессе выполнения работы. В данном случае такого рода проявления называются «человеческим фактором».

Человеческий фактор — это действие или бездействие членов экипажа (ошибки), умышленные или непреднамеренные, оказывающие отрицательное влияние на работу системы или успешное выполнение поставленной задачи.

Для положительного проявления человека в процессе профессиональной деятельности отдельного термина в исследованиях не существует. Предлагается использовать рабочее понятие *успешная профессиональная деятельность*, так как оно включает и творческое выполнение служебных обязанностей, результатом которых является разработка новых технологий в процессе в профессиональной деятельности, и эффективное решение рутинных задач, связанных с выполнением профессиональных обязанностей.

Характеристика профессиональной подготовленности человека в сочетании с другими понятиями включена в термин «человеческие факторы», учитывая при этом, что часто под термином «фактор» понимается движущая сила некоего процесса.

Человеческие факторы — это индивидуально-психологические свойства личности человека и среда, в которой осуществляется профессиональная деятельность.

Индивидуально-психологические свойства личности — это весь спектр свойств личности, которые, в соответствии с концепцией динамической функциональной структуры личности человека, объединены в четыре подструктуры личности⁸: направленность, опыт (знания, умения, навыки, компетенции), психологическая и биофизиологическая [18]–[20].

Среда — объемное понятие, которое включает как физические, так и социальные аспекты. К *физическим аспектам* относятся звук, визуальная информация, движение, количество имеющегося пространства, его физические параметры (температура, давление, влажность, характеристики окружающих физических полей), а также эргономические особенности рабочего места. К *социальным аспектам* относятся условия ситуации, которые дают человеку понимание того, как он должен вести себя в определенной ситуации.

Индивидуально-психологические особенности человека и среда, в которой осуществляется профессиональная деятельность, определяют состояние человека (действенное проявление возможностей) в процессе работы. Индивидуально-психологические характеристики личности человека, условия среды, в которых осуществляется профессиональная деятельность, а также его текущее состояние определяют, каким будет проявление человека в процессе выполнения профессиональных обязанностей в аспекте континуума явлений от «человеческого фактора» до «успешной профессиональной деятельности». Взаимосвязь этих понятий можно представить в виде следующей структурно-логической схемы, представленной на рисунке.



Структурно-логическая схема понятий «человеческий фактор» и «успешная профессиональная деятельность»

На схеме показана структура взаимосвязи традиционно используемых терминов: «человеческий элемент», «человеческий фактор», «человеческие факторы», а также предлагаемых к использованию терминов: «успешная профессиональная деятельность» и «состояние».

⁸ Козик С. В. Профессионально важные качества судоводителя и их формирование: учеб. пособие / С. В. Козик. 2-е изд. Москва – Берлин: Директ-Медиа, 2020. 144 с.

Выводы (Summary)

На основе выполненного обзорного исследования можно сделать следующие выводы:

1. Целесообразным является использование следующей системы терминов-понятий: «человеческий элемент», «человеческий фактор», «успешная профессиональная деятельность», «человеческие факторы», «индивидуально-психологические особенности человека», «физическая и социальная среда», «состояние человека». Сформулированы описания этих терминов и их взаимосвязь.
2. Введены два новых термина-концепта: «успешная профессиональная деятельность» и «состояние», которые расширяют существующую группу понятий, применяемых в научных исследованиях, и позволяют объединить их в систему, представленную в виде структурно-логической схемы понятий.
3. Предложенная структурно-логическая схема взаимосвязи понятий, описывающих проблемную область деятельности человека при выполнении профессиональных задач, позволяет более конкретно формулировать актуальные научные и практические задачи, решение которых может способствовать повышению безопасности плавания судна с помощью учета человеческого элемента.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Акшат Арора. На пути к безопасности: сочетание совершенства в навигации и поведенческой компетентности / Арора Акшат. UK P&I Club N. V., 2024.
2. Александров М. Н. Безопасность человека на море / М. Н. Александров. — Л.: Судостроение, 1983. — 300 с.
3. Бондарев В. А. Человеческий фактор в контексте оценки вероятности возникновения чрезвычайной ситуации в судовождении / В. А. Бондарев, С. В. Ермаков // Технологии техносферной безопасности. — 2017. — № 5(75). — С. 57–66. — EDN YWYDEI.
4. Григорьев Н. Н. Человеческий фактор — матрица аварийности. [Электронный ресурс]. — Режим доступа: <http://www.morvesti.ru/themes/1693/61992/> (дата обращения: 12.09.2022).
5. Дмитриев В. И. Практика мореплавания / В. И. Дмитриев. — СПб.: Элмор, 2009. — 232 с. — EDN OWVXQF.
6. Ермаков С. В. Превентивное регулирование человеческого фактора в морском судовождении / С. В. Ермаков // Вестник государственного университета морского и речного флота имени адмирала С. О. Макарова. — 2016. — № 5(39). — С. 39–50. DOI: 10.21821/2309-5180-2016-8-5-39-50. — EDN WVOQDD.
7. Каретников В. В. Учет индивидуально-психологических особенностей плавательного состава и влияние человеческого фактора на безопасность транспортного процесса / В. В. Каретников, С. В. Козик, И. А. Соколова // Вестник Астраханского государственного технического университета. Серия: Морская техника и технология. — 2018. — № 1. — С. 16–23. DOI: 10.24143/2073-1574-2018-1-16-23. — EDN YOQFAC.
8. Корнев И. В. Структура человеческого фактора / И. В. Корнев, С. В. Ермаков // Вестник молодежной науки. — 2018. — № 3(15). — С. 23. — EDN YLRDBB.
9. Коровин А. Г. Разработка методов влияния человеческого фактора на безопасность судна / А. Г. Коровин // Вестник Камчатского государственного технического университета. — 2009. — № 10. — С. 31–36. — EDN NDMJMP.
10. Маринов М. Л. Учет человеческого фактора в аварийных ситуациях на море / М. Л. Маринов, В. Д. Клименко // Эксплуатация морского транспорта. — 2008. — № 2(52). — С. 25–29. — EDN IRGHKB.
11. Томилин А. Н. Человеческий фактор: понятие, сущность содержания, проблемы / А. Н. Томилин // Эксплуатация морского транспорта. — 2015. — № 3(76). — С. 95–102. — EDN UYBIPL.
12. Томилин А. Н. Особенности проявления «человеческого фактора» и его негативное влияние на безопасность мореплавания / А. Н. Томилин, А. Л. Боран-Кешишьян, С. Н. Томилина, Р. Р. Туктаров // Эксплуатация морского транспорта. — 2022. — № 4(105). — С. 36–46.
13. Томилин А. Н. Особенности проявления «человеческого фактора» в авариях на морском транспорте / А. Н. Томилин, Е. М. Дорофеев, А. М. Дорофеев, Е. В. Дорофеева // Эксплуатация морского транспорта. — 2023. — № 1(106). — С. 67–74. DOI: 10.34046/aumsuomt106/11. — EDN VGTTWZ.
14. Цыганко Е. Н. Коммуникативный компонент человеческого фактора на море // Материалы XI региональной НТК 28–30 ноября 2013 г.: В 2 ч. — Новороссийск: ГМУ имени адмирала Ф. Ф. Ушакова, 2014. — Ч. 2. — С. 99–100.

15. Чернышев В. Ф. Человеческий фактор при авариях на судах: материалы 4-й научно-технической конференции «Проблемы безопасности морского судоходства, технической и коммерческой эксплуатации морского транспорта». 2005. — С. 31–32.

16. Gregory D., Shanahan P. The human element: A guide to human behaviour in the shipping industry. / D. Gregory, P. Shanahan. — Stationery Office (TSO), 2010.

17. Kuo C. Managing Ship Safety / C. Kuo — LLP, 1998.

18. Каретников В. В. К вопросу оценки рисков использования безэкипажных средств водного транспорта на участке акватории / В. В. Каретников, С. В. Козик, А. А. Буцанец // Вестник государственного университета морского и речного флота имени адмирала С. О. Макарова. — 2019. — Т. 11. — № 6. — С. 987–1002. DOI: 10.21821/2309-5180-2019-11-6-987-1002. — EDN ACCRDQ.

19. Козик С. В. Психодиагностический подход к оценке усталости моряков // Сборник научных статей национальной научно-практической конференции профессорско-преподавательского состава ФГБОУ ВО «ГУМРФ имени адмирала С. О. Макарова». 30 сентября – 20 октября 2024 года. — В 2 т. — СПб.: Изд-во ГУМРФ им. адм. С. О. Макарова, 2025. — Т. 2. — 240 с.

20. Ободков И. Б. Зависимость работоспособности моряков от метеопараметров / И. Б. Ободков, С. В. Козик // Судовождение и обеспечение безопасности судоходства: материалы научно-практической конференции, Санкт-Петербург. — СПб.: Изд-во ГУМРФ им. адм. С. О. Макарова, 2025. — 292 с.

REFERENCES

1. Akshat Arora. Towards Safety: A combination of excellence in navigation and behavioral competence / Arora Akshat. UK P&I Club N. V., 2024.

2. Alexandrov M. N. Human safety at sea / M. N. Alexandrov. — L.: Sudostroenie, 1983. — 300 p.

3. Bondarev V. A. The human factor in the context of assessing the likelihood of an emergency situation in navigation / V. A. Bondarev, S. V. Ermakov // Technosphere security technologies. — 2017. — № 5(75). — Pp. 57–66. — EDN YWYDEI.

4. Grigoriev N. N. The human factor — the accident rate matrix. [electronic resource]. — Access mode: <http://www.morvesti.ru/themes/1693/61992/> (date of reference: 09/12/2022).

5. Dmitriev V. I. The practice of navigation / V. I. Dmitriev. St. Petersburg: Elmore, 2009. 232 p. — EDN OWVXQF.

6. Ermakov S. V. Preventive regulation of the human factor in maritime navigation / S. V. Ermakov // Bulletin of the Admiral S. O. Makarov State University of Marine and River Fleet. — 2016. — № 5(39). — Pp. 39–50. DOI: 10.21821/2309-5180-2016-8-5-39-50. — EDN WVOQDD.

7. Karetnikov V. V., Kozik S. V., Sokolova I. A. Taking into account the individual psychological characteristics of the swimming staff and the influence of the human factor on the safety of the transport process. // Bulletin of the Astrakhan State Technical University. Series: Marine engineering and Technology. — 2018. — No. 1. — Pp. 16–23. DOI: 10.24143/2073-1574-2018-1-16-23. — EDN YOQFAC.

8. Kornev I. V. The structure of the human factor / I. V. Kornev, S. V. Ermakov // Bulletin of Youth Science. — 2018. — № 3(15). — С. 23. — EDN YLRDBB.

9. Korovin A. G. Development of methods of human factor influence on ship safety / A. G. Korovin // Bulletin of Kamchatka State Technical University. — 2009. — No. 10. — Pp. 31–36. — EDN NDMJMP.

10. Marinov M. L. Consideration of the human factor in emergency situations at sea / M. L. Marinov, V. D. Klimenko // Operation of marine transport. — 2008. — № 2(52). — Pp. 25–29. — EDN IRGHKB.

11. Tomilin A. N. The human factor: concept, essence of content, problems / A. N. Tomilin // Marine transport operation. — 2015. — № 3(76). — Pp. 95–102. — EDN UYBIPL.

12. Tomilin A. N. Features of the manifestation of the “human factor” and its negative impact on the safety of navigation / A. N. Tomilin, A. L. Borankeshishyan, S. N. Tomilina, R. R. Tuktarov // Operation of maritime transport. — 2022. — № 4(105). — Pp. 36–46.

13. Tomilin A. N. Features of the manifestation of the “human factor” in accidents in maritime transport / A. N. Tomilin, E. M. Dorofeev, A. M. Dorofeev, E. V. Dorofeeva // Operation of marine transport. — 2023. — № 1(106). — Pp. 67–74. DOI: 10.34046/aumsuomt106/11. — EDN VGTTWZ.

14. Tsyganko, E. N. The communicative component of the human factor at sea // Materials of the X1 regional Scientific and Technical Commission on November 28–30, 2013 at 2 p. m. 2. Novorossiysk: Admiral F. F. Ushakov State Medical University, 2014. — Pp. 99–100.

15. Chernyshev, V. F. The human factor in accidents at sea Materials of the 4th Scientific and Technical Conference “Problems of safety of maritime navigation, technical and commercial operation of the seaport”. 2005. Pp. 31–32.
16. Gregory D., Shanahan P. The human element: A guide to human behavior in the shipping industry. / D. Gregory, P. Shanahan, Stationery Office (TSO), 2010.
17. Kuo C. Managing Ship Safety / C. Kuo — LLP, 1998.
18. Karetnikov V. V. On the issue of risk assessment of the use of unmanned means of water transport at the site water areas / V. V. Karetnikov, S. V. Kozik, A. A. Butsanets // Bulletin of the Admiral S. O. Makarov State University of the Marine and River Fleet. — 2019. — VOL. 11. — No. 6. — pp. 987–1002. DOI: 10.21821/2309-5180-2019-11-6-987-1002. — EDN ACCRDQ.
19. Kozik S. V. A psychodiagnostic approach to assessing the fatigue of sailors// Collection of scientific articles of the national scientific and practical conference of the faculty of the Admiral S. O. Makarov GUMRF. September 30 — October 20, 2024. In 2 volumes — St. Petersburg: Publishing house of the GUMRF named after Adm. S. O. Makarov, 2025. Vol. 2. — 240 p.
20. Obodkov I. B., Kozik S. V. Dependence of seafarers’ working capacity on meteorological parameters// Shipbuilding and ensuring the safety of navigation: proceedings of a scientific and practical conference, St. Petersburg. — St. Petersburg: Publishing House of the GUMRF named after Admiral S. O. Makarov, 2025. — 292 p.

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРЕ

Козик Сергей Викторович —
кандидат военных наук, доцент
ФГБОУ ВО «ГУМРФ имени
адмирала С. О. Макарова»
198035, Российская Федерация,
Санкт-Петербург, ул. Двинская, 5/7
e-mail: koserbik@mail.ru, konkurs@gumrf.ru

INFORMATION ABOUT THE AUTHOR

Kozik, Sergey V. —
Candidate of Military Sciences, Associate Professor
Admiral Makarov State University
of Maritime and Inland Shipping
5/7 Dvinskaya Str.,
St. Petersburg, 198035
e-mail: koserbik@mail.ru, konkurs@gumrf.ru

*Статья поступила в редакцию 17 февраля 2025 г.
Received: Feb. 17, 2025.*

SPLINE RECONSTRUCTION OF THE INFORMATIVENESS TEMPLATE IN CORRELATION-EXTREME NAVIGATION TASKS

I. V. Yuyukin

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

The problem of correlation-extreme navigation is addressed based on the reconstructed spline template of informativeness, incorporating a priori information about the safe movement of vessels in conflict navigation spaces. The paper focuses on the practical implementation of intelligent ship motion control guided by the principle of analyzing the geophysical field geometry when enabling autonomous ship movement along an electronic spline trajectory. The study substantiates terrain-based navigation principles by comparing measured navigation parameters with a pre-created virtual informative template via an extreme correlation functional for continuous vessel location updates. An analysis of alternative positioning reveals the advantages and disadvantages of various autonomous map-aided navigation methods, emphasizing their potential accuracy. The hypothesis of spatial and surface field navigation as the sole alternative to satellite systems is examined. Alternative navigation is proposed as an assistive technology to complement traditional satellite positioning, ensuring maximum noise resistance and cybersecurity in operational situational awareness. Integrity monitoring is studied as a modern criterion for validating navigation information. The application of integrity is hypothesized to improve real-time iterative coordinate calculations in alternative positioning. A new procedure is developed to optimize grid approximation point distribution by determining the effective positions of sliding nodes. Computational implementation of a wide range of correlation-extreme navigation tasks is achieved through enhanced Pascal programs. The proposed algorithm, tested with spline function methods, provides harmonized assistance to navigators, extending situational awareness horizons for watch assistants navigating challenging scenarios.

Key words: electronic spline trajectory, informativeness template, map-aided navigation, assisting technology, situational awareness, integrity monitoring, validity.

For citation:

Yuyukin, Igor V. "Spline reconstruction of the informativeness template in correlation-extreme navigation tasks." *Vestnik Gosudarstvennogo universiteta morskogo i rechnogo flota imeni admirala S. O. Makarova* 17.2 (2025): 233–253. DOI: 10.21821/2309-5180-2025-17-2-233-253.

УДК 656.61.052

СПЛАЙНОВАЯ РЕКОНСТРУКЦИЯ ЭТАЛОНА ИНФОРМАТИВНОСТИ В ЗАДАЧАХ КОРРЕЛЯЦИОННО-ЭКСТРЕМАЛЬНОЙ НАВИГАЦИИ

И. В. Ююкин

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

Рассмотрено решение задачи корреляционно-экстремальной навигации на основе реконструированного сплайнового эталона информативности с учетом имеющейся априорной информации об особенностях безопасного перемещения судна в конфликтном навигационном пространстве. Акцентируется внимание на практической реализации интеллектуального управления движением судна на основе соблюдения принципа изученности геометрии геофизического поля при организации автономного движения судна по электронной сплайн-траектории. Приведено обоснование принципа ориентирования по рельефу местности как результата сравнения посредством экстремального функционала корреляции измеряемых навигационных параметров с предварительно созданным виртуальным эталоном информативности для постоянного обновления местоположения судна. Выявлены преимущества

и недостатки использования различных автономных вариантов картографической навигации в результате выполненного обзорного анализа проблематики альтернативного позиционирования в контексте исследования потенциала точности. Рассмотрена гипотеза о навигации по пространственным и поверхностным полям как единственной альтернативы спутниковым системам. Предлагается использовать альтернативную навигацию как ассистирующую технологию, дополняющую традиционное спутниковое позиционирование с целью достижения максимальной помехоустойчивости и кибербезопасности при практической реализации ситуационной осведомленности. Исследован мониторинг целостности как современного критерия доверительной оценки правдоподобной валидности обработки навигационной информации. Предположительно применение феномена целостности гарантирует практическое улучшение итерационного процесса расчета обсервованных координат для альтернативного позиционирования в режиме реального времени. Разработана процедура поиска оптимизации распределения сеточных точек аппроксимации, основанная на принципе определения эффективной позиции скользящего узла. За счет универсальности модернизированных паскаль-программ обеспечивается вычислительная реализация широкого класса задач корреляционно-экстремальной навигации. Апробированный на методах сплайн-функций алгоритм предлагается в качестве гармонизированной поддержки судоводителю для расширения горизонта ситуационного восприятия вахтенным помощником процесса навигации в сложных ситуациях.

Ключевые слова: электронная сплайн-траектория, эталон информативности, картографическая навигация, ассистирующая технология, ситуационная осведомленность, мониторинг целостности, валидность.

Для цитирования:

Ююкин И. В. Сплайновая реконструкция эталона информативности в задачах корреляционно-экстремальной навигации / И. В. Ююкин // Вестник Государственного университета морского и речного флота имени адмирала С. О. Макарова. — 2025. — Т. 17. — № 2. — С. 233–253. DOI: 10.21821/2309-5180-2025-17-2-233-253. — EDN OWLOHJ.

Введение (Introduction)

В рамках модели корреляционного навигационного процесса имеют приоритет задачи аппроксимации геофизического поля, обеспечивающие наилучшую коррекцию навигационных параметров, исследуются алгоритмы сопоставления измерений навигационных полей с их стандартными виртуальными изображениями на основе предварительных оценок информативности с синхронным поиском наилучшей в смысле безопасности траектории движения подвижного транспортного средства [1]. Задача аппроксимации фрагментарного картирования с точки зрения финальной точности позиционирования играет первостепенную роль в альтернативном способе навигации. На инновационном уровне решается задача так называемой *картографической навигации* по реконструированной карте геофизического поля, направленная на корректировку выходных данных с учетом априорной информации об особенностях безопасного перемещения мобильного объекта в конфликтном пространстве [2]. Выбор предварительной траектории зависит от анализа информативности на основе детального изучения изотропного навигационного поля для наискорейшего оперативного вычисления координат с учетом априорной и апостериорной информации с целью достижимости точного совпадения предварительной с исполнительной маршрутизацией.

Интеллектуальное управление перемещением судна по естественным геофизическим полям Земли различной природы понимается как *корреляционно-экстремальная навигация* вследствие математических особенностей обработки навигационной информации [3]. Построение новых систем навигации базируется на практическом применении корреляционного принципа с учетом функционального экстремума. Альтернативная навигация основана на обосновании метода расчета местоположения движущегося средства по вариативному потенциальному или поверхностному профилю поля измерений навигационных параметров при сопоставлении с эталонной картой аномалий естественного поля Земли, рассматриваемых как совокупность геофизических ориентиров с учетом реальной специфики местности в цифровой интерпретации.

Для надежного определения места транспортной единицы с использованием геофизических ориентиров необходимо, чтобы отличия аппроксимированных изогеометрических значений конкретной области геофизического поля были заметно меньше предельной точности масштаба реконструированной карты [4].

При использовании корреляционно-экстремальной навигационной системы (КЭНС) с визуализацией картографического сопровождения местоположение судна обновляется с помощью сравнения измеренных и эталонных образцов геофизического поля вдоль траектории движения мобильного объекта. КЭНС применяются для уточнения в автономном режиме сведений о геолокации, ориентации и других параметрах движущейся транспортной единицы с целью гарантированного удержания объекта на заданном маршруте. Навигация по пространственным и поверхностным геофизическим полям в сравнительной оценке с эталонами картографических реконструкций является перспективной альтернативой ГНСС. Принцип корреляционно-экстремальной навигации в судовождении заключается в том, что в процессе движения судна измеряемые параметры геофизического поля посредством математических критериев правдоподобия постоянно сравниваются с предварительно созданным виртуальным характеристическим эталоном, хранящимся в памяти бортового компьютера [5].

В приложении морской навигации при исследовании эффективности функционирования КЭНС фактически рассматривается применение алгоритмов комплексной обработки различных физических параметров, а также методов одновременного решения задач географической локализации и картографирования в виде так называемых *процедур привязки к местности*. В связи с этим маршрутизация объединяет задачи математического синтеза карты геофизического поля и ориентирования по изолиниям, вдоль которых востребованная реализация поля сохраняет постоянное параметрическое значение. Комбинированная задача программируемого плавания с непрерывным оцениванием картографированного эталона информативности с лучшей точностью, чем счисление пути судна, позволяет постоянно уточнять местоположение судна с помощью специальной бортовой навигационной системы при дискретном измерении параметров геофизического поля при их сопоставлении с дополнительными навигационными данными [6]. Результаты сравнения сосредоточены на интервале наблюдения, и координаты точки, в которой коррелированная разница между измеренными и эталонными значениями будет минимальна, принимаются за обсервацию в режиме слежения.

Эффективным аппроксиматором в вопросе практического использования КЭНС признаются сплайн-функции, обеспечивающие потерю точности корреляционного сопоставления эталонного и измерительного представления геофизического поля на 15–20 % меньше по сравнению с классическими математическими методами [7]. Конструктивный способ устранения осцилляций синтезированной изолинии как минимальной единицы композиции навигационной изоповерхности заключается в построении составной кривой, в которой кусочные полиномы низкой степени последовательно применяются для интерполяции групп характерных функциональных точек. Полученная в результате кусочно-полиномиальная функция в идеальном варианте будет непрерывной в смысле успешности функциональной дифференцируемости, но в общем случае может иметь разрывы некоторых производных в позициях «склейки» последовательных сплайновых сегментов.

Обеспечение стабильности маршрута абсолютно согласуется с физической реализуемостью точности удержания судна на заданном курсе, что является важнейшим фактором адаптивного управления автономного судовождения. Задача сглаживания пути для построения «гладкой» траектории, проходящей через цепь опорных точек, может быть решена оптимальным образом посредством применения *B*-сплайнов [8]. Основой для построения интеллектуального пути используется не составленный из локсодромий минимальный четырехотрезочный многозвенник ломаной линии при задействовании пяти контрольных путевых точек, а маршрутный «коридор» в виде интерактивной оболочки сглаживающего *B*-сплайна, конфигурацию которого формируют по принципу своевременного уклонения от навигационных препятствий [9].

В случае точных измерений навигационных параметров решается задача интерполяции, т. е. построения такой навигационной функции, которая в контрольных точках строго принимает значения навигационных параметров. Если погрешности измерений значительные, то решается задача аппроксимации как отыскание навигационной функции, имеющей плавный характер и проходящей в некоторой окрестности измеренных данных.

В ходе практической реализации исследования сформулированы следующие задачи:

1. Аналитический обзор проблематики задач корреляционно-экстремальной навигации с учетом перспективных возможностей инновации.
2. Апробирование *B*-сплайнового алгоритма для моделирования картографического эталона информативности.
3. Исследование возможности применения феномена целостности данных как критерия доверия к навигационной информации в аспекте успешного функционирования любого варианта корреляционно-экстремальной навигации.
4. Разработка процедуры поиска оптимальной расстановки узлов аппроксимации.
5. Модификация пакета прикладного программного обеспечения синтезирования на основе методов сплайн-функций любых вариаций аномальных фрагментов геофизического поля для практических целей корреляционно-экстремальной навигации.

Методы и материалы (Methods and Materials)

Представляется логичным признать помехоустойчивым основанный на использовании информации о естественных геофизических полях Земли *метод корреляционно-экстремальной навигации* при сплайновой реконструкции эталона картографической информативности. Перспективный корреляционный метод отличается недостаточной разработанностью, ограниченным применением и уступчивой конкурентоспособностью по точности с глобальными навигационными спутниковыми системами (ГНСС).

Основы алгоритмизации альтернативной навигации ориентированы на следующие виды геофизических полей: несколько глобальных поверхностных (поле рельефа земной поверхности и тепловой, оптический, радиолокационный контраст) и два потенциальных (геомагнитное и гравитационное поля) с обязательным выполнением условия точечного зондирования планетарных геофизических полей средствами специальной бортовой аппаратуры¹. Из двух потенциальных полей магнитное является более информативным по сравнению с гравитационным. При этом принципиальные особенности вариативности магнитного поля Земли осложняют его использование в интересах навигации ввиду неустойчивости во времени, вызванной магнитными бурями и геомагнитными пульсациями. Аномалии потенциального поля Земли могут быть использованы как основной источник информации для определения параметров движения мобильных объектов.

В ситуации кибернетической угрозы практически невозможно исказить сплайновый эталон картографированной информативности как визуализированную базовую экспозицию. Манипуляция графическими всплесками невозможна на основе зловерного оперирования математическими коэффициентами методом искусственных алгоритмических подстановок, так как в реальности в бортовом обеспечении программы заложено использование компилированных кодов, а не работа с файлами в исходных текстах языка программирования Pascal. Кроме того, уникальная математическая композиция сплайн-функций концептуально противодействует стороннему вмешательству злоумышленников. Таким образом, ни при каких обстоятельствах не нарушается классический процесс привязки измеренного фрагмента навигационного поля к опорному эталону, и тем самым обеспечивается автономное точное позиционирование подвижных объектов при попытках хакерских атак на целевой математический актив.

¹ Джанджгава Г. И. Навигация по геополям: научно-методические материалы в помощь разработчикам систем автономной навигации с использованием данных о геофизических полях. М.: Научтехлитиздат, 2018. 296 с.

Главная причина устойчивости сплайновых конструкций заключается в кусочной математической архитектуре сплайна, когда локальные нарушения математической композиции не отражаются на общей задаче аппроксимации. Базисные финитные функции алгоритмически препятствуют злоумышленной трансформации многозвенной структуры. Кубический *B*-сплайн может быть выражен в виде разложения на набор многочленов на каждом пятикратном узловом полигоне сеточных контрольных точек. Пять опорных точек, характеризующих единичный кубический *B*-сплайн, алгоритмически минимизированы до числа базовых точек данного интерполянта, что позволяет непосредственно сформировать процесс оптимизации в глобальном масштабе, нивелируя возможные локальные искажения.

Кибернетическое преимущество изолинии, построенной при помощи *B*-сплайнов третьей степени, заключается в том, что изменение одной из характеристических точек линии равного значения навигационного параметра вызывает изменение только четырех соседних сегментов изолинии, что при спуфинговой атаке означает локальность корректировки формы без стратегической модификации общей изолинии, поскольку сплайн представляет собой вторичную абстракцию по отношению к оригинальной алгебраической кривой. Ассоциированный финитный сплайн, синтезирующий по пяти дискретным данным в каждом элементе сплайнового набора искусственную кусочную конструкцию, не заменяет фактическую интерполируемую кривую, но при этом формирует максимально близкую к реальности навигационную изолинию. В худшем варианте кибернетической атаки даже искаженный *B*-сплайн не препятствует последовательному соединению фрагментарных носителей без резких функциональных изменений и разрывов, что формирует реалистичную «склеенную» геометрическую форму в целом при любых геометрических неблагоприятных обстоятельствах.

Запланированная трансформация аппроксимации любой изолинии *B*-сплайном может быть обеспечена на основе применения устойчивых математических комбинаций с возможностью вычислений в масштабе реального времени. *B*-сплайновый подход позволяет генерировать алгебраическую кривую с меньшим отклонением от оригинала с меньшим количеством контрольных точек, обеспечивая при этом требуемую точность формы траектории. Основные особенности рассматриваемого метода проявляются в том, что при его реализации необходимо наличие опорной корректируемой навигационной системы, прецизионных датчиков и априорной информации о навигационном поле в виде цифровой карты, формализуемой по результатам заранее проведенной высокоточной съемки. Предполагается в рамках исследуемой проблемы модифицировать разработанный универсальный алгоритм на основе сплайновой технологии для высокоскоростного моделирования виртуальных карт с целью оперативного эталонного сравнения с фактическими измерениями навигационного поля в рамках проекта автономной морской навигации. Дополнительным фактором кибернетической неуязвимости является запрограммированная возможность целенаправленного варьирования группой масштабирующих коэффициентов на основе всестороннего понимания теории сплайн-функций при определении динамичности синхронного балансирования сплайновыми параметрами.

Мореходная астрономия как метод противодействия средствам радиоэлектронной борьбы основана на специальном тренинге судоводительского состава, при этом практикующие судоводители не имеют достаточных астронавигационных навыков. Традиционные методы получения независимой астрономической информации в условиях дефицита времени у судоводителя на вахте часто остаются не востребованными ввиду трудоемкости выполнения математических расчетов². Наличие на мостике в лучшем случае официального виртуального морского астрономического альманаха Sky Mate Pro или его вариативного аналога, обеспечивающего штурмана точной информацией для решения астронавигационных задач в море, можно рассматривать как исключительный случай. При практической работе с заменяющими звездный глобус таблицами

² Гагарский Д. А. Мореходная астрономия. М.: Морречцентр, 2014. 200 с.

типографского издания выявляются определенные фактические недостатки³. Кроме того, секстан не является в настоящее время обязательным конвенционным оборудованием, а, следовательно, выполнить обсервацию средствами мореходной астрономии не представляется возможным при отсутствии на борту инструмента.

Следует отметить, что правительство США официально оставляет за собой право оперировать режимом селективного доступа GPS для гражданских и военных потребителей. Гражданским потребителям открытый канал может быть технически деактивирован при сохранении исключительного доступа военным пользователям спутниковой системы в любом месте на земной поверхности. Региональное отключение GPS-сигналов гражданского диапазона в Ближневосточном регионе в условиях военного конфликта в Ираке в 1990–1991 гг. при проведении стратегической операции государств антииракской коалиции в зоне Персидского залива «Буря в пустыне» ранее уже использовалось. Эта технология достаточно отработана для того, чтобы ее можно было локально применять на практике повсеместно.

В условиях современности кибернетическая атака на GPS также становится абсолютной реальностью. ГНСС могут быть подверженными намеренной помехе глушения спутникового сигнала при ускоренном развитии специфичного оборудования. При помощи незаконного применения специальных технических средств можно организовать искажения реальных данных ГНСС в виде спуфинг-атаки на любой морской акватории: как в открытом море, так и в прибрежном плавании. Спуфинг-технология основана на модуляции псевдослучайного кода на частотах ГНСС с переориентированием судового приемника от слабого спутникового сигнала на фальсифицированный сильный сторонний сигнал [10]. Показательным примером является инцидент массового спуфинга у побережья Новороссийска. Согласно мотивированному сообщению капитана одного из двадцати атакованных судов, приемник GPS в течение нескольких дней позиционировал координаты в районе аэропорта Геленджика, в то время, когда судно, фактически, дрейфовало на расстоянии около 25 миль от побережья [11]. При этом автоматический спутниковый приемник фиксировал безопасную точность системы в пределах 100 м при индикации высоты судовой антенны 39 м под водой [12]. Самотестирование спутниковой аппаратуры проходило успешно, но это не меняло фактической ситуации. Ситуация некорректности работы ГНСС в Черном море является очевидным доказательством современной повсеместной реальности массового спуфинга [13]. Вследствие анализа приведенных фактов можно сделать вывод необходимости поиска решений реализации альтернативы ГНСС в виде практических приложений КЭНС в вопросах морской тематики.

КЭНС как ассистирующая навигационная система, дополняющая традиционную навигацию, отличаются помехоустойчивостью и кибербезопасностью. Дублирующая система позиционирования, основанная на измерениях параметров гравитационного поля, имеет абсолютную помехозащищенность ввиду невозможности злоумышленного создания искусственных гравитационных помех. Использование ассистирующей технологии способствует повышению помехоустойчивости радионавигационных систем ввиду того, что в концепции гравитационной или магнитной навигации никакие сигналы не излучаются и не принимаются извне, а, следовательно, альтернативные инновационные системы можно считать безопасными в кибернетическом смысле. При этом нивелируется такой критичный недостаток ГНСС, как минимальная устойчивость к радиотехническим помехам, обусловленная низким уровнем спутникового сигнала у поверхности Земли. Кроме того, не утрачивает своей актуальности проблема работы в условиях естественных и преднамеренных помех, включая спуфинговое изменение мощности сигналов от космических аппаратов, вплоть до их полного отключения. В случае отказа основной системы позиционирования резервный вариант автоматически переключается на прием навигационных данных в качестве практической реализации ассистирующей технологии.

³ Бруснецов В. П. Практическая мореходная астрономия. СПб.: Изд-во ГМА им. адм. С. О. Макарова, 2008. 120 с.

При исследовании перспективности альтернативного спутниковым системам навигации метода позиционирования представляется целесообразным применить концепцию кибернетической осведомленности в приложении успешного функционирования КЭНС для реалистичной оценки безопасности морского транспорта от непредсказуемого сценария угроз хакерских атак. Целесообразность онтологического инжиниринга основана на прогнозе достижимости эффекта абсолютной предсказуемости местоположения судна в локальной среде недееспособности спутниковых сигналов при практической реализации потенциала ситуационной осведомленности.

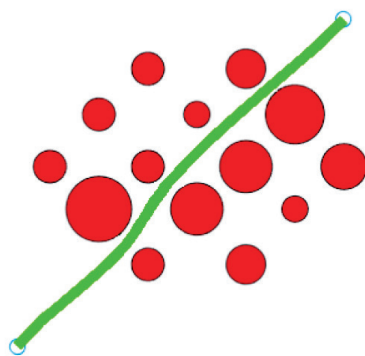
В парадигме современного планирования перехода движение судна выполняется по кратчайшей траектории в обход набора геометрически замкнутых выпуклых множеств навигационных препятствий без учета влияния гидрометеорологических факторов. Успешное решение задач альтернативного судовождения зависит от умения судоводителей выбирать эффективную стратегию планирования маршрута как поиск оптимальной траектории на основе реализации функции потенциала отталкивания путевых точек маршрута за пределы контура уязвимых от опасностей запретных районов плавания как противодействие угрозе безопасности [14]. При этом допускаются тактические изменения маршрутизации как последствие несовпадения предварительного и исполнительного планов перехода по причине воздействия гидрометеорологических факторов с осознанным допущением увеличения пройденного расстояния.

На основе полной информации о начальной и целевой позициях маршрута необходимо оптимальным образом выбрать путь, свободный от столкновений с препятствиями, исходя из предположения о вероятностном существовании минимального расстояния между различными опасностями, обеспечивающего безопасный проход подвижного объекта [15]. В результате электронного подъема карты как реализации графического представления конфликтности навигационной среды в виде контуров окружностей разного размера оптимизируется математическое решение с учетом различных критериев для получения эффективного пути 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 навигационной среды, что впоследствии, безусловно, спровоцирует несовпадение предварительной и исполнительной прокладок. Подход к планированию траектории на основе использования концепции информативности навигационного поля, в которой физические препятствия представлены отталкивающими окружностями, является перспективным. Алгоритм планирования траектории на основе сплайн-функций 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 по причине воздействия гидрометеорологических факторов.

Прагматичный алгоритм традиционно рассматривает стандартную маршрутизацию судна в двумерном конфигурационном варианте, где навигационные препятствия представлены в виде конечной группы непересекающихся окружностей разного размера, как показано на рисунке (с. 240). Цветовая палитра использована для каждого одиночного круга как степени соответствия опасности уязвимого района плавания в конфликтном поле навигационной среды. Так, например, красный цвет в «менталитете» штурмана привычно ассоциируется с атрибутом No Go Area как графическим показателем высокого риска опасности следования судна в недопустимой близости контурного круга отталкивания от запретного района.

При апостериорной оценке точности местоположения фиксируется минимальное расстояние линии пути от навигационных препятствий с учетом средней квадратической погрешности (СКП) как фактической реализации затратной функции. Зеленый цвет траектории символизирует безопасность маршрута. Предварительный маршрут в зеленом цвете безопасности оптимизируется вариативностью «гладкости» применяемой сплайн-функции с явным признаком

успешной дифференцируемости аналитического функционала. Оригинальный метод, основанный на сплайн-функциях, позволяет получить «гладкую» траекторию без столкновений с препятствиями для любой сложности навигационной среды. Поэтому представляется логичным каждую опасность условно обозначить отдельным кругом красного цвета при неукоснительном выполнении математического условия определения недопустимого кратчайшего сближения, позволяющего гарантированно обеспечить поиск *зеленого коридора безопасности* для движущегося по траектории судна (см. рисунок). Многообразие геометрии физических препятствий может быть априорно зафиксировано конечным набором непересекающихся окружностей. Различная степень опасности навигационных препятствий описывается диаметром круга запретного района плавания. Радиус круга является аналогом понятия веса навигационного препятствия с целью реализации максимальной вероятности заблаговременного маневрирования от уязвимой зоны за счет уклонения от геометрии красного контура опасности.



Парадигма планирования перехода
в обход замкнутых множеств навигационных препятствий [16]

Представленная на рисунке гипотетическая ситуация распределения навигационных препятствий демонстрирует сконцентрированный внутри каждой окружности групповой набор навигационных ограничений различной степени опасности. На электронной карте покрывающие запретные районы окружности с текстурно-цветовой красной заливкой периметра можно оперативно обозначить при использовании редактора ручной корректуры с учетом СКП навигационной функции. Расчет СКП выполняется по классической формуле математических основ судовождения как квадратный корень из суммы квадратов СКП навигационных параметров, умноженных на частные производные функциональных аргументов. Совместное действие случайной и систематической погрешностей измерений интерпретируется как дополнительное приращение навигационной функции.

В ситуации высокой вероятности сближения с препятствием на дистанцию, сопоставимую с трехкратным значением СКП, задействуется *метод рационального решения обхода навигационного препятствия с противоположной стороны* за счет реализации перестроения сплайновой геометрии. Процедура оптимизации распространяется только на те точки траектории, которые определяют ее сплайн за счет реализации феномена плавности, в то время как при исследовании фактора минимизации пути учитываются 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 сплайновый алгоритм оптимизации пути требует в среднем на 10 % меньше итераций, чем любой альтернативный математический подход при гарантированной успешности нахождения безопасного маршрута в восемнадцати различных моделируемых навигационных средах [17].

Точность корреляционно-экстремального подхода зависит от информативности выбранного участка поля навигационных измерений, его предельной изменчивости, уровня погрешностей датчиков и предельной точности масштаба карты, априорной неопределенности в знании текущих координат местоположения предсказательного моделирования процесса навигации в конфликтной неструктурированной среде. При использовании в морской навигации поля аномалий земной гравитации, ввиду стабильности и возможности измерений с помощью хорошо разработанных инерциальных датчиков в виде высокоточных акселерометров и гравиметров, ведутся интенсивные исследования по вопросу оценки практической точности нестандартной обсервации.

Погрешность первоначальной плановой процедуры «привязки к местности» на основе измерений бесплатформенных инерциальных навигационных систем как основы комплексной системы навигации первоначально составляла 200–500 м без учета возможности формирования векторных карт по высокоточным съемкам [18]. В отличие от модульных карт, где каждая точка пространства характеризуется одним параметром вектора магнитной индукции, в векторных картах каждая точка пространства фиксируется главной, региональной и аномальной составляющими. Неточности векторного представления рельефа местности не превышают погрешности исходного картографического материала. Указанные компоненты, являясь статистически независимыми, позволяют повысить потенциальную точность нетрадиционной навигации.

В первоначальных экспериментах на информативных участках магнитного поля проводилось имитационное исследование с учетом погрешности бортовых измерений и картографирования с учетом принятых вариаций на уровне 50–100 нТл. При начальных позиционных экспериментах достигалась точность оценки местоположения в пределах одного дискрета навигационного поля с показателем 500 м [18]. Согласно сопоставимым данным ФГУП «ВНИИФТРИ» (Менделеево), величина достижимой погрешности навигации по геофизическим полям в первых экспериментах составила 540 м на основе использования программно-математической модели макета аппаратуры пятилетней давности при оценке совместной обработки гравитационных и магнитных измерений [19]. По данным натурных экспериментов концерна ЦНИИ «Электроприбор» (г. Санкт-Петербург), показатели точности вычисления координат в условиях современности улучшились практически десятикратно до диапазона 50–70 м при условии применения в обработке корреляционно-экстремальной информации надежных алгоритмов фильтрации [20]. Кроме того, на тестовом компьютере при усреднении по времени 250 запусков позиционных решений было определено, что для обработки всех измерений при реализации *субоптимального алгоритма* альтернативного позиционирования необходим допустимый минимум времени, равный 30 с. При абсолютной степени картографической изученности гравитационного и магнитного полей в детальности и информативности аномальных компонент геофизики Земли существуют вариационные отличия в зависимости от топографических особенностей района местности. Поэтому точность навигации в настоящее время колеблется от десятков до сотен метров.

Предварительный анализ потенциальных полей ориентирован на выделение различных локальных аномалий, являющихся важными источниками информации для навигационных определений местоположения. Аномальная составляющая геофизического поля для формирования эталона информативности выделяется *методом формирования измерительных функциональных приращений* на соответствующей дискретности корреляции [21]. При точечном зондировании геофизического поля решение о местоположении принимается после прохождения определенного интервала, величина которого зависит от точности картографирования и погрешностей физических бортовых измерений. Например, в зависимости от высоты полета летательного аппарата и морфологии местности дискретность корреляции меняется в пределах 10–25 км при скорости 10–12 км/мин. Вследствие этого проход интервала корреляции для воздушного транспортного средства займет около 2 мин для получения надежной обсервации [18]. При существующих скоростных показателях морских судов проблема оперативной «привязки к местности» теряет критичный характер по фактору времени. Особенность задач коррекции показаний морских навигационных систем заключается в длительном характере процедуры

коррекции, что обусловлено, в том числе, недостаточно высокой скоростью движения морских объектов и, соответственно, необходимостью учета изменчивости оцениваемого вектора состояния, который включает ошибки оценки навигационных параметров [22].

КЭНС переходит из слежения в режим накопления информации в ситуации превышения допустимых координатных значений горизонтальной или вертикальной неопределенности в качестве дополнительных уровней защиты, сравниваемых с соответствующими им аварийными пределами. При этом бесплатформенные инерциальные навигационные системы становятся недоступными для выполнения коррекции координат и летчику целесообразно некоторое время дополнительно пилотировать над пересеченным ландшафтом с целью «привязки» к местности. В результате практического использования феномена информативности КЭНС возвращается в режим слежения при фиксации высокой достоверности в точности определения координат. Эффективный выбор подходящего района в смысле информативности имеет решающее значение для корреляционно-экстремальной навигации. При решении проблемы информативности особый интерес представляет алгоритм расширенного поиска экстремумов по всему геофизическому полю, основанный на адаптивном пороговом значении для выбора подходящего района.

С целью апробации нового подхода был проведен успешный эксперимент по точности сопоставления картографических изображений в арктических областях на основе данных о гравитационных аномалиях. Алгоритм использует значения градиентных характеристик, полученные с помощью вычисления свертки параметров расширенного экстремума для всего поля и данных справочной карты силы тяжести, чтобы детально охарактеризовать изменяющиеся характеристики гравитационного поля. На основе метода адаптивного порога могут быть заданы различные предельные значения градиента в соответствии с данными о силе тяжести в различных зонах тестирования как вариации критерия выбора подходящих областей геофизического поля с высокой степенью пригодности к задачам пассивной инерциальной навигации. Точки данных с градиентами, превышающими указанный порог, идентифицируются как локальные точки областей сопоставления для учета изменяющихся характеристик гравитационного поля. В качестве подходящей для тестирования выбирается информативная область с большим количеством так называемых *кандидатских точек*. Для проведения имитационных экспериментов были выбраны девять репрезентативных районов в Северном Ледовитом океане с различными характеристиками изменения силы тяжести в целях проверки эффективности предложенного алгоритма для улучшения навигационных характеристик всей системы альтернативного позиционирования. Имитационные эксперименты показали, что в выбранных районах, где доля локальных точек достигает 70 %, с помощью алгоритма расширенного поиска экстремумов можно получить положительные результаты определения местоположения с учетом технических возможностей инновационного направления навигации [23].

При выборе подходящих областей для сопоставления с целью оперативной «привязки» к рельефу местности важно заранее точно определить географические области, в которых наблюдается существенное изменение значения гравитационной аномалии. Коррекция инерциальных систем навигации основана исключительно на сопоставлении информации, передаваемой от датчика геофизического поля, с эталонной картой данного поля для выявления степени близости измеренного профиля рельефа местности с хранящимся в памяти бортовой вычислительной системы эталонным профилем. Вследствие этого обоснованным является применение нестандартных подходов к заблаговременному оптимальному картированию эталонов местности во избежание потери обсервации при локальном отсутствии информативности навигационного поля. В картографической области, в условиях слабого гравитационного поля, доступная эффективная информация о гравитационном поле становится незначительной, и трудно получить точные результаты сопоставления в поддержку процедуры «привязки», что снижает навигационные характеристики автономной системы. Обоснованный предварительный выбор подходящего района сопоставления оказывает непосредственное влияние на финальные навигационные характеристики в иерархии эффективного функционирования навигационной системы.

Для теоретического повышения точности определения координат подвижных мобильных объектов представляется целесообразным использовать в судовождении потенциал концепции максимального интегрирования разнородных датчиков для непрерывного высокоточного местонахождения на основе микширования всевозможных радиочастотных сигналов с параллельной визуализацией электронного картографирования [24]. Объединение датчиков различных модальностей позволяет получать статистически более точные данные при реализации современных картографических решений для получения точного представления об окружающей среде [25]. Новая парадигма преодоления уязвимостей глобальной навигации заключается в максимальном комплексировании различных приемников с широким спектром радиочастотных сигналов в качестве дополнительной навигационной информации к возможностям ГНСС взамен критического исключения спутниковых систем с целью однозначного перехода к альтернативному позиционированию.

Исключительное использование ГНСС в современных условиях не гарантирует постоянного выполнения для морских потребителей требования непрерывного получения координатно-временной информации без искажений. Переориентирование в условиях недоступности или недостоверности спутниковых систем на запасной помехоустойчивый вариант позиционирования возможно при использовании альтернативных средств навигации. В неблагоприятный момент, когда ГНСС становятся недоступными, подвижные объекты для успешного продолжения навигации могут использовать максимальную интеграцию сенсорных систем в рамках совместной радиосвязи с одновременным электронным картографированием.

Эксперимент, демонстрирующий компромисс между точностью геолокации и концентрацией данных позиционирования, выявил, что итоговая ошибка локализации после 30 с отсутствия GPS была уменьшена по сравнению с использованием только классических инерциальных систем с 55 м до 6 м при применении комбинированного варианта навигации [26]. Интегрированная навигационная система с несколькими датчиками имеет решающее значение для повышения непрерывности и точности определения местоположения в интеллектуальных транспортных системах. Глобальная система позиционирования (GPS) с учетом показателей китайской спутниковой системы BeiDou System (BDS) с инерциальным измерительным блоком (Inertial Measurement Unit (IMU)) при визуальной одометрии (Visual Odometry (VO)) являются широко используемыми современными датчиками благодаря возможности их взаимного дополнения. В сложных навигационных условиях многолучевые помехи, отсутствие прямой видимости и недостаточное количество спутников ухудшают качество классического определения местоположения. Поэтому для исправления накопленных ошибок IMU и ненадежной обсервации GPS требуется надежный метод VO, позволяющий транспортному средству устойчиво локализовать себя в навигационном пространстве.

Алгоритмы фильтрации обычно используются при объединении нескольких датчиков. Для того, чтобы решить проблему точности геолокации, предлагается адаптивная и надежная стратегия для интегрированной навигационной системы. Для построения вектора измерений может быть использован метод двойной проверки качества GPS для реализации адаптивного переключения фильтра. Испытания показали, что точность горизонтального и трехмерного позиционирования адаптивной робастной стратегии составляет 5,45 м в ситуации GPS/IMU/VO и 5,83 м для варианта GPS/IMU [27]. По сравнению с традиционным алгоритмом GPS и алгоритмом комбинирования без адаптивных и робастных инноваций точность трехмерного позиционирования улучшилась на 69,49 % и 44,64 % соответственно. Результаты валидационных экспериментов показывают, что предполагаемая точность определения местоположения алгоритма комплексной навигации улучшилась на 40–50 % по сравнению с использованием классического фильтра Калмана в одномодальном глобальном позиционировании [28].

Современные требования к надежности и непрерывности альтернативной навигации в условиях помех и недоступности сигналов ГНСС требуют разработки новых методов и средств повышения стабильности и надежности навигационных систем [29]. Одним из способов повышения

помехоустойчивости навигационных решений является создание интегрированной навигационной системы, основанной на использовании КЭНС. Современному судовождению тактически необходима альтернативная надежная и безотказная система местоопределения, работающая повсеместно и в любое время с точностью, соответствующей стратегическому назначению непрерывной всепогодной навигации гражданских потребителей. Обладая в большинстве применений практически сопоставимыми с ГНСС потенциальными возможностями в отношении точности, универсальности, способности интеграции с другими системами при невысокой стоимости аппаратуры ГНСС превосходят пользователей КЭНС по принципиально важному показателю: абсолютной автономности, с учетом ряда дополнительных преимуществ. В отличие от ГНСС, КЭНС ориентируются относительно реальной поверхности Земли, а не условного референц-эллипсоида, обеспечивают автономную навигацию как в воздушной, так и в морской среде, обладают полной помехоустойчивостью и скрытностью функционирования, не нуждаются в существенных финансовых затратах на эксплуатацию, способны обеспечить весьма высокую устойчивость и не оказывают негативного влияния на экологическую обстановку.

Представляется целесообразным для эффективного обеспечения максимальной точности определения местоположения подвижного объекта использовать новые возможности автономной корреляционно-экстремальной навигации в любых обстоятельствах неопределенности спутниковых систем. Ситуацию точности электронной системы определения местоположения можно улучшить кардинально при размещении микшированных данных в виртуальном облаке, так что всякий раз, когда спутниковая информация становится локально недоступной или ненадежной, происходит мгновенное переориентирование аппаратуры на резервные комплексированные сигналы, обеспечивающие продолжение непрерывной точной навигации с помощью синтезированного компьютерного картирования.

Стремление к максимальному интегрированию сигналов улучшает точность навигации как процесса до приблизительной сопоставимости с точностью ГНСС без использования дифференциального режима. При этом потенциал ГНСС в виде уникального сочетания дециметровой точности определения координат, глобальной доступности информации в любой точке на земной поверхности в любое время и при любых метеоусловиях не отвергается, но дополняется перспективными разработками [30]. Достижимая точность технологии высокоточной навигации (в англоязычной литературе Precision Point Positioning (PPP)) находится в пределах нескольких сантиметров [31]. При этом длительность инициализации для вхождения в режим PPP может составить 30–50 мин ввиду влияния *геометрического фактора*. В структуре ГНСС критерий геометрического фактора позволяет количественно оценить влияние взаимного расположения спутниковых ориентиров на финальную точность обсервации.

Основной проблемой при построении следящих навигационных систем является синтез эффективных алгоритмов хранения и воспроизведения геофизических данных в цифровой форме для их практического применения. Оптимальные результаты могут быть достигнуты при восстановлении изоповерхностей с помощью кубических *B*-сплайнов, обеспечивающих как минимум четырехкратное сжатие массивов данных по сравнению с традиционными методами. Вариативно точностные показатели корреляционно-экстремальной навигации можно улучшить на основе практического применения *B*-сплайновых алгоритмов для обработки навигационной информации. Абсолютное доверие к спутниковым методам судовождения повышает риск возникновения аварийной ситуации. В открытом море наличие дополнительной информации о местоположении судна, полученной независимым способом, придает работе судоводителя уверенность в своих действиях.

Результаты (Results)

Апробированный *B*-сплайновый алгоритм является предельно универсальным ввиду того, что позволяет моделировать практически любую навигационную изоповерхность. Сплайн-функции являются универсальным математическим средством изометрического синтеза

геофизического поля по дискретным зондированиям точечного функционала ввиду независимости от конкретного вида фиксируемого параметра. Формат функции определяет только объем памяти судового компьютера с предварительно рассчитанными скалярными коэффициентами и узловыми координатами для вычисления в масштабе реального времени значения навигационной функции по номеру сеточного интервала. Представляется нерациональным рассчитывать массив данных при вычислении каждого значения, более продуктивно в аспекте быстродействия вычислений при каждом расчете вызвать из базы регулярных данных в оперативной памяти компьютера однократно сформированные скалярные сплайновые параметры.

Унифицированным вариантом гарантированного приближения изоповерхностей является применение методов базисных сплайн-функций. *B*-сплайновые тензорные произведения не требуют явного задания производных, и локальное изменение контрольных узлов не приводит к необходимости повторного вычисления всей навигационной изоповерхности. При существующей вариативности применения базисных сплайнов выдвигается гипотеза в пользу оптимальности кубической *B*-сплайновой конструкции с управляемой кривизной для моделирования навигационных изоповерхностей любой степени геометрической сложности.

Метод *B*-сплайнов предоставляет возможность получать приемлемую апробированную точность текущих координат судна при одновременно ограниченных требованиях к объему памяти бортового компьютера. На основе результатов авторского вычислительного эксперимента при использовании кубических *B*-сплайнов получена практическая точность расчета в числовом диапазоне 10^{-6} – 10^{-8} погрешности навигационного параметра как реализация возможности реалистичной оценки погрешности сплайн-аппроксимации [32]. Математический аппарат двумерной аппроксимации применяется в аспекте исследования оптимизации моделирования навигационной изоповерхности методами базисных финитных сплайнов на основе модифицированного метода наименьших квадратов. Практическая реализация корреляционно-экстремальной навигации осуществляется при соблюдении принципа знания геометрии геофизического поля в виде трехмерной карты сплайнового профиля как эталона информативности при организации автономного движения судна по электронной сплайн-траектории.

При наличии аномальных ошибок в измерительных погрешностях альтернативной навигации для решения проблемы их нивелирования разработаны алгоритмы в рамках стохастического байесовского подхода с использованием модификаций расширенного фильтра Калмана [33]. Обработка измерительной информации на основе базисных сплайнов позволяет корректно определять ошибки алгоритмической модели состояния, а также учитывать неполноту и неопределенность исходной информации. Измерительная погрешность датчиков следящих систем различной физической природы гарантированно обнаруживается в виде геометрической флуктуации на основе апробированного метода визуализации сплайновой изоповерхности за счет нарушения «гладкости» и условий «склейки» доменов синтезированного электронного профиля изоповерхности. Адаптивный алгоритм сплайн-аппроксимации гарантированно может быть использован для восстановления любой поверхности геофизического поля с элементами *сглаживания* в синхронной реализации вопроса необходимой картографической точности. Под сглаживанием экспериментальных данных понимается переход от исходного распределения результатов измерений неплавного характера из-за наличия погрешностей к плавной композиции данных.

В аспекте практической реализуемости концепции корреляционно-экстремальной навигации выполнена последовательность компьютерных визуализаций аппроксимированного вариативного картографического эталона информативности фиксированных фрагментов разновидностей геофизических полей [6], [21], [24]. Альтернативный вариант навигации использует специальный алгоритм сравнения измерений геофизических аномалий в текущем положении с синтезированными данными навигационного поля для постоянной коррекции положения подвижного объекта. Математический аппарат базисных сплайнов позволяет создать для автономного способа навигации надежную картографическую основу на конкретных примерах сплайнового моделирования карты

геофизического поля. Представляется целесообразным подход к синтезированию геофизического графического профиля на основе методов сплайн-функций с целью повышения геометрической схожести аппроксимированной изоповерхности с целью дальнейшего повышения точности позиционирования при использовании корреляционно-экстремальной навигации в морских приложениях.

В рамках апробированного алгоритма двумерной B -сплайновой аппроксимации разработана процедура последовательной оптимизации узлов с ее синхронной реализацией в виде дополнительной подпрограммы прикладного программного обеспечения. Разработанная процедура программируемого размещения узлов на интервале аргумента создает альтернативу фиксированной сетке координат по *схеме Марсдена*. Эффективный подбор узлов осуществляется автоматически с учетом обеспечения наперед заданной погрешности аппроксимации. В качестве меры точности используется евклидова норма погрешности приближения навигационной изоповерхности. Функциональность нормализованного базиса на сегменте аппроксимации соблюдается за счет использования минимально допустимого количества контрольных узлов. Для реализации сглаживающего эффекта при непрерывном изменении кривизны траектории с помощью B -сплайна необходимо не менее пяти контрольных точек.

Базисные финитные конструкции обеспечивают точную подгонку сплайновой кривой к набору запланированных доминирующих узлов, что обусловлено использованием принципа скользящего узла, поскольку правильно выбранные реперные точки играют важную роль в получении лучшей аппроксимации алгебраической кривой любой степени сложности. Для вычисления производных в узлах единичного кубического B -сплайна в первом приближении используется пятиточечная интерполяция. Суть стратегии оптимизации сводится к поиску хаотических скользящих узлов на неравномерной сетке. Входными данными являются массив координат исходного точечного базиса и величина предельной допустимой погрешности. Первым узлом назначается первая точка запланированного базиса на основе неравномерного распределения последующих точек на всем сеточном отрезке.

Первый этап оптимизации сводится к определению первого узла в середине начального сеточного сегмента и синхронному перемещению второго узла по точечному базису на равное погрешности расстояние с параллельным расчетом первых производных в последующих узлах. При этом максимальное расстояние смещения не должно превышать заданной погрешности аппроксимации. При каждом переходе к последующей точке решается задача минимизации расстояния от базиса до сплайна путем вариации сплайновых производных в узлах. Перед выполнением каждого тактического шага проверяется отсутствие нарушения базисной функциональности между предыдущим и последующими узлами. Итерации повторяются до момента выхода погрешности аппроксимации за пределы «коридора» точности. При выполнении данного условия за каждый последующий узел при организации счета от второго узла принимается точка, отстоящая на величину допустимой погрешности от предыдущей. На втором этапе определяется примерное расположение узлов с синхронным вычислением монотонных производных в них по принципу нахождения текущего узла в движении от предыдущего к последующему с проверкой функциональности. Итерационный процесс заканчивается при полной оптимизации распределения всех сеточных точек. Практически процедура оптимизации сходится за две-три итерации. Согласно проведенному вычислительному эксперименту, скорость вычислений увеличивается в 2 раза по сравнению с применением *схемы Марсдена*. При реализации эмпирического подхода время работы подпрограммы замерялось в тысячных долях секунды с заикливанием на 100 000 при решении одинаковых тестовых примеров. Результаты быстрогодействия в цифровой реализации вывелись на дисплей компьютера в оперативной среде Turbo Pascal.

Расчет сплайн-функций и значений производных ориентирован на умножение и сложение, что алгоритмически обуславливает высокую вычислительную скорость расчетов. Положительным аспектом применения принципа скользящего узла являются хорошая сходимость и вычислительная устойчивость процедуры. Полученные преимущества в быстродействии и устойчивости вы-

числений программной реализации оптимизационной процедуры позволяют повысить компактность хранения и скорость обработки навигационной информации при включении разработанного прикладного модуля составной частью в программное обеспечение бортового компьютера.

Положительный результат моделирования в примерах аппроксимации фрагментов различных вариантов геофизического поля [6], [21], [24] может быть использован в качестве достоверного эталона информативности для организации точного альтернативного позиционирования. Апробированный на методах сплайн-функций алгоритм предлагается в качестве гармонизированной поддержки судоводительскому составу для интеллектуальной поддержки принятия решений с целью снижения психологической когнитивной нагрузки. Трехмерное картографирование с реализациями на компьютерных устройствах отображения дисплейного типа расширяют горизонт ситуационного восприятия вахтенным помощником навигации как процесса в сложных обстоятельствах плавания с применением элементов виртуальной реальности для возможности повышения надежности контроля местоположения за счет наглядности визуального ориентирования по эталону картографирования. Универсальность составленных паскаль-программ обеспечивает вычислительную реализацию широкого класса задач корреляционно-экстремальной навигации. Модернизированный пакет прикладных программ остается многофункциональным в возможности расчета и визуализации на компьютерном дисплее электронных проекций любой навигационной изоповерхности при использовании авторской компьютерной анимации.

Обсуждение (Discussion)

При маршрутизации у потребителя может произойти ухудшение *геометрического фактора*, при этом пользователь бортовой аппаратуры может предполагать, что подвижной объект под его управлением продолжает осуществлять высокоточную навигацию. Поэтому судоводителю необходимо предоставить возможность конструктивно оценивать *целостность навигационных данных*, чтобы, во-первых, у него была возможность определить завершение процесса инициализации и, во-вторых, он мог с заданной доверительной вероятностью выполнять высокоточное определение местоположения. В отдельных случаях влияние многолучевости может вызвать аномальную ошибку измерений до 100 м, а погрешность измерения псевдодальности, обусловленная ионосферной рефракцией, может достигать значений 30–40 м для космических аппаратов на низких орбитах [31].

Принципиально важным является рассмотрение применения новой коммуникационной стратегии для обмена комбинированной информацией, согласно которой вместо передачи с фиксированной скоростью данные передаются только тогда, когда ошибка определения местоположения судна не превышает заданный предельный порог допустимой погрешности с прогнозируемой вероятностью как нарушение критерия целостности. Постулат *целостности* рассматривается как современный итерационный критерий доверительной оценки правдоподобной валидности обработки навигационной информации. Под целостностью автономной системы позиционирования понимается независимая способность навигационной аппаратуры обнаруживать ненормальную ситуацию при измерении, которая может привести к координатной погрешности, превышающей заданную границу допустимой возможности.

От применимости критерия целостности зависит способность технической системы информировать потребителей услуг об ухудшении точности обсерваций за счет оперативного обнаружения и исключения измерений навигационных параметров с аномальными ошибками. Автономный контроль целостности характеризует способность ЭСОМ обнаруживать неточности функционирования и своевременно исключать возможность использования недостоверных данных пользователями бортовой аппаратуры при недопустимых отклонениях рабочих характеристик. При реализации процедуры «мониторинга целостности» интервал между моментом обнаружения аномалии и доведения информации до пользователя составляет не более 6 с [31].

При навигационном использовании ГНСС аппаратура целостности каждые 10 с сравнивает дифференциальные поправки от опорной станции со своим собственным эталонным набором

поправок, подавая сигнал тревоги, если разница между поправками превышает наперед заданное пороговое значение. Если диапазон между расчетными и наблюдаемыми результатами определения места судна превышает предел защиты, традиционно устанавливаемый в морских приложениях на уровне 25 м, то подается блокирующий сигнал, и обсервация не может быть использована, так как данные позиционирования не прошли проверку на *целостность определения навигационного местоположения*, т. е. математически реализуется предупреждение судоводителя в пределах заданного периода времени в случае, если ошибка геолокации превышает допустимый предел. По сути, феномен целостности фиксирует меру доверия к навигационной информации для практического использования потребителем. Базовой информацией для проверки целостности работоспособности ГНСС являются данные о техническом состоянии спутников и их неисправностях, возможных искажениях сигналов в каналах передачи данных, об отказах и недопустимых погрешностях навигационных параметров в бортовой аппаратуре, а также о рисках использования недостоверной информации.

При реализации статистического компьютерного моделирования для анализа автономной системы «мониторинга целостности» навигационных данных спутниковых радионавигационных систем установлено, что если навигационный спутник недееспособен, то признак неисправности появится в информации навигационных сообщений в альманахе системы на всех навигационных спутниках не позднее чем через 16 ч [34]. При этом сообщение о недееспособности передается потребителю в составе оперативной информации не позднее чем через 1 мин [31]. Ориентированные на применение критерия целостности алгоритмы позволяют оперативно обнаруживать недопустимое ухудшение в работе навигационной системы и своевременно принимать ответственное решение о выборе альтернативной системы позиционирования.

Данный критерий в навигационных целях может быть применен в сложных технических системах судовождения для определения необходимости организации оптимального итерационного цикла. ЭСОМ с высокой степенью целостности должна своевременно останавливать итерационный процесс с целью обеспечения надежности показателей работы в любое время и при любых условиях. Поэтому целостность необходимо понимать как эффективный критерий для принятия решения о возможности реализации повторной итерационной процедуры расчета координат местоположения судна. Стандартно итерационный процесс завершается после выполнения проверки окончания вычислительной процедуры по условию соответствия финальной точности расчетов в виде разницы между двумя последовательными итерациями с наперед заданной по практическим соображениям допустимой погрешностью как успешной реализацией условия целостности. По мере того как компьютеризированные системы революционизируют мостики современных судов, а ЭКНИС становится альтернативой традиционным бумажным картам, «мониторинг целостности» в режиме реального времени как форма сравнения избыточных навигационных данных приобретает значение важной процедуры для обеспечения безопасности судовождения.

Выводы (Summary)

Проведенное исследование применения позволяет сделать следующие выводы:

1. Выявлены преимущества и недостатки использования различных автономных вариантов корреляционно-экстремальной навигации в результате выполненного обзорного анализа существующей проблематики альтернативного позиционирования. Предполагается навигационное использование КЭНС в качестве альтернативы глобальным спутниковым системам.
2. Гибридный *B*-сплайновой алгоритм адаптирован под моделирование картографического эталона информативности навигационного поля с высокими показателями точности аппроксимации при модернизации хаотичной расстановки сеточных узлов.
3. Применение критерия целостности гарантирует практическое улучшение итерационного процесса расчета обсервованных координат для высокоточного альтернативного позиционирования в режиме реального времени.

4. Примененная процедура оптимизации распределения сеточных точек по принципу поиска эффективной позиции скользящего узла позволяет увеличить быстродействие расчетов в 2 раза, что, безусловно, является важным в навигационных приложениях для своевременного принятия решения.

5. Программное обеспечение для бортового компьютера модифицировано для синтеза аномальных фрагментов геофизического поля в качестве универсальной практической реализации КЭНС. Алгоритм оптимизации расстановки узлов реализован в виде отдельной подпрограммы, синхронизированной с общим пакетом прикладных программ.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Berdyshev V. I.* Navigation of moving objects by geophysical fields / V. I. Berdyshev, V. B. Kostousov // *Journal of Mathematical Sciences*. — 2007. — Vol. 140. — Is. 6. — Pp. 767–795. DOI: 10.1007/s10958-007-0017-5.
2. *Stepanov O. A.* Map-Aided Navigation Taking into Account a Priori Information on the Object Trajectory / O. A. Stepanov, V. A. Vasilev, Yu. A. Litvinenko, A. M. Isaev // 2023 30th Saint Petersburg International Conference on Integrated Navigation Systems (ICINS). — IEEE, 2023. — Pp. 125–130. DOI: 10.23919/ICINS51816.2023.10168423.
3. *Ююкин И. В.* Корреляционно-экстремальная навигация по геофизическим полям на основе использования сплайновой технологии / И. В. Ююкин // *Вестник государственного университета морского и речного флота им. адмирала С. О. Макарова*. — 2021. — Т. 13. — № 4. — С. 505–517. DOI: 10.21821/2309-5180-2021-13-4-505-517. — EDN RHDIUL.
4. *Конешов В. Н.* Условия определения координат движущегося объекта на геофизическом ориентире / В. Н. Конешов, П. С. Михайлов, В. В. Дорожков // *Геофизические исследования*. — 2023. — Т. 24. — № 4. — С. 43–57. DOI: 10.21455/gr2023.4-3. — EDN MZALKH.
5. *Yuyukin I. V.* Correlation-extreme method based on spline functions as an alternative to satellite navigation / I. V. Yuyukin // *AIP Conference Proceedings: International Scientific Conference*. — International Transport Scientific Innovation (ITSI 2021). — AIP Publishing, 2023. — Vol. 2476. — Is. 1. — Pp. 030030. DOI: 10.1063/5.0102916.
6. *Ююкин И. В.* Сплайновое синтезирование картографированного эталона информативности поля в задаче корреляционно-экстремальной навигации / И. В. Ююкин // *Вестник государственного университета морского и речного флота им. адмирала С. О. Макарова*. — 2022. — Т. 14. — № 1. — С. 25–39. DOI: 10.21821/2309-5180-2022-14-1-25-39. — EDN FNMZIL.
7. *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.
8. *Liu W.* Path Planning Methods in an Environment with Obstacles (A Review) / W. Liu // *Mathematics and Mathematical Modeling*. — 2018. — Vol. 1. — Pp. 15–58. DOI: 10.24108/mathm.0118.0000098.
9. *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 им. адмирала С. О. Макарова*. — 2024. — Т. 16. — № 3. — С. 421–443. DOI: 10.21821/2309-5180-2024-16-3-421-443. — EDN VCRDTK.
10. *Psiaki M.* Attackers can spoof navigation signals without our knowledge. Here's how to fight back GPS lies / M. Psiaki, T. Humphreys, B. Stauffer // *IEEE Spectrum*. — 2016. — Vol. 53. — Is. 8. — Pp. 26–53. DOI: 10.1109/MSPEC.2016.7524168.
11. *Falco G.* The Vacuum of Space Cybersecurity / G. Falco // 2018 AIAA SPACE and Astronautics Forum and Exposition. — American Institute of Aeronautics and Astronautics, Inc., 2018. — Pp. 5275–5279. DOI: 10.2514/6.2018-5275.
12. *Falco G.* Cybersecurity Principles for Space Systems / G. Falco // *Journal of Aerospace Information Systems*. — 2019. — Vol. 16. — Is. 2. — Pp. 61–70. DOI: 10.2514/1.I010693.
13. *Liu Y.* Impact Assessment of GNSS Spoofing Attacks on INS/GNSS Integrated Navigation System / Y. Liu, S. Li, Q. Fu, Z. Liu // *Sensors*. — 2018. — Vol. 18. — Is. 5. — Pp. 1433. DOI: 10.3390/s18051433.
14. *Berdyshev V. I.* Methods for Tracking an Object Moving in R^3 under Conditions of Its Counteraction / V. I. Berdyshev // *Doklady Mathematics*. — 2024. — Vol. 109. — Is. 3. — Pp. 291–294. DOI: 10.1134/S1064562424702168.

15. *Berdyshev V. I.* A Trajectory Minimizing the Exposure of a Moving Object / V. I. Berdyshev, V. B. Kostousov // Proceedings of the Steklov Institute of Mathematics. — 2021. — Vol. 313. — Is. S1. — Pp. S21–S32. DOI: 10.1134/S0081543821030044.
16. *Lavrenov R.* Modified Spline-Based Navigation: Guaranteed Safety for Obstacle Avoidance / R. Lavrenov, F. Matsuno, E. Magid // International Conference on Interactive Collaborative Robotics. — Springer, Cham, 2017. — Vol. 10459. — Pp. 123–133. DOI: 10.1007/978-3-319-66471-2_14.
17. *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. Lecture Notes in Electrical Engineering. — Springer, Cham, 2020. — Vol. 495. — Pp. 475–496. DOI: 10.1007/978-3-030-11292-9_24.
18. *Джанджгава Г. И.* Навигация и наведение по пространственным геофизическим полям / Г. И. Джанджгава, Г. И. Герасимов, Л. И. Августов // Известия ЮФУ. Технические науки. — 2013. — № 3(140). — С. 74–84. — EDN PYMMVZ.
19. *Фатеев В. Ф.* Макет системы по геофизическим полям земли / В. Ф. Фатеев, Д. С. Бобров, Ю. В. Гостев [и др.] // Альманах современной метрологии. — 2020. — № 4(24). — С. 173–184. — EDN KZPLNH.
20. *Stepanov O. A.* The Effect of Measurement Preprocessing in the Gravity-Aided Navigation / O. A. Stepanov, A. S. Nosov // 5th Symposium on Terrestrial Gravimetry: Static and Mobile Measurements (TG-SMM 2019). — International Association of Geodesy Symposia. — Springer International Publishing, 2021. — Vol. 153. — Pp. 141–145. DOI: 10.1007/1345_2021_131.
21. *Ююкин И. В.* Перспективная магнитная навигация с использованием метода сплайн-функций для оптимального формирования эталона картографирования / И. В. Ююкин // Вестник государственного университета морского и речного флота им. адмирала С. О. Макарова. — 2022. — Т. 14. — № 4. — С. 519–534. DOI: 10.21821/2309-5180-2022-14-4-519-534. — EDN KGJJVG.
22. *Торопов А. Б.* Алгоритмы фильтрации в задачах коррекции показаний морской навигационной системы с использованием нелинейных измерений: автореф. дис. ... канд. техн. наук / А. Б. Торопов. — СПб., 2013. — 20 с.
23. *Xi M.* Matching area selection for arctic gravity matching navigation based on adaptive all-field extended extremum algorithm / M. Xi, L. Wu, Q. Li, G. Mao, P. Wu, B. Ji, L. Bao, Y. Wang // IET Radar, Sonar & Navigation. — 2024. — Vol. 18. — Is. 8. — Pp. 1307–1317. DOI: 10.1049/rsn2.12571.
24. *Ююкин И. В.* Проблема реализации концепции максимального интегрирования разнородных данных в практической навигации / И. В. Ююкин // Вестник государственного университета морского и речного флота им. адмирала С. О. Макарова. — 2023. — Т. 15. — № 6. — С. 998–1014. DOI: 10.21821/2309-5180-2023-15-6-998-1014. — EDN JRCDLU.
25. *Safin R.* Modern Methods of Map Construction Using Optical Sensors Fusion / R. Safin, T. Tsoy, R. Lavrenov, I. Afanasyev, E. Magid // International Conference on Artificial Life and Robotics (ICAROB 2023). — ALife Robotics Corporation Ltd., 2023. — Vol. 28. — Pp. 166–169. DOI: 10.5954/ICAROB.2023.OS6-6.
26. *Morales J. J.* Information fusion strategies for collaborative inertial radio SLAM / J. J. Morales, J. J. Khalife, Z. M. Kassas // IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems. — 2022. — Vol. 23. — Is. 8. — Pp. 12935–12952. DOI: 10.1109/TITS.2021.3118678.
27. *Dai Y.* An Adaptive and Robust Strategy for GPS/IMU/VO Integrated Navigation / Y. Dai, R. Sun // China Satellite Navigation Conference (CSNC 2024) Proceedings. — Lecture Notes in Electrical Engineering. Springer Nature Singapore, 2024. — Vol. 1094. — Pp. 555–565. DOI: 10.1007/978-981-99-6944-9_48.
28. *Yan X.* Cooperative navigation in unmanned surface vehicles with observability and trilateral positioning method / X. Yan, X. Yang, M. Lou, H. Ye, Z. Xiang // Ocean Engineering. — 2024. — Vol. 306. — Pp. 118078. DOI: 10.1016/j.oceaneng.2024.118078.
29. *Fateev V.* Problems of creating autonomous navigation systems on geophysical fields / V. Fateev, D. Bobrov, M. Muzabekov, R. Davlatov // E3S Web of Conferences. — EDP Sciences, 2021. — Vol. 310. — Pp. 03008. DOI: 10.1051/e3sconf/202131003008.
30. *Peshekhonov V. G.* High-Precision Navigation Independently of Global Navigation Satellite Systems Data / V. G. Peshekhonov // Gyroscopy and Navigation. — 2022. — Vol. 13. — Is. 1. — Pp. 1–6. DOI: 10.1134/S2075108722010059.
31. *Куришин В. В.* Методика определения целостности высокоточных навигационных определений / В. В. Куришин, А. В. Молоканов // Ракетно-космическое приборостроение и информационные системы. — 2017. — Т. 4. — № 2. — С. 3–10. DOI: 10.17238/issn2409-0239.2017.2.3. — EDN ZIBDCF.

32. Ююкин И. В. Генерализация изображения подводного рельефа методом сплайновой аппроксимации на векторной электронной карте / И. В. Ююкин // Вестник государственного университета морского и речного флота им. адмирала С. О. Макарова. — 2024. — Т. 16. — № 6. — С. 910–934. DOI: 10.21821/2309-5180-2024-16-6-910-934. — EDN QQIVCX.

33. Stepanov O. Recursive Estimation Algorithms for AUV Collaborative Navigation in Case of Abnormal Outliers in Measurements / O. Stepanov, Y. Litvinenko, A. Isaev // International Conference on Interactive Collaborative Robotics. — Springer Nature Switzerland, 2024. — Pp. 88–100. DOI: 10.1007/978-3-031-71360-6_7.

34. Ivanov A. V. Autonomous navigation data integrity monitoring of satellite radio navigation systems based on residual method / A. V. Ivanov, D. V. Boykov, O. V. Trapeznikova, A. P. Pudovkin, E. V. Trapeznikov // Journal of Physics: Conference Series. — IOP Publishing, 2020. — Vol. 1546. — № 1. — Pp. 012016. DOI: 10.1088/1742-6596/1546/1/012016.

REFERENCES

1. Berdyshev, V. I. and V. B. Kostousov. “Navigation of moving objects by geophysical fields.” *Journal of Mathematical Sciences* 140.6 (2007): 767–795. DOI: 10.1007/s10958-007-0017-5.

2. Stepanov O. A., V. A. Vasilev, Yu. A. Litvinenko, and A. M. Isaev. “Map-Aided Navigation Taking into Account a Priori Information on the Object Trajectory.” *2023 30st Saint Petersburg International Conference on Integrated Navigation Systems (ICINS)*. — IEEE, 2023. DOI: 10.23919/ICINS51816.2023.10168423.

3. Yuyukin, I. V. “Correlation-extreme navigation through geophysical fields based on the use of spline technology.” *Vestnik Gosudarstvennogo universiteta morskogo i rechnogo flota imeni admirala S. O. Makarova* 13.4 (2021): 266–274. DOI: 10.21821/2309-5180-2021-13-4-505-517.

4. Koneshov, V. N., P. S. Mikhailov, and V. V. Dorozhkov. “Conditions for determining the coordinates of a moving object on a geophysical landmark.” *Geophysical research* 24.4 (2023): 43–57. DOI: 10.21455/gr2023.4-3.

5. Yuyukin, I. V. “Correlation-extreme method based on spline functions as an alternative to satellite navigation.” *AIP Conference Proceedings* 2476.1 (2023): 030030. DOI: 10.1063/5.0102916.

6. 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.

7. 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.

8. Liu, Wei. “Path Planning Methods in an Environment with Obstacles (A Review).” *Mathematics and Mathematical Modeling* 1 (2018): 15–58. DOI: 10.24108/mathm.0118.0000098.

9. 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.

10. Psiaki, Mark L., Todd E. Humphreys, and Brian Stauffer. “Attackers can spoof navigation signals without our knowledge. Here’s how to fight back GPS lies.” *IEEE Spectrum* 53.8 (2016): 26–53. DOI: 10.1109/MSPEC.2016.7524168.

11. Falco, Gregory. “The Vacuum of Space Cybersecurity.” *2018 AIAA SPACE and Astronautics Forum and Exposition*. American Institute of Aeronautics and Astronautics, Inc., 2018. 5275–5279. DOI: 10.2514/6.2018-5275.

12. Falco, Gregory. “Cybersecurity Principles for Space Systems.” *Journal of Aerospace Information Systems* 16.2 (2019): 61–70. DOI: 10.2514/1.1010693.

13. Liu, Yang, Sihai Li, Qiangwen Fu, and Zhenbo Liu. “Impact Assessment of GNSS Spoofing Attacks on INS/GNSS Integrated Navigation System.” *Sensors* 18.5 (2018): 1433. DOI: 10.3390/s18051433.

14. Berdyshev, Vitaliy I. “Methods for Tracking an Object Moving in R^3 under Conditions of Its Counteraction.” *Doklady Mathematics* 109.3 (2024): 291–294. DOI: 10.1134/S1064562424702168.

15. Berdyshev, Vitaliy I., and Victor B. Kostousov. “A Trajectory Minimizing the Exposure of a Moving Object.” *Proceedings of the Steklov Institute of Mathematics* 313.S1 (2021): S21–S32. DOI: 10.1134/S0081543821030044.

16. Lavrenov, R. and F. M., E. Matsuno. “Modified Spline-Based Navigation: Guaranteed Safety for Obstacle Avoidance.” *Interactive Collaborative Robotics* Springer International Publishing, 2017: 123–133. DOI: 10.1007/978-3-319-66471-2_14.

17. Magid, E. and R. S., M. K., A. Lavrenov. "Combining Voronoi Graph and Spline-Based Approaches for a Mobile Robot Path Planning." *Informatics in Control, Automation and Robotics* Springer International Publishing, 2020: 475–496. DOI: 10.1007/978-3-030-11292-9_24.
18. Dzhandzhgava, G. I., G. I. Gerasimov and L. I. Avgustov. "Navigation and homing by spatial geophysical fields." *Izvestiya Sfedu. Engineering Sciences* 3(140) (2013): 74–84.
19. Fateev, V.F., D. S. Bobrov, Yu. V. Gostev, E. A. Rybakov, M. N. Karapetyan, R. A. Davlatov, A. O. Dolgodush, and Yu. V. Moskvitin. "Layout of the system on geophysical potential of the earth." *Al'manac of Modern Metrology* 4 (2020): 173–184.
20. Stepanov, Oleg Andreevich, and Aleksei Sergeevich Nosov. "The Effect of Measurement Preprocessing in the Gravity-Aided Navigation." *5th Symposium on Terrestrial Gravimetry: Static and Mobile Measurements (TG-SMM 2019)*. — *International Association of Geodesy Symposia*. — Springer International Publishing, 2021. DOI: 10.1007/1345_2021_131.
21. Yuyukin, Igor V. "Perspective magnetic navigation with using the method of spline functions for optimal formation of the map-aided standard." *Vestnik Gosudarstvennogo universiteta morskogo i rechnogo flota imeni admirala S. O. Makarova* 14.4 (2022): 519–534. DOI: 10.21821/2309-5180-2022-14-4-519-534.
22. Toropov, Anton B. *Algoritmy filtratsii v zadashah korrektsii pokazaniy morskoy navigatsionnoy sistemy s ispol'zovaniem nelineynykh izmereniy*. Abstract of PhD diss. SPb., 2013.
23. Xi, Menghan, Lin Wu, Qianqian Li, Guocheng Mao, Pengfei Wu, Bing Ji, Lifeng Bao, and Yong Wang. "Matching area selection for arctic gravity matching navigation based on adaptive all-field extended extremum algorithm." *IET Radar, Sonar & Navigation* 18.8 (2024): 1307–1317. DOI: 10.1049/rsn2.12571.
24. Yuyukin, Igor V. "The problem of implementing the concept of maximum integration of heterogeneous data in practical navigation." *Vestnik Gosudarstvennogo universiteta morskogo i rechnogo flota imeni admirala S. O. Makarova* 15.6 (2023): 998–1014. DOI: 10.21821/2309-5180-2023-15-6-998-1014.
25. Safin, Ramil, Tatyana Tsoy, Roman Lavrenov, Ilya Afanasyev, and Evgeni Magid. "Modern Methods of Map Construction Using Optical Sensors Fusion." *International Conference on Artificial Life and Robotics (ICAROB 2023)*. — ALife Robotics Corporation Ltd., 2023. DOI: 10.5954/ICAROB.2023.OS6–6.
26. Morales, Joshua J., Joe J. Khalife, and Zaher M. Kassas. "Information fusion strategies for collaborative inertial radio SLAM." *IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems* 23.8 (2022): 12935–12952. DOI: 10.1109/TITS.2021.3118678.
27. Dai, Yeying, and Rui Sun. "An Adaptive and Robust Strategy for GPS/IMU/VO Integrated Navigation." *China Satellite Navigation Conference (CSNC 2024) Proceedings*. — *Lecture Notes in Electrical Engineering*. Springer Nature Singapore, 2024. DOI: 10.1007/978-981-99-6944-9_48.
28. Yan, Xin, Xiaofei Yang, Mengmeng Lou, Hui Ye, Zhengrong Xiang. "Cooperative navigation in unmanned surface vehicles with observability and trilateral positioning method." *Ocean Engineering* 306 (2024): 118078. DOI: 10.1016/j.oceaneng.2024.118078.
29. Fateev, Vyacheslav, Dmitrii Bobrov, Murat Murzabekov, and Ruslan Davlatov. "Problems of creating autonomous navigation systems on geophysical fields." *E3S Web of Conferences*. Vol. 310. EDP Sciences, 2021. DOI: 10.1051/e3sconf/202131003008.
30. Peshekhonov, V.G. "High-Precision Navigation Independently of Global Navigation Satellite Systems Data." *Gyroskopy and Navigation* 13.1 (2022): 1–6. DOI: 10.1134/S2075108722010059.
31. Kurshin, Vladimir V., and Andrej V. Molokanov. "Method for assessment of integrity of high-precision navigational sightings." *Rocket-Space Device Engineering and Information Systems* 4.2 (2017): 3–10. DOI: 10.17238/issn2409-0239.2017.2.3.
32. Yuyukin, Igor V. "Generalization of the underwater relief image using the spline approximation method on a vector electronic chart." *Vestnik Gosudarstvennogo universiteta morskogo i rechnogo flota imeni admirala S. O. Makarova* 16.6 (2024): 910–934. DOI: 10.21821/2309-5180-2024-16-6-910-934.
33. Stepanov, Oleg, Yulia Litvinenko, and Alexey Isaev. "Recursive Estimation Algorithms for AUV Collaborative Navigation in Case of Abnormal Outliers in Measurements." *International Conference on Interactive Collaborative Robotics*. — Springer Nature Switzerland, 2024. DOI: 10.1007/978-3-031-71360-6_7.
34. Ivanov, A.V., D. V. Boykov, O. V. Trapeznikova, A. P. Pudovkin, and E. V. Trapeznikov. "Autonomous navigation data integrity monitoring of satellite radio navigation systems based on residual method." *Journal of Physics: Conference Series*. Vol. 1546. No. 1. IOP Publishing, 2020. DOI: 10.1088/1742-6596/1546/1/012016.

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 25 февраля 2025 г.

Received: Feb 25, 2025.

СУДОВЫЕ ЭНЕРГЕТИЧЕСКИЕ УСТАНОВКИ И ИХ ЭЛЕМЕНТЫ (ГЛАВНЫЕ И ВСПОМОГАТЕЛЬНЫЕ)

DOI: 10.21821/2309-5180-2025-17-2-254-270

EDN QXQRIQ

POSSIBILITY OF APPLYING SLIDING STEAM PRESSURE TECHNOLOGY IN MANEUVERING NUCLEAR POWER PLANTS TO REDUCE NUCLEAR FUEL OVERCONSUMPTION ON ATOMIC ICEBREAKERS

V. I. Korolev, A. I. Lebedev

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

This work proposes a possible method to reduce nuclear fuel overconsumption during maneuvering by utilizing sliding steam pressure technology. It is noted that since the beginning of atomic icebreaker operations in the Arctic, there has been significant overconsumption of nuclear fuel during maneuvering of nuclear power plants, and finding solutions to reduce this is a pressing goal. A proposal is made for a temporary transition to sliding steam pressure in the main steam pipeline at the initiative of the navigator, who maneuvers the icebreaker and can control the power of the electric propulsion system. Currently, the navigator cannot independently increase the reactor power even if required for safe navigation. It is noted that all atomic icebreaker projects have limitations on the power of the electric propulsion system set by the central control post operator of the nuclear steam-generating system, and the navigator cannot independently increase reactor power for emergency maneuvers. Attention is drawn to the fact that if the navigator still sets the power of the electric propulsion system above the specified power limit, the load from the main turbogenerators is automatically removed and the previous power limit is restored. A modification is proposed where the navigator, without requesting a new increase in reactor power from the central control post, can independently increase reactor power during emergency maneuvers. This allows significantly reducing the limitation on the power of the electric propulsion system and the corresponding reactor power when performing work in the Arctic on a specific route section without compromising navigation safety. It is noted that this solution provides nuclear fuel savings and extends the active zone campaign. Evaluations performed in the research show significant nuclear fuel savings when using sliding steam pressure technology to overcome short-term unlikely obstacles arising in complex ice conditions in the Arctic.

Key words: atomic icebreakers, ice conditions, unlikely obstacles, high maneuverability, nuclear fuel overconsumption, reactor installation, separate control system, power limitation, operational reserve, load removal.

For citation:

Korolev, Vladimir I. and A. I. Lebedev "Possibility of applying sliding steam pressure technology in maneuvering nuclear power plants to reduce nuclear fuel overconsumption on atomic icebreakers." *Vestnik Gosudarstvennogo universiteta morskogo i rechnogo flota imeni admirala S. O. Makarova* 17.2 (2025): 254–270. DOI: 10.21821/2309-5180-2025-17-2-254-270.

УДК 629.12–8:621.039

ВОЗМОЖНОСТЬ ПРИМЕНЕНИЯ ТЕХНОЛОГИИ СКОЛЬЗЯЩЕГО ДАВЛЕНИЯ ПАРА ПРИ МАНЕВРИРОВАНИИ ЯДЕРНОЙ ЭНЕРГЕТИЧЕСКОЙ УСТАНОВКОЙ ДЛЯ СНИЖЕНИЯ ПЕРЕРАСХОДА ЯДЕРНОГО ТОПЛИВА НА АТОМНЫХ ЛЕДОКОЛАХ

В. И. Королёв, А. И. Лебедев

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

В работе предлагается возможный вариант снижения перерасхода ядерного топлива на маневрирование за счет использования технологии скользящего давления пара. Отмечается, что с начала эксплуатации атомных ледоколов в Арктике существует значительный перерасход ядерного топлива на маневрирование ядерной энергетической установкой и актуальной целью является поиск решений для его снижения. Предлагается (кратковременный переход на скользящее давление пара в главном паропроводе по инициативе судоводителя, который осуществляет маневрирование ледоколом, имея возможность управлять мощностью только гребной электрической установки. В настоящее время судоводитель самостоятельно не имеет возможности увеличивать мощность реактора даже если это требуется по условиям безопасного судовождения. Отмечается, что на всех проектах атомных ледоколов предусмотрено ограничение мощности гребной электрической установки, которое устанавливается из центрального поста управления оператором ядерной паропроизводящей установки, и судоводитель не может самостоятельно увеличить мощность реактора для экстренного маневра. Обращается внимание на то, что если судоводитель все же задает мощность гребной электрической установки больше заданного ограничения мощности, то нагрузка с главных турбогенераторов автоматически списывается и восстанавливается прежнее ограничение мощности. Предлагается модернизация, при которой судоводитель без запроса нового увеличения мощности реактора в центральный пост управления имеет возможность самостоятельно увеличить мощность реактора в период выполнения экстренного маневра. Это позволяет существенно снизить величину ограничения мощности гребной электрической установки и соответствующую мощность реакторов при выполнении работ в Арктике на конкретном участке пути без ущерба безопасности судовождения. Отмечается, что данное решение обеспечивает экономию ядерного топлива и увеличивает кампанию активной зоны. Выполненные в работе оценки показывают существенную экономию ядерного топлива при использовании технологии скользящего давления для преодоления кратковременных маловероятных препятствий, возникающих в сложных ледовых условиях Арктики.

Ключевые слова: атомные ледоколы, ледовая обстановка, маловероятные препятствия, высокая маневренность, перерасход ядерного топлива, реакторная установка, система раздельного управления, ограничение мощности, оперативный запас, списание нагрузки.

Для цитирования:

Королёв В. И. Возможность применения технологии скользящего давления пара при маневрировании ядерной энергетической установкой для снижения перерасхода ядерного топлива на атомных ледоколах / В. И. Королёв, А. И. Лебедев // Вестник Государственного университета морского и речного флота имени адмирала С. О. Макарова. — 2025. — Т. 17. — № 2. — С. 254–270. DOI: 10.21821/2309-5180-2025-17-2-254-270. — EDN QXQRIQ.

Введение (Introduction)

Условия работы атомных ледоколов во льдах Арктики при проводке крупнотоннажных судов требуют от них высокой маневренности [1]. Это в свою очередь обуславливает особенности эксплуатации ядерных энергетических установок (ЯЭУ) ледоколов при маневрировании [2]. При этом предпочтение отдается системе раздельного управления (СРУ), т. е. при установленной (заданной) мощности реакторной установки (РУ) многократно изменяется мощность гребных электродвигателей (ГЭД) в пределах заданной мощности РУ. Такой способ управления позволяет уменьшить количество маневров (изменений мощности) РУ за время навигации и является компромиссом между обеспечением надежности парогенераторов и активной зоны РУ и избыточным выгоранием ядерного топлива [3]. Актуальными являются поиски и использование новых перспективных атомных энергетических технологий в Арктике, позволяющих повысить эффективность использования ядерного топлива [4].

На рис. 1 приведена принципиальная схема управления ЯЭУ атомного ледокола. Задание мощности РУ осуществляет инженер-оператор из центрального поста управления (ЦПУ). При этом задатчик режимов (ЗР) на пульте управления ЯППУ (ПУ ЯППУ) устанавливается по запросу судоводителя в соответствующее положение (в процентах от номинальной мощности РУ) — $Q_{p,j}^{уст}$, и данная величина является ограничением мощности (ОМ) для гребной электрической установки (ГЭУ).

Ограничение мощности ГЭУ на j -м участке пути атомного ледокола можно представить в виде

$$N_{ГЭУj}^{ОМ} = Q_{p,j}^{уст} \bar{n}_{ЯЭУj}, \quad (1)$$

где $\bar{\eta}_{\text{ЯЭУ}j}$ — средний КПД ЯЭУ на j -м участке пути ледокола;
 $Q_{p,j}^{\text{уст}}$ — мощность реактора, установленная инженером-оператором на j -м участке.

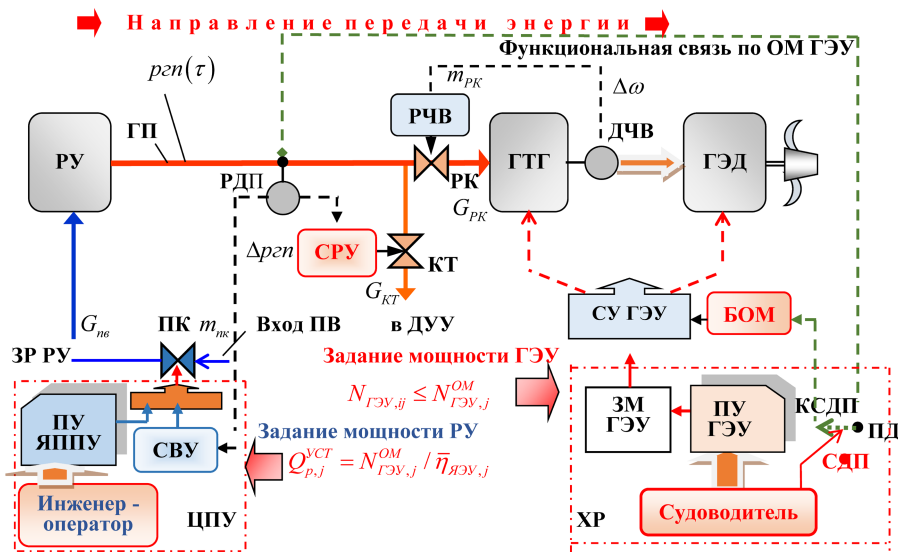


Рис. 1. Принципиальная схема управления ЯЭУ атомного ледокола:

ЦПУ — центральный пост управления; ПУ ЯППУ — пульт управления ядерной паропроизводящей установки; ЗР РУ — задатчик режимов реакторной установки; ХР — ходовая рубка;
 ПУ ГЭУ — пульт управления гребной электрической установки; ЗМ ГЭУ — задатчик мощности ГЭУ;
 СУ ГЭУ — система управления ГЭУ; БОМ — блок ограничения мощности;
 РУ — реакторная установка; ГТГ — главный турбогенератор; ГЭД — гребные электродвигатели;
 ПК — питательный клапан; РК — регулирующий клапан; КТ — клапан травления;
 ГП — главный паропровод; РДП — регулятор давления пара; РЧВ — регулятор частоты вращения;
 ДЧВ — датчик частоты вращения; КСДП — ключ переключения на СДП

В дальнейшем судоводитель, оперативно задавая текущую мощность ГЭУ на i -м интервале пути ледокола, должен ориентироваться на ОМ ГЭУ ($N_{\text{ГЭУ}i}^{\text{ОМ}}$). Заданная инженером-оператором мощность с ПУ ЯППУ фиксируется положением ЗР (поворотный трансформатор), далее аналоговый электрический сигнал проходит несколько устройств (ДУМ, ЭГБУ) и преобразуется в гидравлический сигнал, по которому перемещается шток питательного клапана (ПК). На новых проектах для перемещения ПК используются электромеханические приводы (ЭМП), которые получают сигнал от прибора управления расходом (ПУР), функционирующего на базе программируемых логических контроллеров (ПЛК), входящих в систему «Вьюга-220».

При таком режиме работы ЯЭУ на интервале времени $\Delta\tau_j = \sum_{i=1}^N \Delta\tau_{ij}$ создается оперативный запас мощности РУ на маневрирование ГЭУ без изменения установленной мощности РУ — $\Delta Q_{p,ij}^{\text{оп}}$. При этом мощность ГЭУ, заданная судоводителем на i -м интервале времени при прохождении j -го участка пути ($\Delta\tau_{ij}$), является статистически изменяемой величиной, зависящей от способа прокладки и ледовой обстановки $N_{\text{ГЭУ}ij}$.

Ориентируясь на внешнюю обстановку, находящийся в ходовой рубке (ХР) судоводитель задает мощность ГЭУ (на винтах) с пульта управления (ПУ ГЭУ), учитывая принятое ОМ ГЭУ. В результате воздействия судоводителя на задатчик мощности (ЗМ) ГЭУ в системе управления (СУ) ГЭУ формируются управляющие сигналы, которые изменяют напряжения в обмотках возбуждения синхронных генераторов и гребных электродвигателей. При этом изменяются токи в обмотках возбуждения гребных электродвигателей и генераторов. Частота вращения ротора ГЭД будет прямо пропорциональна напряжению на якоре ГЭД и обратно пропорциональна магнитному потоку ГЭД (см. Королев В. И. Основы управления судовыми реакторными установками при работе на мощности: учеб. пособие. — СПб.: Изд-во «Медицинская пресса», 2003. — 106 с.).

При работе ЯЭУ с использованием СРУ мощность ГЭУ, заданная судоводителем в соответствии с регламентом эксплуатации, должна быть меньше или равна ОМ ГЭУ: $N_{ГЭУij} \leq N_{ГЭУj}^{OM}$.

Энергетический баланс между РУ и ГЭУ при работе в режиме СРУ устанавливается следующим образом. Обычно мощность ГЭУ меньше ОМ ГЭУ, образуется «избыточный пар», генерируемый РУ, что приводит к росту давления в главном паропроводе (ГП). Для снижения давления в ГП автоматически открывается клапан травления (КТ), и «избыточный пар» стравливается в главный конденсатор через дроссельно-увлажнительное устройство (ДУУ). Одновременно устанавливается баланс между мощностью ГЭД и главным турбогенератором (ГТГ) в соответствии со статической характеристикой регулятора частоты вращения (РЧВ). Сигнал по частоте вращения на РЧВ подается от датчика частоты вращения (ДЧВ), связанного с ротором ГТГ. В свою очередь от РЧВ подается сигнал на автоматическое перемещение штока РК. Таким образом обеспечивается энергетический баланс между ГТГ и ГЭД.

Для устойчивой работы и уверенного контроля за энергетическими балансами устанавливаются допустимые пределы изменения параметров функционирования РУ. Для контроля ЯЭУ при передаче энергии от РУ к ГЭУ и *возникающих при этом энергетических разбалансов наиболее транспарентным сигналом является давление пара в ГП*. Поэтому возникающие изменения давления пара в ГП в динамике и статике строго лимитированы. Для этого на ГП устанавливается регулятор давления пара (РДП), который поддерживает давление в паропроводе в пределах статической неравномерности характеристики регулятора. При установленном положении ПК генерируемый РУ пар, наполняющий ГП, распределяется между открытыми РК и КТ. Поддержание давления в ГП осуществляется путем перераспределения пара в ГП между главным турбоагрегатом (ГТА) и травлением избыточного пара в главный конденсатор (ГК). При этом падение давления в паропроводе увеличивается при дополнительном открытии РК (увеличении мощности ГТА) и соответствующем прикрытии КТ. Минимальное давление в ГП устанавливается при полном закрытии КТ. Это означает, что весь пар, сгенерированный в РУ при установленном положении ПК, поступил в турбину. В дальнейшем давление пара в ГП не поддерживается. При этом не учитывается почти постоянный поток пара, поступающий на вспомогательные потребители первого и второго рода пароконденсатного цикла (В. И. Королев, И. И. Костылев, А. Ю. Ластовцев. Особенности формирования и теплового расчета пароконденсатного цикла судов и плавучих энергоблоков с ядерной энергетической установкой: учеб. пособие. — СПб.: Бэлл, 2006. — 207 с.).

Для рассмотренной архитектуры управления ЯЭУ атомного ледокола возникает возможность минимизировать количество маневров РУ, но при этом увеличивается выгорание топлива, затраченного на единицу пройденного ледоколом пути. В истории эксплуатации атомных ледоколов известны неоднократные попытки статистического снижения «избыточной мощности» РУ на отдельных участках пути, однако в результате всегда торжествовала концепция, заданная судоводителями — *важнее безопасность мореплавания*, заключающаяся в достаточном резерве мощности РУ на преодоление непредвиденных (маловероятных) препятствий или маневров при проводке судов. Не опровергая этот постулат, предлагается искать возможность снижения оперативного запаса мощности РУ на маневрирование ГЭУ в особенностях управления ЯЭУ ледокола.

Для управления судовыми ЯЭУ также предусмотрена система взаимосвязанного управления (СВУ) — см. рис. 1. Логика работы СВУ сводится к тому, что каждый запрос по мощности ГЭУ со стороны судоводителя автоматически изменяет мощность РУ (автоматическое перемещение ПК) без травления пара через КТ (в статике). Такая технология управления не требует создание оперативного запаса мощности по РУ и не приводит к пережиганию ЯТ при маневрировании. Однако за каждым изменением судоводителем мощности ГЭУ следует изменение мощности РУ. Это создает проблему обеспечения надежности РУ и, следовательно, повышенной ядерной опасности.

На атомных ледоколах СВУ применяется крайне редко, в основном для преодоления участков с прогнозируемой структурой или свободных от льда. Такой способ управления может также применяться для исключения или минимизации травления пара в главные конденсаторы, например, ввиду *снижения шумовых эффектов от работающей ЯЭУ*.

С начала эксплуатации атомных ледоколов существуют противоречивые взгляды на выбор мощности реактора при маневрировании ЯЭУ ледокола. Служба судовождения заинтересована в выборе завышенной «избыточной» мощности реактора и соответствующего запаса на маневрирование исходя из условия безопасности судовождения и при этом отсутствия возможности самостоятельно влиять на мощность реактора. Атомно-механическая служба заинтересована в меньшем значении мощности реактора исходя из условия снижения перерасхода ядерного топлива на выполнение проводки. Таким образом, целью статьи является выработка оптимального подхода и рекомендаций при оценке текущей мощности реактора на данном участке пути для обеспечения безопасного маневрирования в изменяющихся условиях Арктики. Для решения этой задачи предлагается на коротких интервалах пути предоставить судоводителю возможность увеличивать мощность реактора за счет снижения давления ниже минимально поддерживаемого значения, т. е. перехода на технологию скользящего давления пара.

Методы и материалы (Methods and Materials)

Как отмечалось ранее, судоводитель при управлении ГЭУ ориентируется на ОМ ГЭУ, в случае превышения которого вступает в действие функциональная связь между давлением в ГП и СУ ГЭУ через блок ограничения мощности (БОМ) — см. рис. 1. Завышенная нагрузка $N_{ГЭУij} > N_{ГЭУj}^{OM}$ (заданная судоводителем текущая мощность ГЭУ превышает ОМ ГЭУ) приводит к провалу давления в ГП (ниже минимально поддерживаемого), в работу вступает БОМ, списывающий нагрузку с ГТГ до уровня ограничения мощности. При этом в течение некоторого времени давление в ГП будет ниже минимально поддерживаемого при закрытом КТ. Фактически такая ситуация приводит к снижению давления в ГП тем большому, чем больше заданная судоводителем мощность превышает ОМ ГЭУ. В практике эксплуатации работа паротурбинного оборудования при пониженном давлении в паропроводе называется *скользящим давлением пара* (СДП), при котором давление пара в паропроводе снижается меньше минимально поддерживаемого значения [5].

При управлении судовыми ЯЭУ для перехода на технологию СДП необходимо временно отключить функциональную связь между датчиком давления пара в ГП и БОМ, т. е. переключить связь с ПД на СДП (см. рис. 1) [7]. В этом случае энергетическая цепочка выглядит следующим образом. Увеличение запроса по мощности ГЭУ (на нагрузку) приводит к снижению частоты вращения ГТГ и автоматическому дополнительному открытию РК. Система автоматического управления ЯЭУ перестраивается на новую мощность ГТА (повышенную мощность ГЭД). Одновременно мощность РУ растет выше заданной инженером-оператором (по положению ПК) без запроса судоводителем нового ОМ ГЭУ (ПК не перемещался инженером-оператором). Таким образом, автоматически реализуется обратная связь между нагрузкой (суммарной мощностью ГЭД) и мощностью РУ (отрицательный температурный эффект реактивности реактора).

Данная технология управления судовой ЯЭУ может быть использована для уменьшения задаваемой «избыточной мощности» РУ — $\Delta Q_{p,ij}^{op}$ при маневрировании ГЭД (ГЭУ), при этом условия для безопасного мореплавания сохраняются. Такое управление целесообразно применять на коротких интервалах пути: при прохождении кратковременных маловероятных препятствий или во избежание столкновений при проводке судов. Именно на такие ситуации судоводителем закладывается заведомо завышенный оперативный запас мощности по РУ, который в конечном итоге приводит к увеличенному выгоранию ЯТ [8].

Величина $\Delta Q_p^{op}(\Delta \tau_j)$ в процессе эксплуатации атомных ледоколов во льдах может изменяться в широких пределах и в настоящее время определяется, как правило, интуитивно судоводителем из условия обеспечения безопасности мореплавания [2], [5]. При этом судоводитель обычно ориентируется на ОМ ГЭУ — $N_{ГЭУj}^{OM}$, введенное на j -м участке пути (на интервале времени $\Delta \tau_j$), при котором оперативный запас мощности РУ по отношению к установленной инженером-оператором больше нуля ($\Delta Q_{p,j}^{op} > 0$). В данном случае давление в ГП находится в допустимом диапазоне $p_{ГП}^{min} < p_{ГП}(\Delta \tau_j) < p_{ГП}^{max}$, а КТ — в заданных пределах перемещения. При исчерпании опера-

тивного запаса мощности на маневрирование давление в ГП снижается до минимально поддерживаемого значения $p_{ГП}(\Delta\tau_j) = p_{ГП}^{\min}$ и КТ полностью закрывается.

В случае превышения текущей мощности ГЭУ — ОМ ГЭУ ($N_{ГЭУj} > N_{ГЭУj}^{\text{ОМ}}$) при неизменном положении ПК происходит падение давления в ГП за счет увеличения гидравлического сопротивления питающей сети из-за увеличения расхода питательной воды через питательный клапан т. е. $p_{ГП}(\Delta\tau_j) < p_{ГП}^{\min}$ при прежнем положении ПК, реализуется технология СДП в ГП. Таким образом, у судоводителя появляется возможность не запрашивать в ЦПУ новое увеличенное значение ОМ ГЭУ (с перестановкой ПК), а самостоятельно кратковременно увеличивать мощность ГЭУ сверх установленного ОМ ГЭУ для реализации требуемого маневра. При этом ключ для перехода на технологию СДП (КСДП) должен находиться в зоне управления судоводителя. Если возникшее препятствие носит систематический характер, то судоводитель по штатной схеме заказывает новое ОМ ГЭУ (увеличенное) для дальнейшего движения во льдах.

На рис. 2 представлена графоаналитическая модель выбора ограничений мощности ГЭУ при эксплуатации атомного ледокола в Арктике на j -м участке пути. Судоводитель, ориентируясь либо на свой опыт (интуицию) либо на известную статистическую базу, учитывающую ледовую обстановку, условия проводки и рекомендации, выработанные для этих условий, заказывает в ЦПУ величину ОМ ГЭУ ($N_{ГЭУj}^{\text{ОМ}}$).

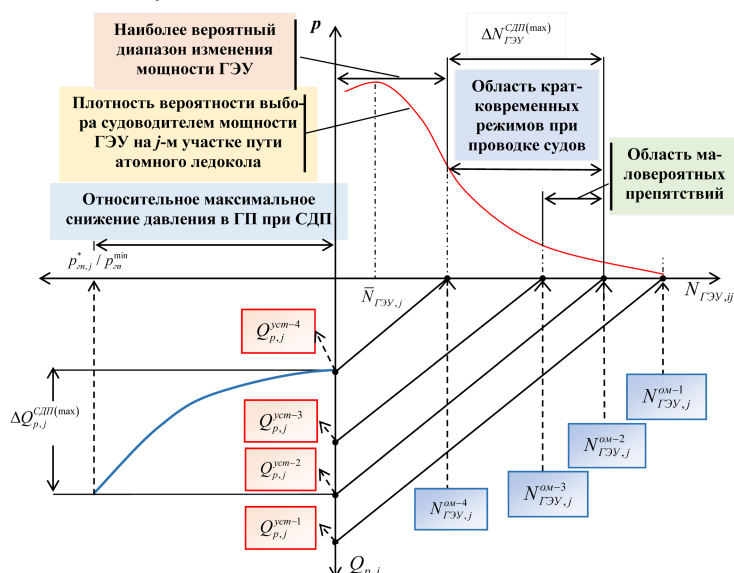


Рис. 2. Графоаналитическая модель выбора ограничений мощности ГЭУ при эксплуатации атомного ледокола в Арктике на j -м участке пути:

$\Delta Q_{p,j}^{\text{СДП}(\max)}$ — максимальное увеличение мощности реактора при применении технологии СДП;
 $\Delta N_{ГЭУj}^{\text{СДП}(\max)}$ — максимальное увеличение мощности ГЭУ при применении технологии СДП (маневре судоводителя за пределом ограничения мощности); $p_{ГП}^* / p_{ГП}^{\min}$ — относительное падение давления пара в главном паропроводе при применении технологии СДП

В совокупности режимов работы ГЭУ на идентифицированном j -м отрезке пути рассматривается текущая мощность ГЭУ — $N_{ГЭУj}$. Из данной совокупности выполняется выборка в соответствии со способом выполнения задачи (буксировка, лидирование, с околками, реверсы, свободное плавание в сплошных льдах). Полученные выборки необходимо дополнительно увязать с ледовой обстановкой (поля пакового льда, обломки полей, торосистость, разрушенность и т. д.) и тем самым получить реструктурированные выборки случайных чисел. Сгруппированные по рассмотренным признакам массивы чисел необходимо представить в виде эмпирических функций распределения случайной величины со своими математическими ожиданиями и дисперсией. В соответствии с теоремой Бернулли при больших выборках случайных чисел частота события приблизительно равна его вероятности. Реструктурированные выборки случайных чисел представляются в виде

гистограмм или эмпирических функций распределения. По гистограмме или эмпирической функции распределения можно представить плотность вероятностей случайной величины. Эмпирическое математическое ожидание мощности ГЭУ для реструктурированной выборки объемом n определяется следующим образом:

$$\bar{N}_{ГЭУj} = \frac{N_{ГЭУ 1j} + N_{ГЭУ 2j} + \dots + N_{ГЭУ nj}}{n} \quad (2)$$

Эмпирическое математическое ожидание дает среднее значение исследуемой величины, вокруг которой разбросаны значения рассматриваемой величины, а дисперсия (среднеквадратическое отклонение) характеризует степень разброса значений исследуемой величины около среднего значения для данной выборки:

$$\sigma^2 = \frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n (N_{ГЭУij} - \bar{N}_{ГЭУj})^2 \quad (3)$$

Распределение мощности ГЭУ в рассматриваемой совокупности может быть описано по нормальному закону Гаусса, для которого плотность вероятности записывается в виде выражения [6]:

$$p(N_{ГЭУ,ij}) = \frac{1}{\sigma\sqrt{2\pi}} e^{-\frac{(N_{ГЭУ,ij} - \bar{N}_{ГЭУ,ij})^2}{2\sigma^2}} \quad (4)$$

В табл. 1 приведены примерные статистические характеристики условий эксплуатации при маневрировании ГЭУ, которые были приведены в отчете Мурманского филиала ЦНИИМФ. Здесь среднеквадратическое отклонение (σ_N^2) характеризует разброс мощности ГЭУ из-за *неоднородности ледовых условий и способа проводки*. При проводке буксированием σ_N^2 растет по отношению к способу проводки *лидированием* для аналогичных мощностей. В *припайных льдах* $\sigma_N^2 = 0,136 \dots 0,185$ в *дрейфующих льдах* $\sigma_N^2 = 0,3 \dots 0,6$. При этом меньшим значениям соответствует проводка судна с меньшим арктическим дедвейтом.

Таблица 1

Примерные статистические характеристики условий эксплуатации при маневрировании ГЭУ а/л типа «Таймыр» (в относительных единицах)

Способ выполнения задачи	Состояние ледового покрова	Математическое ожидание относительной мощности ГЭУ $\hat{N}_{ГЭУ}$	Среднеквадратическое относительное отклонение σ_N^2
1. Буксирование	В припайных льдах	0,65	0,136...0,185
	В дрейфующих льдах	0,55	0,3...0,6
2. Буксирование на коротком буксире	В припайных льдах	0,65	0,12...0,13
	В дрейфующих льдах	0,55	0,15...0,2
3. Работа реверсами (набегами и ударами)	—	0,5	0,22...0,25
4. Проводка лидированием	В припайных льдах	0,6	0,12...0,13
	В дрейфующих льдах	0,55	0,15...0,2

При буксировке на коротком буксире необходимо маневрирование мощностью, обусловленное изменяющейся ледовой обстановкой. Буксировка в припайных льдах требует большой мощности ГТА (ГЭУ) при относительно незначительных отклонениях мощности. В припайных льдах математическое ожидание мощности ГЭУ составляет $\hat{N}_{ГЭУ} = 0,65$ и среднеквадратическое отклонение $\sigma_N^2 = 0,12 \dots 0,13$. Действия судоводителя носят упреждающий характер. Частота изменения

мощности ГЭУ определяется сменой ледовой обстановки. В дрейфующих льдах наблюдается чередование лед – вода, сжатие, разряжение, математическое ожидание мощности $\hat{N}_{ГЭУ} = 0,55$ при среднеквадратическом отклонении $\sigma_N^2 = 0,15 \dots 0,2$.

При работе ледокола *набегами и ударами* (частые реверсы ГЭУ) математическое ожидание мощности $\hat{N}_{ГЭУ} = 0,5$ при среднеквадратическом отклонении $\sigma_N^2 = 0,22 \dots 0,25$. При этом реализуется большое количество циклов изменения мощности ГТА от номинальной мощности до мощности холостого хода (по ТУ на поставку турбоагрегатов предусмотрена возможность 30 режимов реверсирования в час).

На основе анализа длительного опыта работы на атомных ледоколах начальником службы КИП а/л «Таймыр» канд. техн. наук А. А. Адриановым были предложены коэффициенты превышения мощности РУ над необходимой текущей относительной мощностью ГЭУ — k_{ij} в зависимости от условий работы ледокола, значения которых сведены в табл. 2 [7]. Таким образом, установленная ЗР (ПК) относительная мощность РУ определяется из выражения

$$\bar{Q}_{p,j}^{уст} = \frac{N_{ГЭУ,ij}}{Q_{p,0} \cdot \bar{\eta}_{ЯЭУ,j}} k_{ij}. \quad (5)$$

На рис. 2 показана плотность вероятности выбора судоводителем текущей мощности ГЭУ на j -м участке пути атомного ледокола. Рассмотрены наибольшие значения выбора текущей мощности ГЭУ (правая часть статистической зависимости относительно математического ожидания текущей мощности). Наиболее вероятный диапазон изменения мощности ГЭУ рассматривается в районе математического ожидания мощности ГЭУ — $\bar{N}_{ГЭУj}$.

Таблица 2

**Рекомендации по управлению РУ атомного ледокола
в зависимости от условий работы ледокола [9]**

Условия работы ледокола	k_{ij}	$\partial \bar{Q}_p / \partial \tau$, %/с	Рекомендации по управлению
Свободное плавание по чистой воде	1	Не более 1,0	Скорость изменения мощности определяется скоростью перемещения ЗР.
Свободное плавание в разряженных льдах	1,1	Не более 1,0	Изменение мощности ГЭУ производится с ПУ с упреждением.
Свободное плавание в сплошных льдах, буксировка вплотную в реке	1,053	Не более 1,0	Судоводитель действует с упреждением.
Работа реверсами	1,4	2...3	ЗМ ГЭУ может перемещаться с полного вперед на полный назад и наоборот без выдержек времени. На чистой воде при полном ходе вперед останов винтов происходит за время не более 15 с, в швартовном режиме до 10 с.
Буксировка на морском участке на коротком буксире	1,25	Не более 1,0	Действия судоводителя носят упреждающий характер. Частота изменения мощности ГЭУ определяется сменой ледовой обстановки.
Проводка с околками	$\frac{1}{0,4 + 0,7 Q_p^{уст}}$	2...3	Данный режим сочетает проводку лидированием с режимом работы с реверсами.
Проводка лидированием	1,33	Не более 1,0	Необходима большая мобильность при поддержании дистанции между ледоколом и проводимым судном. Иногда необходимо быстро «отскочить» от ведомого.

Неопытный судоводитель, как правило, запрашивает заведомо завышенное ОМ ГЭУ — $N_{ГЭУj}^{OM-1}$. На j -м участке пути превышение текущей мощности ГЭУ $N_{ГЭУij}$, заданного ОМ ГЭУ $N_{ГЭУij} < N_{ГЭУj}^{OM-1}$, маловероятно. Опытный судоводитель обычно заказывает несколько меньшую величину ОМ ГЭУ — $N_{ГЭУj}^{OM-2}$, поэтому на j -м участке пути возможно выполнение неравенства $N_{ГЭУij} \leq N_{ГЭУj}^{OM-2}$ при возникновении маловероятных препятствий. Если судоводитель ориентируется на статистически обоснованные рекомендации по реализации типовых условий проводки, то, вероятнее всего, он сможет более объективно назначать ОМ ГЭУ на j -м участке пути. При этом ожидается выполнение неравенства $N_{ГЭУij} \leq N_{ГЭУj}^{OM-3}$, а превышение текущей мощности ГЭУ ограничения мощности будет иметь относительно небольшую вероятность.

В соответствии с заказанным судоводителем ОМ ГЭУ инженер-оператор в ЦПУ устанавливает мощность реактора (или реакторов) по данному запросу ($Q_{pj}^{уст}$) на ПУ ЯППУ. По запросу неопытного судоводителя устанавливается мощность реактора $Q_{p,j}^{уст-1}$ (см. рис. 2). При этом для маневрирования у судоводителя имеется оперативный запас мощности реактора $\Delta Q_p^{оп-1}(\Delta\tau_j)$, который почти всегда будет положительным, т. е.

$$Q_{(p,j)}^{уст-1} - \frac{N_{ГЭУij}(\Delta\tau_j)}{\bar{n}_{ЯЭУj}} = \Delta Q_p^{оп-1}(\Delta\tau_j) > 0. \quad (6)$$

По запросу опытного судоводителя инженер-оператор на j -м участке пути устанавливает мощность реактора $Q_{pj}^{уст-2}$. При этом оперативный запас мощности реактора для маневрирования несколько снижается, и выполняется неравенство

$$Q_{pj}^{уст-2} - \frac{N_{ГЭУij}(\Delta\tau_j)}{\bar{n}_{ЯЭУj}} = \Delta Q_p^{оп-2}(\Delta\tau_j) \geq 0. \quad (7)$$

Если учитываются научно обоснованные рекомендации по эксплуатации атомных ледоколов в различных ледовых условиях и выполнению типовых вариантов проводки, то судоводитель заказывает еще меньшую величину ОМ ГЭУ, и инженер-оператор снижает устанавливаемую мощность реактора до величины $Q_{pj}^{уст-3}$, при этом оперативный запас реактора на маневрирование также снижается, но при этом выполняется неравенство (7).

Допустим, у судоводителя имеется возможность самостоятельно влиять на мощность реактора, оперативно ее увеличивать в режиме СДП в главном паропроводе. В этом случае у судоводителя появляется определенная степень свободы, и он может еще больше снизить запрашиваемое ОМ ГЭУ — $N_{ГЭУj}^{OM-4}$, инженер-оператор при этом, соответственно, снизит установленную мощность реактора до величины $Q_{pj}^{уст-4}$, оперативный запас мощности реактора на маневрирование значительно снижается и может стать отрицательным по отношению к заданной судоводителем мощности ГЭУ:

$$Q_{pj}^{уст-4} - \frac{N_{ГЭУij}(\Delta\tau_j)}{\bar{n}_{ЯЭУj}} = \Delta Q_p^{оп-4}(\Delta\tau_j) < 0. \quad (8)$$

Архитектура управления ЯЭУ при использовании технологии СДП сводится к следующему. Основную часть j -го пути ледокол проходит в наиболее вероятном диапазоне изменения мощности. Если появляется кратковременное маловероятное препятствие или возникают кратковременные экстренные режимы при проводке судов, требующие временного повышения мощности реактора (например, избежание столкновения при проводке лидированием), то включается *контролируемый судоводителем ресурс* на увеличение мощности реактора без запроса нового ограничения в ЦПУ.

Возможное максимальное увеличение мощности ГЭУ — $\Delta N_{ГЭУ}^{СДПmax}$, определяется заданным ограничением мощности $N_{ГЭУj}^{OM-4}$ и допустимым (минимальным) давлением в главном паропроводе — $p_{ГПj}^* / p_{ГПj}^{min}$. Допустимое снижение давления требует отдельного анализа по условиям работы включенного в пароконденсатный цикл оборудования, использующего пар из главного паропровода.

Соотношение между относительной мощностью реактора $\frac{Q_{pj}^{СДП}}{Q_{pj}^{уст}}$ в зависимости от относительной мощности ГЭУ $N_{ГЭУj}^{СДП} / N_{ГЭУj}^{OM}$ при применении технологии СДП на j -м участке пути можно записать в следующем виде:

$$\frac{Q_{pj}^{СДП}}{Q_{p,j}^{уст}} = \frac{h_{пгj}^* - h_{пвj}^*}{h_{пгj} - h_{пвj}} \frac{\frac{N_{ГЭУj}^{СДП} / N_{ГЭУj}^{ОМ}}{\eta_{0i,j}^{ГТ(*)} \cdot \eta_{эл,j} \cdot \eta_m \cdot H_{a,j}^{ГТ(*)}} k_{сн} + \frac{\bar{G}_{ВП}}{N_{ГЭУj}^{ОМ}}}{\frac{1}{\eta_{0i,j}^{ГТ} \cdot \eta_{эл,j} \cdot \eta_m \cdot H_{a,j}^{ГТ}} k_{сн} + \frac{\bar{G}_{ВП}}{N_{ГЭУj}^{ОМ}}} \quad (9)$$

При этом относительное давление пара в ГП $\frac{p_{гп,j}^*}{p_{гп}^{мин}}$ в зависимости от относительном мощности ГЭУ на j -м участке пути можно представить в виде выражения

$$\frac{p_{гп,j}^*}{p_{гп}^{мин}} \approx 1 - \frac{\Delta p_{пк0}}{p_{гп}^{мин}} \left[\left(\frac{\frac{N_{ГЭУj}^{СДП} / N_{ГЭУj}^{ОМ}}{\eta_{0i,j}^{ГТ(*)} \cdot \eta_{эл,j} \cdot \eta_m \cdot H_{a,j}^{ГТ(*)}} k_{сн} + \frac{\bar{G}_{ВП}}{N_{ГЭУj}^{ОМ}} \right)^2 - 1 \right], \quad (10)$$

где $k_{сн}$ — коэффициент, учитывающий количество пара, поступающего на собственные нужды паротурбинной установки (потребители 1-го рода);

$h_{пгj}^*$; $h_{пгj}^*$; $h_{пвj}^*$; $h_{пв,j}^*$ — энтальпии пара за парогенераторами и питательной воды, поступающей в парогенераторы, соответственно, до и после маневра с СДП на j -м отрезке пути;

$\eta_{0i,j}^{ГТ}$; $\eta_{0i,j}^{ГТ(*)}$ — КПД, соответственно, внутренний относительный главной турбины до и после маневра с СДП в ГП;

$\eta_{эл,j}$; η_m — КПД электрический и механический (генератора и ГЭД) на j -м участке пути;

$H_{a,j}^{ГТ}$; $H_{a,j}^{ГТ(*)}$ — изоэнтروпийный перепад энтальпий на главной турбине, соответственно, до и после маневра с СДП на j -м участке пути;

$\bar{G}_{ВП} = G_{ВП} / G_{ПВ0}$ — относительное потребление пара вспомогательными потребителями (практически не зависит от режима работы ГЭД);

$\Delta p_{пк0}$ — перепад давлений на питательном клапане (поддерживаемый астатическим регулятором);

$p_{гп}^{мин}$ — минимальное поддерживаемое давление в главном паропроводе.

Для а/л пр. 10521 максимально возможное относительное увеличение расхода питательной воды при применении технологии СДП можно записать в следующем виде:

$$\frac{\bar{G}_{ПВ1}^{max(*)}}{\bar{G}_{ПВ1}} = \frac{1,1 \frac{\bar{N}_{ГЭУ1}}{k_{h1}} - \sqrt{2,1 \left(\frac{\bar{N}_{ГЭУ1}}{k_{h1}} \right)^2 + 0,356 \frac{\bar{N}_{ГЭУ1}}{k_{h1}} + 0,83}}{-0,315 \left(\frac{\bar{N}_{ГЭУ1}}{k_{h1}} \right)^2 - 0,12 \frac{\bar{N}_{ГЭУ1}}{k_{h1}} - 0,3}. \quad (11)$$

Тогда максимально возможное снижение давления по условию пропускной способности РК ГТА можно определить из выражения

$$\left(\frac{p_{гп,j}^*}{p_{гп}^{мин}} \right)_{мин} \approx 1 - \frac{\Delta p_{пк0}}{p_{гп}^{мин}} \left[\left(\frac{1,1 \frac{\bar{N}_{ГЭУj}}{k_{h1}} - \sqrt{2,1 \left(\frac{\bar{N}_{ГЭУj}}{k_{h1}} \right)^2 + 0,356 \frac{\bar{N}_{ГЭУj}}{k_{h1}} + 0,83}}{-0,315 \left(\frac{\bar{N}_{ГЭУ1}}{k_{h1}} \right)^2 - 0,12 \frac{\bar{N}_{ГЭУ1}}{k_{h1}} - 0,3}} \right)^2 - 1 \right]. \quad (12)$$

Максимальное относительное увеличение мощности реактора по условию пропускной способности РК ГТА при маневре с СДП оценивается по следующей формуле:

$$\left(\frac{Q_{pj}^{СДП}}{Q_{pj}^{уст}} \right)_{\max} = \frac{h_{ПГj}^* - h_{ПВj}^*}{h_{ПГj} - h_{ПВj}} \frac{1,1 \frac{\bar{N}_{ГЭУ1}}{k_{h1}} - \sqrt{2,1 \left(\frac{\bar{N}_{ГЭУ1}}{k_{h1}} \right)^2 + 0,356 \frac{\bar{N}_{ГЭУ1}}{k_{h1}} + 0,83}}{-0,315 \left(\frac{\bar{N}_{ГЭУ1}}{k_{h1}} \right)^2 - 0,12 \frac{\bar{N}_{ГЭУ1}}{k_{h1}} - 0,3}; \quad (13)$$

$$k_{h1} \approx \frac{1}{0,79} [0,104 \ln(100 \bar{N}_{ГЭУ1}) + 0,31].$$

$k_{h1} = \frac{\eta_{0i1}^{\Gamma} H_{a1}^{\Gamma}}{\eta_{0i0}^{\Gamma} H_{a0}^{\Gamma}}$ — коэффициент, учитывающий изменение изоэнтропийного перепада энтальпий

и внутреннего относительного КПД главных турбин на частичных режимах. Как правило, этот коэффициент меньше единицы.

На рис. 3 показана оценка изменения параметров функционирования при применении технологии СДП на атомных ледоколах пр. 10521. Чем меньше величина ОМ ГЭУ (установленная мощность РУ), тем большим может быть увеличение расхода питательной воды и мощности реактора при переходе на технологию СДП в ГП. При этом будет наблюдаться и большее снижение давления в ГП. Наиболее критичны к снижению давления в ГП являются пароструйные эжекторы в пароконденсатном цикле (главные и вспомогательные). Одновременно к пароструйным эжекторам подводится пар из вспомогательной паровой магистрали при рабочем давлении 1,6 МПа, что составляет

примерно $\frac{P_{ГПj}^*}{P_{ГП}^{\min}} \approx 0,6$ относительного снижения давления в ГП. Таким образом, без срыва пароструйных эжекторов можно увеличить мощность РУ почти в 2 раза относительно установленного ОМ ГЭУ. Чем выше установленное ОМ ГЭУ (установленная мощность реактора), тем меньше может быть предполагаемое увеличение мощности при переходе на технологию СДП в ГП.

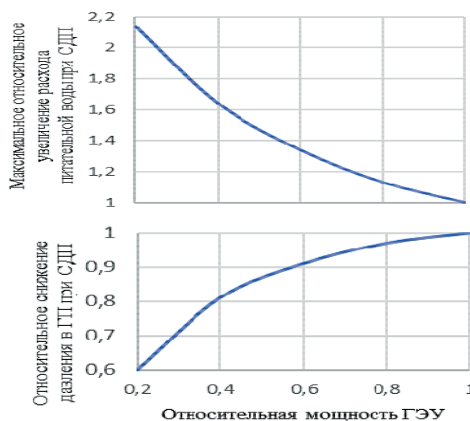


Рис. 3. Изменение параметров функционирования при применении технологии СДП на атомных ледоколах пр. 10521

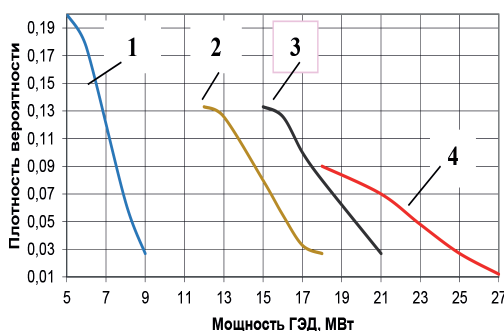


Рис. 4. Вероятное распределение мощности ГЭД при различных способах проводки ледокола:
1 — свободное плавание по чистой воде и в разряженных льдах; 2 — буксирование в дрейфующих льдах;
3 — буксирование в припайных льдах; 4 — проводка лидированием

На рис. 4 в качестве примера представлены вероятные распределения мощности ГЭД при различных способах проводки судов атомным ледоколом. В данном случае по величине математического ожидания мощности ГЭУ и дисперсии наиболее жестким режимом принята *проводка лидированием*, так как необходима высокая мобильность при поддержании дистанции между ледоколом и проводимым судном, а также необходим запас мощности для быстрого ухода от ведомого судна.

Результаты (Results)

На рис. 5 показана блок-схема организации управления ЯЭУ атомного ледокола с возможностью перехода на скользящее давление пара в ГП. Ориентируясь на ледовую обстановку, судоводитель из ХР при помощи машинного телеграфа ЦПУ подает команду (задание) в ЦПУ на требуемую мощность РУ 1 и инженер-оператор на пульте управления ЯППУ устанавливает ЗР в запрашиваемое положение 2).

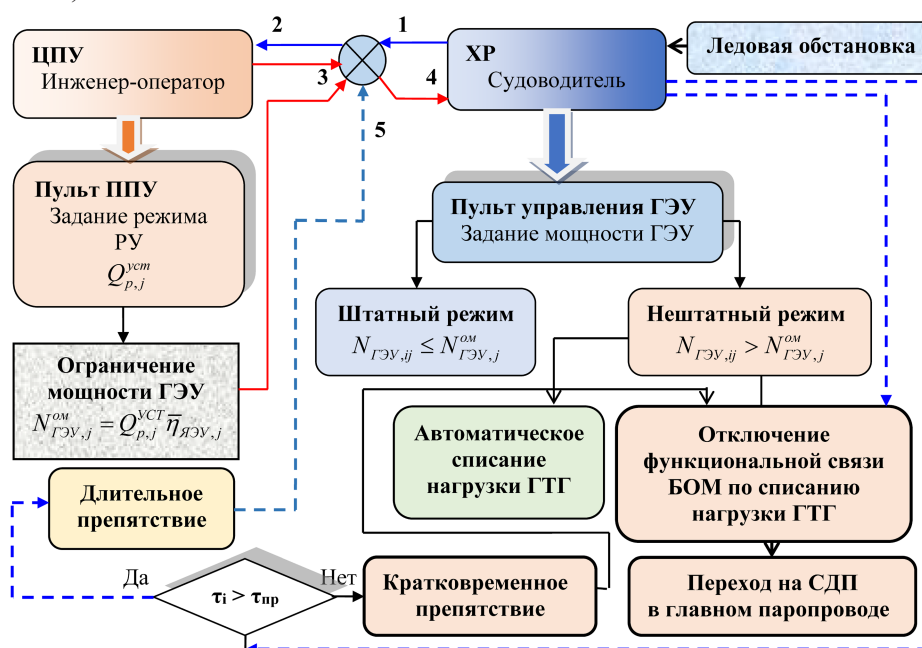


Рис. 5. Блок-схема управления ЯЭУ атомного ледокола с возможностью перехода к технологии СДП в ГП

Если в процессе управления ледоколом задаваемая судоводителем с пульта управления ГЭУ мощность превысит ОМ ГЭУ — $N_{ГЭУ,ij} > N_{ГЭУ,j}^{ом}$, то возникает нештатный режим и в этом случае предусмотрена система, обеспечивающая автоматическое списание нагрузки с ГТГ, т. е. автоматическое снижение запрашиваемой мощности на ГЭУ. Чтобы этого не произошло, судоводителю следует временно прервать функциональную связь по списанию нагрузки ГТГ. Таким образом, у него появляется дополнительная возможность на некоторых коротких участках пути оперативно форсировать мощность ГЭД, не запрашивая новое ОМ ГЭУ, задаваемое из ЦПУ.

Такая технология управления позволяет при соблюдении безопасности судовождения *снизить величину устанавливаемой мощности реакторов и, соответственно, уменьшить выжигание ядерного топлива* при выполнении ледоколом определенного объема работ в Арктике. Переход на технологию СДП должен быть зафиксирован в ЦПУ инженером-оператором с помощью сигнализации (3). При этом вахта в ЦПУ усиливает оперативный контроль за параметрами функционирования ЯЭУ (4).

Если длительность прохождения ледоколом препятствий возрастает (длительное препятствие), то судоводитель по штатной связи 5 (см. рис. 5) запрашивает в ЦПУ новый (повышенный) уровень мощности РУ и, следовательно, новое ОМ ГЭУ. Ориентиром при этом может служить превышение длительности прохождения препятствия некоторой предельной величины $\tau_i > \tau_{пр}$. Предельная длительность прохождения препятствия ($\tau_{пр}$) определяется непосредственно судоводителем.

Обсуждение (Discussion)

Оценки экономических показателей эксплуатации атомных ледоколов при проводке судов в Арктике показали, что предложенная технология (способ) управления ЯЭУ позволяет значительно уменьшить выгорание ядерного топлива в активной зоне при выполнении заданного объема работ в Арктике [8]. На рис. 6 предложена упрощенная модель использования расчетного энергозапаса активной зоны РУ при выполнении типовых работ атомным ледоколом в Арктике, а на рис. 6, а представлены варианты выбора судоводителем установленной мощности реактора при выполнении работ. В качестве примера для описания типовых работ в данном случае использованы данные, приведенные на рис. 4. Запрашиваемые (установленные) мощности РУ для преодоления типовых препятствий значительно отличаются в зависимости от квалификации судоводителей, наличия статистических данных по прохождению типовых препятствий и возможности применения технологии СДП. При этом наибольшую мощность реактора для выполнения типовых работ заказывает неопытный судоводитель. Однако невысокую мощность реактора может назначить даже неопытный судоводитель при наличии у него возможности на коротких интервалах времени оперативно увеличивать мощность ГЭУ (ГЭД) за счет перехода на технологию СДП в ГП. При этом вахта в ЦПУ должна быть осведомлена о переходе на СДП и тщательно контролировать параметры функционирования РУ и ПТУ на данном отрезке времени.

На рис. 6, б оценена возможная энерговыработка активной зоны при выполнении текущих работ атомным ледоколом в Арктике при различных вариантах судовождения. При этом в качестве примера используется статистическая информация по эксплуатации а/л «Таймыр» (Королев В. И. Основы управления судовыми реакторными установками при работе на мощности: учеб. пособие. — СПб.: Изд-во «Медицинская пресса», 2003. — 106 с.). Наиболее энергозатратным (по времени использования) видом проводки принято буксирование в дрейфующих льдах. При этом наибольшее выгорание ядерного топлива обеспечивает неопытный судоводитель. Однако с применением судоводителем технологии СДП в ГП энерговыработка по всем видам проводки резко сокращается.

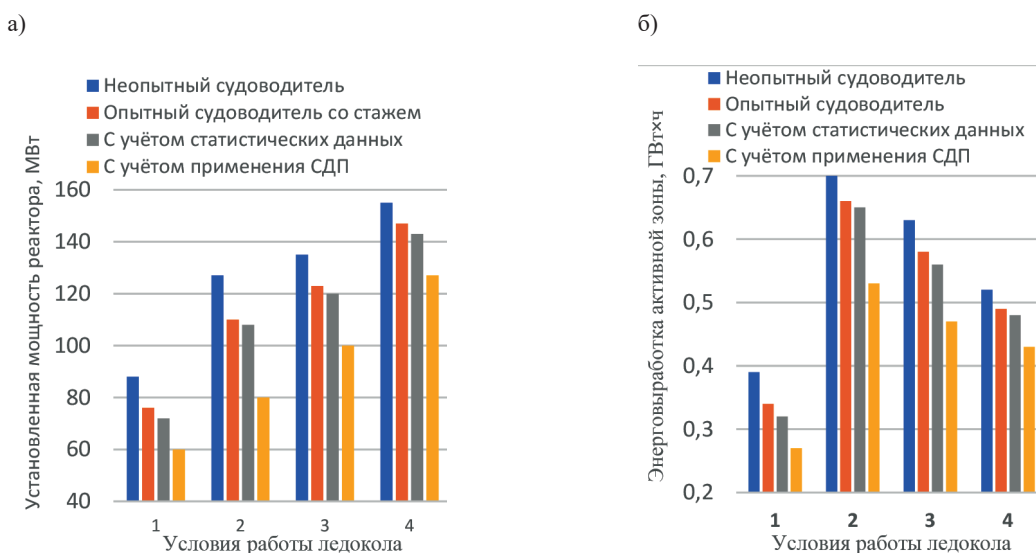


Рис. 6. Упрощенная модель использования расчетного энергозапаса активной зоны РУ при выполнении типовых работ атомным ледоколом в Арктике:

- а — варианты выбора судоводителем установленной мощности реактора;
б — возможная энерговыработка активной зоны при выполнении текущих работ
(1 — свободное плавание во льдах; 2 — буксирование в дрейфующих льдах;
3 — буксирование в припайных льдах; 4 — проводка лидированием)

На рис. 7 представлены результаты расчетов эффективности использования расчетного энергозапаса при различных вариантах назначения ОМ ГЭУ, а на рис. 7, а приведена энерговыра-

ботка активной зоны с учетом вариантов назначения ОМ ГЭУ. Если судовождение осуществляется неопытным судоводителем, то при выполнении заданного объема работ в Арктике расчетный энергозапас активной зоны (кампания активной зоны) заканчивается к некоторому условному моменту времени и требуется перегрузка топлива (активной зоны). Одновременно при работе более опытного судоводителя к данному условному моменту времени остается некоторый остаточный энергозапас, который может быть в дальнейшем полезно использован для дополнительной проводки судов. При использовании технологии СДП в ГП остаток энергозапаса составляет значительную часть общего расчетного энергозапаса — 26 %. Этот остаток энергозапаса может быть полезно использован на атомном ледоколе для выполнения еще большего объема дополнительных работ. Данное значение можно сопоставить с работой РУ без травления пара из главного паропровода, т. е. без создания запаса мощности РУ на маневрирование. Такой режим работы возможен при использовании СВУ РУ и ПТУ (см. рис. 1). По сравнению с использованием СРУ и управлении ледоколом неопытным судоводителем экономия топлива при применении СВУ при прочих равных условиях может составить примерно 33 % расчетного энергозапаса.

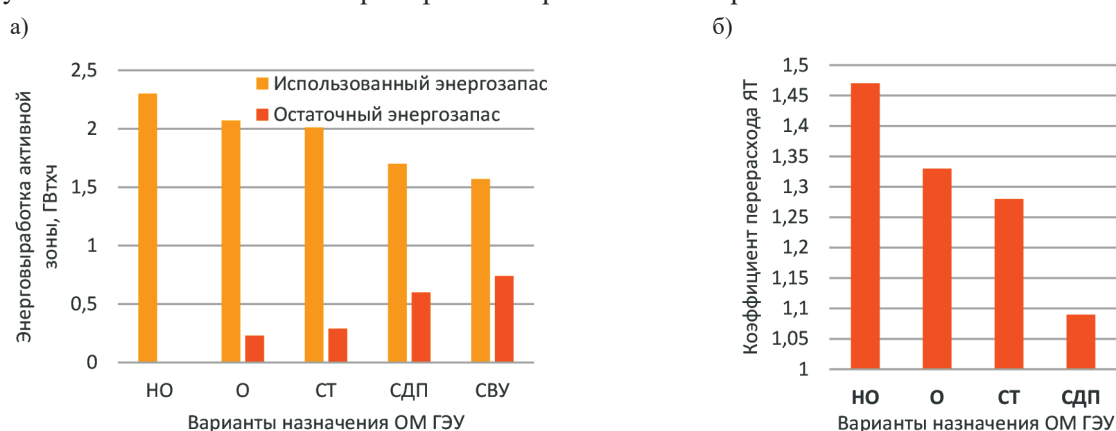


Рис. 7. Эффективность использования расчетного энергозапаса при различных вариантах назначения ОМ ГЭУ:

- а* — энерговыработка активной зоны с учетом варианта назначения ОМ ГЭУ;
б — коэффициент перерасхода ядерного топлива при различных вариантах назначения ОМ ГЭУ
 (НО — неопытный судоводитель; О — опытный судоводитель;
 СТ — с учетом статистических данных по типовой эксплуатации;
 СДП — с учетом применения технологии СДП;
 СВУ — использование системы взаимосвязанного управления (без травления пара))

В публикации [9] разработаны критерии оценки эффективности работы ледоколов по экономии ядерного топлива. При этом для ее оценки вводятся коэффициенты использования и перерасхода ядерного топлива на маневрирование ГЭУ. На рис. 7, б показано изменение коэффициента перерасхода ядерного топлива на маневрирование ГЭУ (ледокола) при различных вариантах судовождения. Коэффициент перерасхода ядерного топлива на маневрирование при управлении ледоколом неопытным судоводителем для рассмотренной модели эксплуатации составляет 1,47. Данное значение уменьшается до 1,33 при управлении ледоколом опытным судоводителем и снижается до 1,09 при судовождении с использованием технологии СДП в ГП.

Заключение (Conclusion)

Технология СДП для улучшения технико-экономических показателей энергоблоков на переменных режимах широко разработана и внедрена в стационарной энергетике. При этом рассматриваются энергоблоки на органическом и ядерном топливе. Технология СДП в ГП может быть успешно использована на атомных ледоколах для уменьшения выгорания ядерного топлива при работе во льдах. Однако ее применение на атомных ледоколах носит иной характер, связанный со спецификой работы ЯЭУ атомных ледоколов при проводке судов в Арктике.

Для обеспечения надежности РУ при частом изменении мощности ГЭУ используется система раздельного управления между РУ и ПТУ, которая определяет свои правила эксплуатации судовой ЯЭУ. При этом создается оперативный запас мощности РУ на маневрирование ГЭУ, т. е. мощность реактора заведомо завышается по отношению к необходимой для прохождения данного участка пути в Арктике. В пределах заданной мощности реактора судоводитель может осуществлять маневры ГЭУ. Пределом для него является ОМ ГЭУ, поскольку в данном случае поддерживается давление в ГП. Величина оперативного запаса субъективно определяется судоводителем, управляющим ГЭУ. При назначении ОМ ГЭУ судоводитель закладывает заведомо завышенный оперативный запас на маневрирование ГЭУ, рассчитывая его использовать в экстренных случаях, имеющих маловероятный характер. Для снижения оперативного запаса мощности РУ, а, следовательно, установленной мощности реактора предлагается маневрирование ГЭУ за пределами ОМ и переход на СДП в ГП. Это позволяет судоводителю осуществлять навигацию во льдах с пониженным по отношению к традиционным режимам работы РУ оперативным запасом мощности на маневрирование, поскольку ему временно передается управление мощностью реактора. Перестройка системы управления расходом питательной воды при неизменном положении питательного клапана и работе ГЭУ за пределом ограничения мощности рассмотрена в работе [10].

Применение технологии СДП в ГП при маневрировании за пределом ОМ ГЭУ позволяет при прочих равных условиях увеличить длительность кампании и повысить эффективность использования ядерного топлива активной зоны. Расчеты показали, что применение СДП в ГП по инициативе судоводителя для маневрирования ГЭУ при принятой модели использования расчетного энергозапаса позволяет увеличить длительность кампании примерно на 27...30 %, что лишь незначительно уступает увеличению длительности кампании, которая может быть при использовании для управления ЯЭУ СВУ. При этом большая часть пути в Арктике будет проходить при СРУ, что не отразится на надежности РУ. Для сопоставления эффективности работы атомных ледоколов при проводке судов в Арктике в части использования ядерного топлива целесообразно применять коэффициент перерасхода топлива, используемый в работе [9]. Если на ледоколе применяется технология СДП в ГП, то коэффициент перерасхода топлива может быть снижен с 1,47 при традиционных способах проводки до 1,09, что, безусловно, свидетельствует о более эффективной работе эксплуатационного персонала атомного ледокола. Это дает существенную экономию ядерного топлива и повышает экономические показатели атомных ледоколов. Следует отметить, что выполненные расчеты требуют уточнения на действующих атомных ледоколах или подтверждения с использованием математических моделей ЯЭУ, заложенных в полномасштабные тренажеры соответствующих проектов атомных ледоколов.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Добродеев А. А. Экспериментальные исследования возможности проводки ледоколом крупнотоннажных судов при буксировке вплотную / А. А. Добродеев, К. Е. Сазонов // Вестник государственного университета морского и речного флота им. адмирала С. О. Макарова. — 2022. — Т. 14. — № 5. — С. 645–655. DOI: 10.21821/2309-5180-2022-14-5-645-655. — EDN RMHDVO.
2. Королев В. И. Особенности маневренных режимов эксплуатации реакторных установок атомных ледоколов при работе в условиях Арктики / В. И. Королев // Вестник государственного университета морского и речного флота им. адмирала С. О. Макарова. — 2023. — Т. 15. — № 1. — С. 109–125. DOI: 10.21821/2309-5180-2023-15-1-109-125. — EDN ZWQYSB.
3. Зверев Д. Л. Реакторные установки для атомных ледоколов. Опыт создания и современное состояние / Д. Л. Зверев, Ю. П. Фадеев, А. Н. Пахомов [и др.] // Атомная энергия. — 2020. — Т. 129. — № 1. — С. 29–37. — EDN RSMWQG.
4. Саркисов А. А. Перспективы использования атомных энергетических технологий в Арктике / А. А. Саркисов, Д. О. Смоленцев, С. В. Антипов [и др.] // Арктика: экология и экономика. — 2022. — Т. 12. — № 3. — С. 349–358. DOI: 10.25283/2223-4594-2022-3-349-358. — EDN CENAAX.

5. Королев В. И. Применение скользящего давления пара в главном паропроводе атомного ледокола для уменьшения выгорания ядерного топлива / В. И. Королев, А. С. Лисина // Морское образование: традиции, реалии и перспективы: материалы науч.-практ. конф., Санкт-Петербург, 31 марта 2015 г. — СПб.: Изд-во ГУМРФ им. адм. С. О. Макарова, 2015. — С. 103–109.

6. Королев В. И. Статистические модели режимов работы ГЭУ и РУ атомного ледокола при эксплуатации в Арктике / В. И. Королев, А. С. Лисина // Сборник тезисов докладов национальной научно-практической конференции профессорско-преподавательского состава ФГБОУ ВО «ГУМРФ имени адмирала С. О. Макарова, Санкт-Петербург, 10 сентября — 20 октября 2018 года. — СПб.: Изд-во ГУМРФ им. адм. С. О. Макарова, 2018. — С. 100–103.

7. Повышение эффективности использования ядерного топлива судовых активных зон за счет применения различных технологий управления мощностью РУ [Текст]: отчет о НИОКР № 214092350007 ФГБОУ ВО «ГУМРФ имени адмирала С. О. Макарова»; руковод. А. Ю. Ластовцев. — СПб., 2014. — 52 с.

8. Королев В. И. Повышение экономических показателей эксплуатации атомных ледоколов при проходе судов в Арктике / В. И. Королев // Арктика: экология и экономика. — 2021. — Т. 11. — № 2. — С. 244–253. DOI: 10.25283/2223-4594-2021-2-244-253. — EDN KHYVIO.

9. Королев В. И. Маневренность и экономичность ядерных энергетических установок атомных ледоколов / В. И. Королев, А. Ю. Ластовцев // Материалы научно-практической конференции, посвященная 150-летию со дня рождения академика А. Н. Крылова. — СПб.: СПбГМТУ, 2013. — С. 150–153.

10. Королев В. И. Использование скользящего давления пара в главном паропроводе для повышения экономических показателей энергетической установки атомных ледоколов / В. И. Королев, А. И. Лебедев // Вестник Астраханского государственного технического университета. — Серия: Морская техника и технология. — 2025. № 1. — С. 70–80. — EDN XWYUFG.

REFERENCES

1. Dobrodeev, A. A. and K. E. Sazonov. “Experimental studying a possibility of close-coupled towing of large-sized vessels by icebreaker.” *Vestnik gosudarstvennogo universiteta morskogo i rechnogo flota im. admirala S. O. Makarova* 14.5 (2022): 645–655. DOI: 10.21821/2309-5180-2022-14-5-645-655.

2. Korolev, V. I. “Features of maneuverable operation modes of nuclear icebreakers reactor installations when working in the arctic.” *Vestnik gosudarstvennogo universiteta morskogo i rechnogo flota im. admirala S. O. Makarova* 15.1 (2023): 109–125. DOI: 10.21821/2309-5180-2023-15-1-109-125.

3. Zverev, D. L., Yu. P. Fadeev, A. N. Pakhomov, et al. “Reaktornye ustanovki dlya atomnykh ledokolov. Opyt sozdaniya i sovremennoe sostoyanie.” *Atomnaya energiya* 129.1 (2020): 29–37.

4. Sarkisov, A. A., D. O. Smolentsev, S. V. Antipov, et al. “Prospects of using nuclear power technologies in the arctic.” *Arctic: Ecology And Economy* 12.3 (2022): 349–358. DOI: 10.25283/2223-4594-2022-3-349-358.

5. Korolev, V. I. and A. S. Lisina. “Primenenie skol'zyaschego davleniya para v glavnom paroprovode atomnogo ledokola dlya umen'sheniya vygoraniya yadernogo topliva.” *Morskoe obrazovanie: traditsii, realii i perspektivy: materialy nauchno-prakticheskoy konferentsii, Sankt-Peterburg, 31 marta 2015 goda. Tom 2.* Sankt-Peterburg: Federal'noe gosudarstvennoe byudzhethoe obrazovatel'noe uchrezhdenie vysshego obrazovaniya Gosudarstvennyy universitet morskogo i rechnogo flota im. admirala S. O. Makarova, 2015: 103–109.

6. Korolev, V. I. and A. S. Lisina. “I. Statisticheskie modeli rezhimov raboty GEU i RU atomnogo ledokola pri ekspluatatsii v Arktike.” *Sbornik tezisev dokladov natsional'noy nauchno-prakticheskoy konferentsii professorsko-prepodavatel'skogo sostava FGBOU VO “GUMRF imeni admirala S. O. Makarova”, Sankt-Peterburg, 10 sentyabrya — 20 oktyabrya 2018 goda.* Sankt-Peterburg: Federal'noe gosudarstvennoe byudzhethoe obrazovatel'noe uchrezhdenie vysshego obrazovaniya Gosudarstvennyy universitet morskogo i rechnogo flota im. admirala S. O. Makarova, 2018: 100–103.

7. Admiral Makarov State University of Maritime and Inland Shipping: R&D report “Povyshenie effektivnosti ispol'zovaniya yadernogo topliva sudovykh aktivnykh zon za schet primeneniya razlichnykh tekhnologiy upravleniya moshchnoj RU” No. 214092350007. Saint-Petersburg, 2014.

8. Korolev V. I. Improving the economic performance of nuclear icebreakers when sailing ships in the Arctic / V. I. Korolev // Arctic: Ecology and Economics. — 2021. — Vol. 11. — No. 2. — PP. 244–253. DOI: 10.25283/2223-4594-2021-2-244-253. — EDN KHYVIO.

9. Korolev V. I. Maneuverability and efficiency of nuclear power plants of nuclear icebreakers / V. I. Korolev, A. Y. Lastovtsev // Proceedings of the scientific and practical conference dedicated to the 150th anniversary of the birth of Academician A. N. Krylov. — St. Petersburg: SPb.GMTU, 2013. Pp. 150–153.

10. Korolev V. I., Lebedev A. I. The use of sliding steam pressure in the main steam pipeline to increase the economic performance of the nuclear icebreaker power plant// Bulletin of Astrakhan State Technical University. Series: Marine engineering and Technology. 2025. No. 1. — Pp. 70–80 EDN XWYUFG.

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРЕ

Королёв Владимир Ильич —

кандидат технических наук, профессор

ФГБОУ ВО «ГУМРФ имени адмирала

С. О. Макарова

198035, Российская Федерация, Санкт-Петербург,
ул. Двинская, 5/7

e-mail: vlikor2007@yandex.ru, kaf_snef@gumrf.ru

Лебедев Анатолий Иванович —

кандидат технических наук,

ФГБОУ ВО «ГУМРФ имени адмирала

С. О. Макарова

198035, Российская Федерация, Санкт-Петербург,
ул. Двинская, 5/7

e-mail: kaf_snef@gumrf.ru

INFORMATION ABOUT THE AUTHOR

Korolev, Vladimir I. —

PhD, professor

Admiral Makarov State University of Maritime
and Inland Shipping

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

e-mail: vlikor2007@yandex.ru, kaf_snef@gumrf.ru

Lebedev, Anatoly I. —

PhD, Assistant Professor

Admiral Makarov State University
of Maritime and Inland Shipping 5/7

Dvinskaya Str., St. Petersburg, 198035,
Russian Federation

e-mail: kaf_snef@gumrf.ru

Статья поступила в редакцию 20 февраля 2025 г.

Received: Feb. 20, 2025

JUSTIFICATION FOR THE USE OF POLYMER COMPOSITE MATERIALS IN THE MANUFACTURE OF MARINE OIL TANKS

M. A. Meleshin¹, Ali Salamekh², V. A. Mamontov³

¹ Volga State University of Water Transport, Nizhny Novgorod, Russia

² Caspian Institute of Sea and River Transport after General-Admiral F. M. Apraksin,
Branch of Volga State University of Water Transport, Astrakhan, Russia

³ Astrakhan State Technical University, Astrakhan, Russia

This article addresses the issue of determining the ability of marine diesel oil to penetrate into the structure of a composite material made with reinforcing glass fabrics and a polyester binder. The penetration capability is assessed by measuring the weight change of samples cut from a standard plate of polymer composite material before and after immersion in a container with marine diesel oil for a specified duration. A low penetration rate of diesel oil into this material has been established, depending on its structure—specifically, on the arrangement of reinforcing materials and whether or not the edges were treated with polyester resin after cutting from the standard plate. The mechanical properties (tensile, compressive, and flexural strength) of the composite material after removal from diesel oil are reported. This study also examines how processing the ends of cut samples with polyester resin affects marine diesel oil penetration into polymer composite structures. The influence of sample layering (glass wool and roving fiberglass) in a liquid medium (diesel oil) on mechanical characteristics during bending, stretching, and compression is analyzed. The article presents research findings that demonstrate a direct correlation between ultimate strength, breaking force, and the number of roving layers in polymer composite materials treated with polyester resin. Experimental results reveal how diesel oil penetrates composite materials, altering their mechanical properties upon immersion in a liquid medium. Findings from an experimental study on various reinforcement schemes confirm the feasibility of using these materials in ship hull structures. Specifically, these materials are recommended for manufacturing marine tanks designed for storing diesel oil.

Keywords: marine tanks, marine diesel oil, reinforcing material, binding element, tensile strength, testing equipment, applied load, destructive load.

For citation:

Meleshin, Maksim A., Ali Salamekh and V. A. Mamontov “Justification of the use of polymer composite materials for the manufacture of marine oil tanks.” *Vestnik Gosudarstvennogo universiteta morskogo i rechnogo flota imeni admirala S. O. Makarova* 17.2 (2025): 271–281. DOI: 10.21821/2309-5180-2025-17-2-271-281.

УДК 629.12

ОБОСНОВАНИЕ ПРИМЕНЕНИЯ ПОЛИМЕРНЫХ КОМПОЗИЦИОННЫХ МАТЕРИАЛОВ ДЛЯ ИЗГОТОВЛЕНИЯ СУДОВЫХ МАСЛЯНЫХ ЦИСТЕРН

М. А. Мелешин¹, А. Саламех², В. А. Мамонтов³

¹ Волжский Государственный университет водного транспорта,
Нижний Новгород, Россия

² Каспийский институт морского и речного транспорта имени генерал-адмирала
Ф. М. Апраксина, филиал Волжского государственного университета
водного транспорта, Астрахань, Россия

³ Астраханский Государственный технический университет, Астрахань, Россия

В статье выполнена задача по определению способности судового дизельного масла к проникновению в структуру композиционного материала, изготовленного с применением армирующих стеклянных тканей и полиэфирного связующего элемента. Способность судового дизельного масла проникать в структуру

образцов, нарезанных из общей плиты полимерного композиционного материала, выполняется путем определения изменения веса образцов до и после их погружения в емкости с жидкой средой (судовое дизельное масло) на определенный период времени. Установлена незначительная способность проникновения дизельного масла в состав данного материала в зависимости от его структуры, т. е. от расположения армирующего материала, а также от наличия или отсутствия обработки краев образцов полиэфирной смолой после их нарезания из общей плиты. Рассмотрены механические свойства (предел прочности при растяжении, сжатии и изгибе) композиционного материала после его изъятия из емкости с дизельным маслом. Решается практическая задача определения возможности влияния обработки торцов нарезанных образцов для испытаний полиэфирной смолой на способность проникновения судового дизельного масла в структуру полимерного композиционного материала. Установлено влияние нахождения образцов в жидкой среде (дизельное масло) с определенным соотношением слоев армирующего материала (стекломата и ровинговой стеклоткани) на их механические характеристики при изгибе, растяжении и сжатии. Представлены результаты исследований, демонстрирующие непосредственную связь между пределом прочности, разрушающей силой и числом ровинговых слоев в структуре полимерных композиционных материалов образцов, подвергнутых обработке полиэфирной смолой. В ходе выполнения экспериментов определена способность проникновения дизельного масла в структуру композиционных материалов и изменения механических свойств в результате погружения данных материалов в жидкую среду. Результаты экспериментального исследования образцов полимерных композиционных материалов с различными схемами армирования подтверждают целесообразность их использования в корпусных конструкциях судов, в частности такие материалы могут быть рекомендованы для изготовления судовых цистерн, предназначенных для хранения дизельного масла.

Ключевые слова: судовые цистерны, судовое дизельное масло, армирующий материал, связующий элемент, предел прочности, испытательное оборудование, прилагаемая нагрузка, разрушающая нагрузка.

Для цитирования:

Мелешин М. А. Обоснование применения полимерных композиционных материалов для изготовления судовых масляных цистерн / М. А. Мелешин, А. Саламех, В. А. Мамонтов // Вестник Государственного университета морского и речного флота имени адмирала С. О. Макарова. — 2025. — Т. 17. — № 2. — С. 271–281. DOI: 10.21821/2309-5180-2025-17-2-271-281. — EDN UWXYFH.

Введение (Introduction)

В настоящее время использование изделий, изготовленных из полимерных композиционных материалов (ПКМ) в судостроительной и машиностроительной отрасли, объясняется их высокими механическими характеристиками по сравнению с изделиями, изготовленными из стали, такими, в частности, как удельная прочность, а также возможность получения готовых изделий без применения традиционных дорогостоящих механических обработок и т. д. [1]. Преимущества композитов по сравнению с традиционными металлическими материалами состоят в их высоком соотношении прочности к массе, устойчивости к коррозии и старению, а также улучшенных аэродинамических и гидродинамических характеристиках, что повышает скорость, маневренность и топливную эффективность судов. Использование таких материалов позволяет существенно снизить эксплуатационные расходы, а также повысить безопасность и экологическую устойчивость судов.

Стеклопластик, являющийся одним из основных материалов для производства ПКМ, представляет собой композитный материал, состоящий из стекловолоконного наполнителя, объединенного полимерной матрицей. Этот конструкционный материал, изготовленный на основе полиэфирных, эпоксидных и винилэфирных смол, способен выдерживать различного рода нагрузки, в том числе ударные и вибрационные. Стеклопластиковые материалы обладают рядом преимуществ, делающих его привлекательным для широкого спектра применения. К числу таких свойств относятся устойчивость к воздействию агрессивных сред и нерастворимость в них, материал не подвержен горению, стеклопластик практически не впитывает влагу. Кроме того, стеклопластик экологически безопасен, что является важным фактором. Особым преимуществом композитных материалов является их низкая электропроводность. К числу дополнительных достоинств можно отнести высокую ремонтопригодность, малый вес, биологическую стойкость, жесткость конструкции, продолжительный срок службы и ударную прочность. [2]

В 2023 г. Российским морским регистром судоходства (РС) был опубликован свод правил, регламентирующих производство, технический надзор за материалами и изделиями, а также эксплуатационный контроль контейнеров. Начиная с января 2024 г. РС санкционировал использование контейнер-цистерн из композитных материалов для международной транспортировки нефтепродуктов. В связи с этим изучается возможность применения ПКМ для изготовления цистерн, предназначенных для судовых энергетических установок и вспомогательных механизмов морских и речных транспортных судов. Для обеспечения надежности применения ПКМ необходимы фундаментальные исследования. В частности, важно определить возможность проникновения жидкой среды в структуру ПКМ и оценить степень изменения его механических показателей и свойств.

Целью данного исследования является определение влияния судового дизельного масла на весовые и механические показатели образцов, изготовленных из полимерных композиционных материалов с обработанными и необработанными краями полиэфирной смолой при их погружении в дизельное масло с продолжительным периодом времени (три месяца), а также определение влияния расположения армирующих слоев (стекломат и ровинговая стеклоткань) на способность проникновения дизельного топлива в структуру композиционного материала. В качестве объекта исследования выступают шестислойные образцы с обработанными и необработанными краями, пропитанными полиэфирной смолой. В основе этих образцов, созданных из композиционных материалов, стеклянные ткани и полиэфирная смола, отличающиеся как схемами расположения армирующих элементов, так и количеством слоев.

Методы и материалы (Methods and Materials)

Методика изготовления и испытаний образцов из ПКМ. Для достижения поставленной цели были изготовлены две шестислойные плиты из ПКМ с размерами, соответствующими ГОСТу 33345–2015, с двумя различными схемами армирования. Из этих плит были вырезаны образцы с использованием фрезерного станка для дальнейшего испытаний на трехточечный изгиб, сжатие и растяжение.

Порядок расположения армирующих слоев в образцах для проведения исследований должен быть выполнен по одной из следующих схем:

Схема армирования I — два слоя стекломата, два слоя ровинговой стеклоткани и два слоя стекломатериала.

Схема армирования II — два слоя ровинговой стеклоткани, два слоя стекломата и два слоя ровинговой стеклоткани.

Образцы каждой схемы были разделены на две группы:

- первая группа — образцы без обработки краев полиэфирной смолой;
- вторая группа — образцы с обработкой краев полиэфирной смолой.

В отличие от первой группы края образцов второй группы обрабатываются полиэфирной смолой «Яркопол-110» при помощи кисти с натуральной щетиной. После обработки краев образцов обработанные образцы необходимо оставить на 48 ч при нормальной комнатной температуре и только после полного высыхания их взвешивают.

Образцы из ПКМ разных схем армирования перед погружением в судовое дизельное масло взвешиваются на сертифицированных лабораторных электронных весах серии ВЛТЭ-310Т. Испытательное оборудование лаборатории сертифицировано и имеет свидетельство о признании классификационных обществ России. Образцы разных схем армирования, разделенные на две группы, погружают в дизельное масло на 90 суток при комнатной температуре 24 °С и влажности 50 %. В данном эксперименте используется судовое дизельное масло марки М-16Г2ЦС, температура застывания которого составляет минус 12 °С и плотность при 20 °С равна 908 кг/м³.

Масло моторное М-16Г2ЦС представляет собой судовое масло, получаемое путем смешения дистиллятных и остаточных компонентов, произведенных из сернистых нефтей с добавлением специальных присадок. Это масло предназначено для судовых двигателей внутреннего сгорания и вспомогательного оборудования судна. Обладает хорошей гидролитической стабильностью и сопротивляемостью химическому разложению при наличии воды. Масло по классу

вязкости соответствует SAE 40, по эксплуатационным характеристикам — API CC, производится в соответствии с ГОСТом 12337–84. В табл. 1 приведены весовые характеристики сухих образцов с разной схемой армирования [3].

Таблица 1

Весовые характеристики образцов до замачивания в дизельном масле

Номер образца	Испытания на растяжение		Испытания на сжатие		Испытания на трехточечный изгиб	
	Схема I	Схема II	Схема I	Схема II	Схема I	Схема II
Образцы первой группы (без обработки краев полиэфирной смолой)						
Масса, г						
1	55,64	43,69	0,7	0,75	35,64	30,10
2	53,63	43,41	0,7	0,73	34,73	29,21
3	54,05	43,73	0,94	0,66	36,06	28,86
4	52,64	42,61	0,95	0,66	35,80	27,51
5	54,71	43,09	0,84	0,63	31,96	30,04
Среднее значение	54,134	43,306	0,826	0,686	34,838	29,144
Образцы второй группы (с обработкой краев полиэфирной смолой)						
1	56,39	43,07	0,64	0,75	34,32	31,53
2	56,23	44,39	0,82	0,71	34,88	30,47
3	56,03	45,07	0,87	0,80	36,30	31,09
4	54,50	43,30	0,89	0,81	37,38	30,81
5	52,18	46,42	0,79	0,98	38,85	29,58
Среднее значение	55,066	44,45	0,802	0,81	36,346	30,696

После выдержанного срока указанного периода времени образцы разных схем армирования извлекают из емкости с дизельным маслом, насухо вытирают хлопчатобумажной обтирочной ветошью и взвешивают. Результаты взвешивания представлены в табл. 2.

Таблица 2

Весовые характеристики образцов после замачивания в дизельном масле

Номер образца	Испытания на растяжение		Испытания на сжатие		Испытания на трехточечный изгиб	
	I схема	II схема	I схема	II схема	I схема	II схема
Образцы первой группы (без обработки краев полиэфирной смолой)						
Масса, г						
1	55,77	43,86	0,7	0,75	35,75	30,21
2	53,82	43,53	0,71	0,73	34,85	29,31
3	54,21	43,89	0,95	0,67	36,18	28,96
4	52,78	42,76	0,95	0,67	35,92	27,60
5	54,86	43,25	0,85	0,64	32,10	30,16
Средние значения	54,288	43,458	0,832	0,692	34,96	29,248
Образцы второй группы (с обработкой краев полиэфирной смолой)						
1	56,46	43,13	0,64	0,75	34,38	31,58
2	56,31	44,45	0,82	0,72	34,94	30,53
3	56,13	45,12	0,87	0,82	36,35	31,13
4	54,62	43,36	0,89	0,82	37,44	30,88
5	52,24	46,50	0,79	0,98	38,88	29,63
Средние значения	55,152	44,512	0,802	0,818	36,398	30,75

На основе результатов измерения средних значений масс образцов двух схем армирования первой группы до и после замачивания в дизельном масле установлено следующее:

- среднее значение увеличения масс образцов, предназначенных для проведения испытаний на растяжение I и II схем армирования, составляет 0,154 г и 0,152 г соответственно;
- среднее значение увеличения масс образцов, предназначенных для проведения испытаний на сжатие I и II схем армирования, имеет одинаковое значение и составляет 0,006 г;
- среднее значение увеличения масс образцов, предназначенных для проведения испытаний на трехточечный изгиб I и II схем армирования, составляет 0,122 г и 0,104 г соответственно.

Результаты измерения средних значений масс, образцов двух схем армирования второй группы до и после замачивания в дизельном масле показали, что средние значения изменения весовых параметров образцов увеличиваются, но при этом отмечается следующее:

- у образцов, подготовленных для испытаний на растяжение, повышение средних весовых значений I и II схем армирования составляет 0,086 г и 0,062 г соответственно;
- у образцов, предназначенных для испытаний на сжатие, I схемы наблюдается незаметное увеличение массы, а для образцов II схемы данное увеличение составляет 0,008 грамма [5];
- у образцов, предназначенных для испытаний на изгиб, увеличение средних значений весовых характеристик составляет 0,052 г и 0,054 г соответственно.

На основе проведенных исследований можно сделать вывод о том, что дизельное масло обладает проникающей способностью в структуру образцов из ПКМ, сопровождающейся незначительным увеличением масс образцов, что наиболее заметно на образцах первой группы [6].

Испытания образцов из ПКМ с целью определения их механических характеристик после замачивания в судовом дизельном масле с выдержанным периодом времени, проводились на специальных сертифицированных испытательных машинах в сертифицированной лаборатории.

Испытание образцов из ПКМ на трехточечный изгиб. Методика испытаний и размеры образцов выполнены на основании требований ГОСТа 4648–2014¹. Технология нарезания образцов из общей плиты, методика проведения испытаний и способы расчета предела прочности при изгибе подробно описаны в работе [7]. Общий вид подготовленных образцов для проведения испытаний на изгиб приведен на рис. 1.

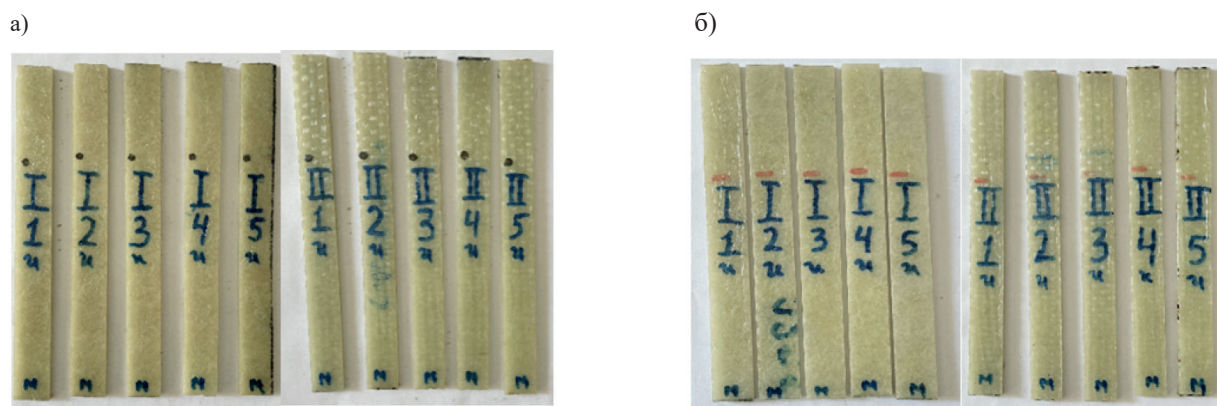


Рис. 1. Образцы двух разных схем армирования для проведения испытания на трехточечный изгиб:
а — без обработки краев полиэфирной смолой;
б — с обработки краев полиэфирной смолой

¹ ГОСТ 4648–2014. Пластмассовый. Метод испытания на статистический изгиб. М.: Стандартинформ, 2014. 34 с.

Результаты определения разрушающей силы и предела прочности приведены в табл. 3.

Таблица 3

Результаты испытаний образцов из ПКМ на трехточечный изгиб

Номер образца	Схема армирования			
	I		II	
	$F_{\max}$, кгс	σ , МПа	$F_{\max}$, кгс	σ , МПа
Образцы первой группы (без обработки краев полиэфирной смолой)				
1	100	216	90	215
2	80	166	105	285
3	100	183	110	272
4	90	169	90	245
5	100	235	105	241
Средние значения	94	193,8	100	251,6
Образцы второй группы (с обработкой краев полиэфирной смолой)				
1	110	250	125	276
2	115	249	105	262
3	90	187	115	261
4	100	166	120	265
5	115	196	110	307
Средние значения	106	209,6	115	274,2

Анализ результатов показал, что среднее значение нагружающей силы и предела прочности на образцах первой группы (без обработки краев полиэфирной смолой) после замачивания в дизельном масле меньше, чем у второй группы, края которых обработаны полиэфирной смолой, при двух схемах армирования. На рис. 2 полученные результаты приведены в виде диаграмм.

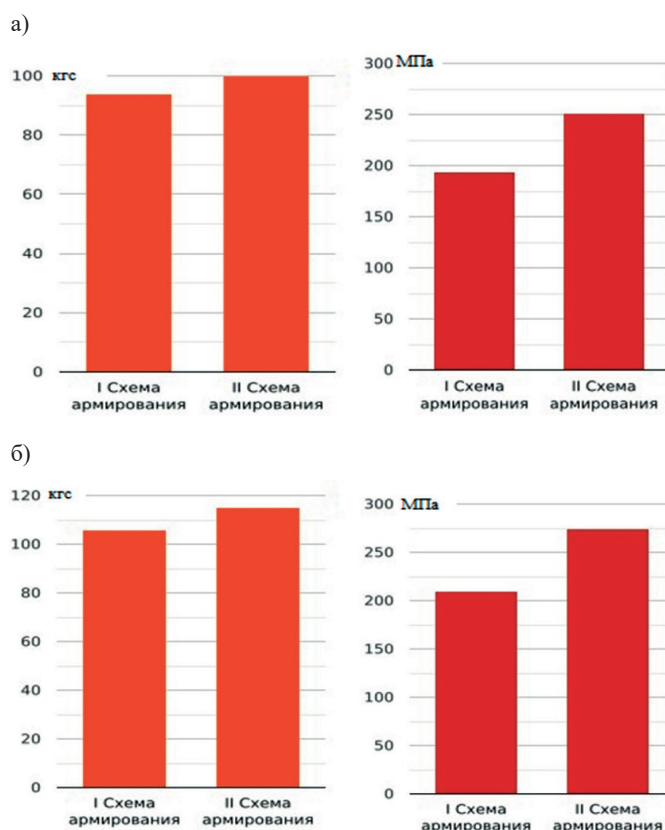


Рис. 2. Средние значения разрушающих сил и пределов прочности при испытании на изгиб:
а — для образцов первой группы; б — для образцов второй группы

Испытания образцов из ПКМ на растяжение. Плоские образцы прямоугольной формой размером 250 × 25 мм (рис. 3) были вырезаны из общей плиты и подготовлены в соответствии с ГОСТом 11261–17² для проведения испытаний на растяжение [8]. Предел прочности при растяжении определяется по известной формуле:

$$\sigma = \frac{F_{\max}}{A}, \quad (1)$$

где $F_{\max}$ — значение растягивающей силы, Н;

$A = bh$ — площадь поперечного сечения образца, мм².

а)



б)



Рис. 3. Образцы двух разных схем армирования для испытания на растяжение:
а — без обработки краев полиэфирной смолой; б — с обработки краев полиэфирной смолой

Полученные результаты испытаний на растяжение сведены в табл. 4.

Таблица 4

Результаты испытаний образцов из ПКМ на растяжение

Номер образца	Схемы армирования			
	I		II	
	$F_{\max}$, кгс	σ , МПа	$F_{\max}$, кгс	σ , МПа
Образцы первой группы (без обработки краев полиэфирной смолой)				
1	1700	108	1700	148
2	1500	100	1700	141
3	1900	125	2100	185,6
4	1950	134	1700	150,2
5	1800	120	2150	185,8
Средние значения	1770	117,4	1870	162,12
Образцы второй группы (с обработкой краев полиэфирной смолой)				
1	1700	111	1800	163
2	2200	138,5	2000	177
3	2100	138,4	2500	215
4	2100	141,6	2200	196
5	2400	171	2200	185
Средние значения	2100	140,1	2140	187,2

Для наглядного сравнения результатов испытаний образцов из ПКМ построены графики (рис. 4), с помощью которых установлено, что среднее значение прикладываемой нагрузки и средний предел прочности у образцов второй группы, края которых обработаны полиэфирной смолой, после замачивания в дизельном масле на порядок больше, чем у образцов первой группы (без обработки краев полиэфирной смолой).

² ГОСТ 11262–2017. Пластмассовый метод испытания на растяжение. М.: Стандартинформ, 2017. 24 с.

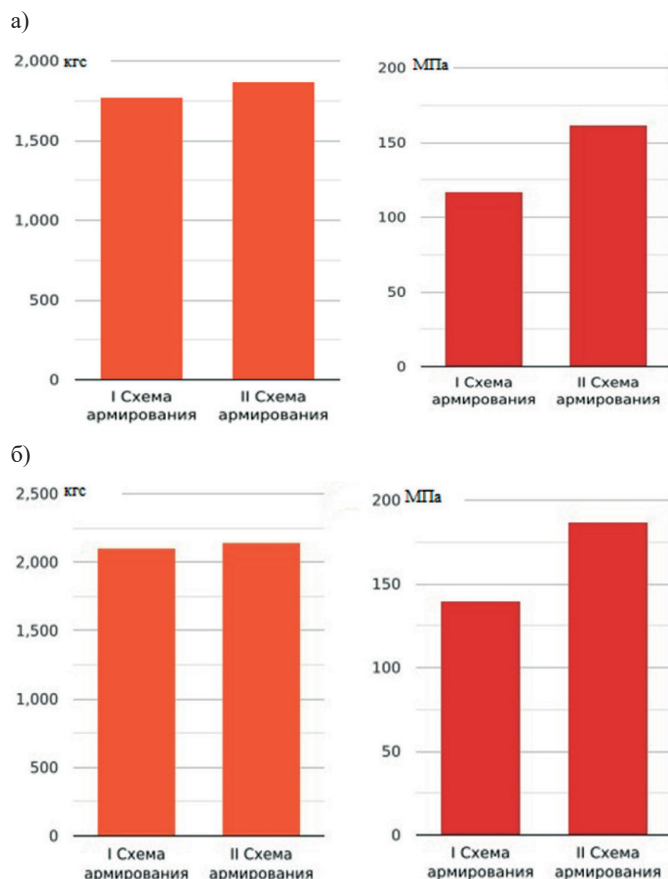


Рис. 4. Средние значения разрушающих нагрузок и пределов прочности:
а — при испытании на растяжение образцов первой группы;
б — при испытании на растяжение образцов второй группы

Испытание образцов из ПКМ на сжатие. Образцы, предназначенные для испытаний на сжатие, должны иметь симметричную форму, согласно требованиям ГОСТа 4651–2014³, с размерами $l \times b \times h$, соответствующими $10 \times 10 \times 4$ мм (рис. 5) [9].

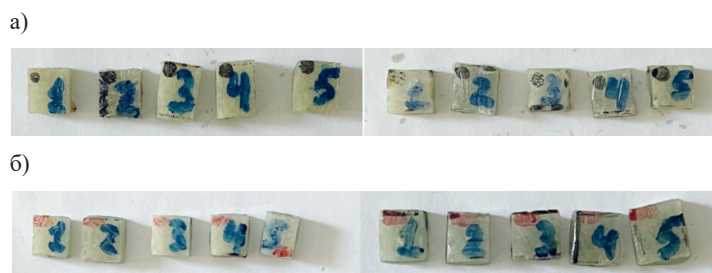


Рис. 5. Образцы двух разных схем армирования при испытании на сжатие:
а — без обработки краев полиэфирной смолой; б — с обработкой краев полиэфирной смолой

Нагружающая и сжимающая сила направляется на образцы вдоль осей, перпендикулярно направлению армирующих слоев и с равномерной скоростью до разрушения или до тех пор, пока нагрузка не понизится. Следует отметить, что значение сжимающей нагрузки на образцы регистрируется в течение всего хода испытания. Образцы из ПКМ устанавливают по центру опорных площадок испытательной машины Р-5. Равномерная скорость прикладываемой нагрузки фиксируется значением 1 мм/мин [10]. Значения пределов прочности при сжатии образцов рассчитываются по формуле (1). Результаты выполненных испытаний представлены в табл. 5.

³ ГОСТ 4651–2014. Пластмассовый. Метод испытания на сжатие. М.: Стандартинформ, 2014. 19 с.

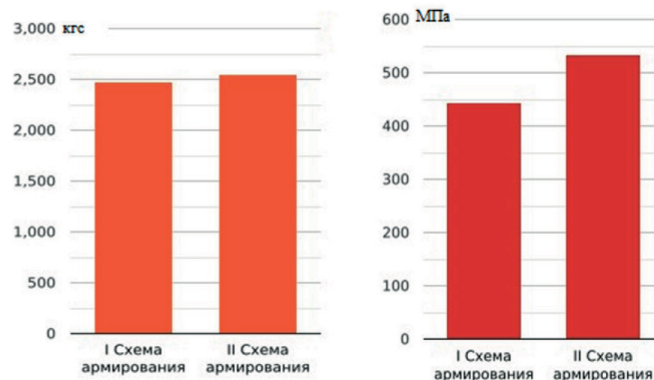
Таблица 5

Результаты испытаний образцов из ПКМ на сжатие

Номер образца	Схема армирования			
	I		II	
	$F_{\max}$, кгс	σ , МПа	$F_{\max}$, кгс	σ , МПа
Образцы первой группы (без обработки краев полиэфирной смолой)				
1	2250	429	2650	519,4
2	2650	519,4	2650	577
3	2500	422,4	2400	490
4	2500	408,3	2550	556,8
5	2500	436	2500	532,6
Средние значения	2480	443	2550	535,2
Образцы второй группы (с обработкой краев полиэфирной смолой)				
1	2300	474,5	2900	661
2	2350	461	2500	544
3	2400	385,6	2100	453
4	2800	450	3000	642
5	2800	499	3600	712
Средние значения	2530	454	2820	602,4

При сравнении результатов испытаний образцов из ПКМ на разрушающую нагрузку при сжатии (рис. 6) установлено, что средние значения прилагаемой нагрузки и предела прочности образцов второй группы (края которых обработаны полиэфирной смолой) выше, чем у образцов первой группы, края которых не обработаны полиэфирной смолой.

а)



б)

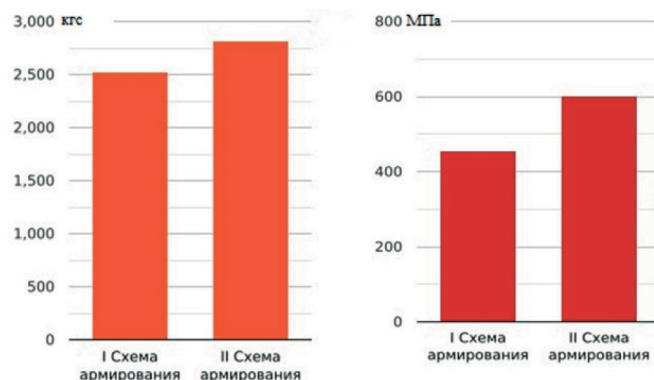


Рис. 6. Средние значения разрушающих нагрузок и пределов прочности:

- а — при испытании на сжатие образцов первой группы;
б — при испытании на сжатие образцов второй группы

Представленные результаты показывают изменения весовых и механических характеристик композиционных материалов при их погружении в емкости с дизельным маслом. Однако судовые цистерны, изготовленные из ПКМ и предназначенные для хранения дизельного масла, имеют односторонний контакт с маслом, поэтому результаты исследования не могут служить основанием для отказа от использования судовых цистерн из ПКМ для хранения дизельного масла.

Заключение (Conclusion)

На основе полученных результатов можно делать следующие выводы:

1. На способность проникновения судового дизельного масла в структуру ПКМ оказывают непосредственное влияние структура и расположение слоев композиционного материала, а также его размеры. Судовое дизельное масло имеет проникающую способность особенно для образцов с большими размерами при расположении слоя стекломата снаружи (схема I) независимо от наличия или отсутствия обработки краев смолой.

2. Проникновение судового дизельного масла в структуру ПКМ оказывает отрицательное влияние на их механические характеристики, снижая значений пределов прочности при растяжении, сжатии и изгибе, при этом данное снижение является менее заметным при расположении слоев ровинговой стеклоткани снаружи.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Правила классификации и постройки морских судов. Ч. XVI : Конструкция и прочность корпусов судов из полимерных композиционных материалов / Российский морской регистр судоходства — СПб.: Российский морской регистр судоходства, 2019. — 151 с.

2. Мелешин М. А. Опыт применения композитных материалов в судостроении / М. А. Мелешин, А. Саламех, М. Алсаид // Вестник Астраханского государственного технического университета. Серия: Морская техника и технология. — 2022. — № 2. — С. 44–50. DOI: 10.24143/2073-1574-2022-2-44-50. — EDN UXSRVLV.

3. Мелешин М. А. Технология изготовления образцов из полимерных композиционных материалов / М. А. Мелешин, Али Саламех, В. А. Мамонтов // Вестник Астраханского государственного технического университета. Серия: Морская техника и технология. — 2023. — № 3. — С. 19–26. DOI: 10.24143/2073-1574-2023-3-19-26. — EDN WRETKT.

4. Алсаид Мазен Методика изготовления образцов из многослойных композиционных материалов для исследования их механических свойств / Алсаид Мазен, Саламех Али // Вестник Астраханского государственного технического университета. Серия: Морская техника и технология. — 2018. — № 4. — С. 16–23. DOI: 10.24143/2073-1574-2018-4-16-23. — EDN VLJIYQ.

5. Саламех Али Исследование влияния типа связывающего компонента на механические характеристики полимерных композиционных материалов / Саламех Али, Алсаид Мазен // Морские интеллектуальные технологии. — 2022. — Т. 1. — № 1(55). — С. 52–62. DOI: 10.37220/MIT.2022.55.1.007. — EDN FTMVRN.

6. Алсаид М. Исследование судостроительного полимерного композиционного материала на прочность / М. Алсаид, А. Саламех, В. А. Мамонтов // Вестник государственного университета морского и речного флота им. адмирала С. О. Макарова. — 2019. — Т. 11. — № 3. — С. 543–553. DOI: 10.21821/2309-5180-2019-11-3-543-553. — EDN FXZOMU.

7. Алсаид М. Сравнительный анализ результатов механических испытаний многослойного полимерного композитного материала / М. Алсаид, А. Саламех, В. А. Мамонтов, Г. У. Азизова // Научные проблемы водного транспорта. — 2020. — № 63. — С. 27–39. DOI: 10.37890/jwt.vi63.73. — EDN UATRXXW.

8. Мазен А. Исследование прочностных характеристик полимерных композиционных материалов при растяжении / А. Мазен, А. Саламех // Морские интеллектуальные технологии. — 2019. — № 3–3(45). — С. 18–27. — EDN WQWDXJ.

9. Мелешин М. А. Исследование влияния жидкой среды на механические характеристики полимерных композиционных материалов / М. А. Мелешин, А. Саламех, В. А. Мамонтов [и др.] // Вестник астраханского государственного технического университета. Серия: морская техника и технология. — 2024. — № 4. — С. 7–17. DOI: 10.24143/2073-1574-2024-4-7-17. — EDN SPBSNC.

10. Алсаид Мазен Методика изготовления образцов из многослойных композиционных материалов для исследования их механических свойств / Алсаид Мазен, Саламех Али // Вестник Астраханского госу-

дарственного технического университета. Серия: Морская техника и технология. — 2018. — № 4. — С. 16–23.
DOI: 10.24143/2073-1574-2018-4-16-23. — EDN VLJIYQ.

REFERENCES

1. *Pravila klassifikatsii i postroyki morskikh sudov Chast' XVI. Konstruktsiya i prochnost' korpusov sudov iz polimernykh kompozitsionnykh materialov*. Sankt-Peterburg: Rossiyskiy morskoy registr sudokhodstva, 2019: 151.
2. Meleshin, M. A., A. Salamekh and M. Alsaid. "Experience in application of composite materials in ship-building." *Vestnik Of Astrakhan State Technical University. Series: Marine Engineering And Technologies* 2 (2022): 44–50. DOI: 10.24143/2073-1574-2022-2-44-50.
3. Meleshin, M. A., Ali Salamekh and V. A. Mamontov. "Technology of manufacturing samples from polymer composite materials." *Vestnik Of Astrakhan State Technical University. Series: Marine Engineering And Technologies* 3 (2023): 19–26. DOI: 10.24143/2073-1574-2023-3-19-26.
4. Alsaid Mazen and Salameh Ali "Method of sample manufacturing from multilayer composite materials for studying their mechanical properties." *Vestnik Of Astrakhan State Technical University. Series: Marine Engineering And Technologies* 4 (2018): 16–23. DOI: 10.24143/2073-1574-2018-4-16-23.
5. Salameh Ali and Alsaid Mazen "Investigation of the binding component type effect on the mechanical characteristics of polymer composite materials." *Morskije intelektual'nye tekhnologii* 1.1(55) (2022): 52–62. DOI: 10.37220/MIT.2022.55.1.007.
6. Alsaid, M., A. Salamekh and V. A. Mamontov. "A study of shipbuilding polymer composite material for strength." *Vestnik gosudarstvennogo universiteta morskogo i rechnogo flota im. admiral S. O. Makarova* 11.3 (2019): 543–553. DOI: 10.21821/2309-5180-2019-11-3-543-553.
7. Alsaid, M., A. Salamekh, V. A. Mamontov and G. U. Azizova. "The results of multi-layered polymer composite material mechanical testing comparative analysis." *Russian Journal Of Water Transport* 63 (2020): 27–39. DOI: 10.37890/jwt.vi63.73.
8. Mazen, A. and A. Salamekh. "The study of the strength characteristics of polymer composite materials under tension." *Morskije intelektual'nye tekhnologii* 3–3(45) (2019): 18–27.
9. Meleshin, M. A., K. N. Sakhno, et al. "Investigation of the influence of a liquid medium on the mechanical characteristics of polymer composite materials." *Vestnik Of Astrakhan State Technical University. Series: Marine Engineering And Technologies* 4 (2024): 7–17. DOI: 10.24143/2073-1574-2024-4-7-17.
10. Mazen, A. and A. Salamekh. "Method of sample manufacturing from multilayer composite materials for studying their mechanical properties ." *Vestnik Of Astrakhan State Technical University. Series: Marine Engineering And Technologies* 4 (2018): 16–23. DOI: 10.24143/2073-1574-2018-4-16-23.

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

Мелешин Максим Алексеевич — аспирант
ФГБОУ ВО «Волжский государственный
университет водного транспорта»
603950, Российская Федерация,
г. Нижний Новгород, ул. Нестерова, 5
e-mail: meleshin.maxim@yandex.ru
Саламех Али —
кандидат технических наук, профессор
Каспийский институт морского и речного
транспорта им. ген.-адм. Ф. М. Апраксина —
филиал ФГБОУ ВО «ВГУВТ»
414000, Российская Федерация,
г. Астрахань, ул. Никольская, строение 6.
e-mail: a.salameh@mail.ru
Мамонтов Виктор Андреевич —
доктор технических наук, профессор
ФГБОУ ВО «Астраханский государственный
технический университет»
414056, Российская Федерация, г. Астрахань,
ул. Татищева, стр. 16/1

INFORMATION ABOUT THE AUTHOR

Meleshin, Maksim A. — postgraduate student
Volga State University
of Water Transport
5 Nesterova St., Nizhny Novgorod, 603950
Russian Federation
e-mail: meleshin.maxim@yandex.ru
Salamekh, Ali —
Candidate of Sciences in Engineering, Professor
Caspian Institute of Sea
and River Transport,
branch (VSUWT)
6, Nikolskayast, Astrakhan, 414000
Russian Federation
e-mail: a.salameh@mail.ru
Mamontov, Victor A. —
Dr. of Sciences in Engineering, Professor
Astrakhan State Technical University
16 Tatischev St.,
Astrakhan, 414056
Russian Federation

Статья поступила в редакцию 28 января 2025 г.
Received: Jan. 28, 2025.

АВТОМАТИЗАЦИЯ И УПРАВЛЕНИЕ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИМИ ПРОЦЕССАМИ И ПРОИЗВОДСТВАМИ

DOI: 10.21821/2309-5180-2025-17-2-282-290

EDN XPGEVH

DISTRIBUTED-LAG APPROACH IN MATHEMATICAL MODELS FOR TRANSPORT RISK MANAGEMENT

M. Yu. Yastrebov, I. V. Laneva, A. A. Rydanov

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

The purpose of this work is to develop information digital technologies in terms of modeling methods and formalized descriptions of technological process control that are associated with increasing the reliability of water transport systems by reducing the likelihood of transport risks occurring. As part of this goal, the problem of developing mathematical methods for accounting for the partial delay of the protective effect in risk management models is being addressed. This is done in the context of growing requirements for the safe digitalization of water transport, given a wide range of risk factors of both engineering-material and informational nature. A theoretical-probabilistic approach to optimizing costs for reducing risks, considering both these costs and possible losses from risk realization, has recently been developed in industry research on water transport. However, the models considered have not accounted for the possible and sometimes inevitable delay in the effect, as costs for anti-risk measures are not fully realized immediately. This situation is analogous to distributed-lag analysis of incomplete construction, which was developed under planned economy conditions. The results of this work include new optimization mathematical models that account for the possible delay in the effect of additional costs, thereby reducing overall risk damage.

Keywords: distributed lags, transport risks, optimizing, math modeling, graphs, critical path, mathematical programming.

For citation:

Yastrebov, Mikhail Y., I. V. Laneva and A. A. Rydanov “Risk management in software development in the field of information protection.” *Vestnik Gosudarstvennogo universiteta morskogo i rechnogo flota imeni admirala S. O. Makarova* 17.2 (2025): 282–290. DOI: 10.21821/2309-5180-2025-17-2-282-290.

УДК 004.6:656.6

РАСПРЕДЕЛЕННО-ЛАГОВЫЙ ПОДХОД В МАТЕМАТИЧЕСКИХ МОДЕЛЯХ УПРАВЛЕНИЯ ТРАНСПОРТНЫМИ РИСКАМИ

М. Ю. Ястребов, И. В. Ланева, А. А. Рыданов

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

Целью настоящей работы является исследование методов моделирования и формализованного описания управления технологическими процессами, связанными с повышением надежности функционирования систем водного транспорта посредством снижения вероятности реализации транспортных рисков. В рамках поставленной цели решена задача разработки математических методов учета частичного запаздывания защитного эффекта в моделях управления рисками в условиях усиления требований к безопасной цифровизации водного транспорта при наличии широкого спектра риск-факторов как инженерно-материального, так и информационного характера. Теоретико-вероятностный подход к оптимизации затрат на снижение рисков в аспекте совместного рассмотрения этих затрат и возможных потерь от реализации рисков получил в настоящее время развитие в отраслевых исследованиях на во-

дном транспорте. Отмечается, что вне рамок рассматриваемых моделей остается возможное и подчас неизбежное запаздывание эффекта, поскольку затраты на антирисковые мероприятия не реализуются мгновенно в полной мере (по аналогии с распределенно-лаговым анализом незавершенного строительства, получившим развитие в условиях плановой экономики в XX в.). Показано, как процедуры снижения рисковых потерь, формально определяемых как средние значения ожидаемых суммарных (рисковых и управленческих) потерь, могут быть дополнены как в моделях управления рисками на графах, так и в моделях математического программирования методами распределенно-лаговых моделей, что позволяет повысить их адекватность. Результатом проведенного исследования является разработка оптимизационных математических моделей, учитывающих возможное запаздывание эффекта от дополнительных затрат, снижающих в целом рисковый ущерб.

Ключевые слова: распределенные лаги, транспортные риски, оптимизация, математическое моделирование, графы, критический путь, математическое программирование.

Для цитирования:

Ястребов М. Ю. Распределенно-лаговый подход в математических моделях управления транспортными рисками / М. Ю. Ястребов, И. В. Ланева, А. А. Рыданов // Вестник Государственного университета морского и речного флота имени адмирала С. О. Макарова. — 2025. — Т. 17. — № 2. — С. 282–290. DOI: 10.21821/2309-5180-2025-17-2-282-290. — EDN XPGEVN.

Введение (Introduction)

Снижение транспортных рисков в контексте положений действующего национального стандарта¹ предполагает расширение спектра используемых математических методов и математических моделей. Исходной концепцией соответствующих отраслевых исследований 2010–2020-е гг. [1]–[12] является теоретико-вероятностный подход к оценке рисковых потерь [1], рассматриваемых как случайные величины, когда объектом математического моделирования и оптимизации становятся их соответствующим образом дезагрегированные математические ожидания. В предлагаемом исследовании рассмотрены две изложенные в отраслевой научной литературе концепции [3] в аспекте их дополнения с учетом распределенных лагов:

- активный подход, предполагающий сопоставление динамики ожидаемых рисковых потерь и вариантов затрат на их вероятное снижение;
- аналитический подход, использующий модели, основанные на представлении ситуаций (возможно каскадного цепного) осуществления возможных рисков ориентированными графами.

Использование распределенных лагов в экономическом анализе [13] осуществляется на основе представления временного ряда значений каким-либо образом формулируемого эффекта Y_t в виде линейной корреляционной зависимости и ряда нескольких предшествующих значений показателя денежных вложений X_t : $Y_t = \sum_{i=0}^n \lambda_i X_{t-i} + \epsilon_t$ с нулевой в среднем ошибкой ϵ_t . Предметом исследований являлись методы оценки коэффициентов λ_i , соответствующих лагам i , что давало возможность получения достаточного объема статистических данных.

Применительно к транспортным рискам статистическая база для оценки коэффициентов регрессии не всегда имеет объем, достаточный для использования корреляционно-регрессионных моделей, с чем связано использование экспертных оценок. Так, в [7] экспертные оценки служат базой для построения математической модели определения области стабильности транспортной системы, что отчасти сопряжено с концепцией нечеткого регулирования [11]. При этом предметом исследования в оптимизационном аспекте является разработка моделей, формулируемых как задачи математического программирования, допускающие точные либо (что чаще в реальных ситуациях) эвристические алгоритмы решения. Таким образом, распределенные лаги становятся дополнительными параметрами математической модели, ориентированной на учет рисков.

В [3] применительно к рискам при разработке большого программного кода построены «активные» модели в дискретной и континуальной постановках, основанные на концепции «возможности

¹ ГОСТ Р ИСО 31000–2019. Менеджмент риска. Принципы и руководство. М.: Стандартинформ, 2020. 14 с.

уменьшения риск-факторов за счет дополнительных «упреждающих», или «профилактических» затрат, что может оказаться выгодным, если итоговые вероятные затраты на выполнение проекта уменьшатся». В данном случае представляется противоречивой цель управления рисками, сформулированная в [12], когда одновременно при «оптимальной стратегии управления рисковыми событиями сводятся к минимуму затраты на профилактический ремонт, а также величина причиненного ущерба в результате возникновения соответствующего события». Из данного контекста следует, что минимизация затрат и ущерба может осуществляться независимо, при этом минимизироваться должна сумма вероятного ущерба и стоимости упреждающих мероприятий.

Аналогичный подход применительно к уменьшению вероятности появления русловых затопов «за счет выполнения упреждающих инженерно-технических мероприятий» описан в публикации [10]. Дополнительный учет фактора запаздывания, реализованный в виде распределенных лагов для понижающего риски эффекта, представляется естественным направлением развития указанной концепции. Кроме того, указанная математическая модель изначально аналитическая может быть дополнена, в том числе независимо от привлечения распределенных лагов, оптимизационными аспектами в русле математического программирования.

Основанный на представлении последовательного осуществления рисков орграфами со взвешенными дугами, выражающими вероятные рисковые потери, в публикациях [4] и [5] построен и проанализирован алгоритм поиска критического пути. При этом возможен также оптимизирующий подход, основанный на активном подходе и учете запаздываний. В частности, речь может идти об уменьшении веса критического пути либо уменьшении введенной интегральной оценки среднего по всему графу ущерба.

Методы и материалы (Methods and Materials)

Распределенно-лаговый подход в аналитической модели активного управления. Рассмотрим в качестве исходной аналитическую модель, представленную в [3], сохраняя в основном ее обозначения, но не относя рисковые факторы по отдельности к функционально однородным элементам системы (в публикации [3] этому соответствует двойная индексация). Ожидаемый эффект (возможное снижение прогнозного ущерба) от дополнительных затрат при активном управлении E выражается через соответствующим образом дезагрегированные прогнозные рисковые потери при нулевых затратах (инерционная составляющая) z_n , ожидаемые потери при активном управлении z_a и дополнительные затраты 3_a :

$$E = z_n - z_a - 3_a, \quad (1)$$

что является оправданным при выполнении условия $E > 0$.

Параметрами расчета величины z_n являются: p_i — вероятность осуществления риск-фактора R_i ($i = 1, \dots, n$), z_i — соответствующие рисковые потери (ущерб). Тогда

$$z_n = \sum_{i=1}^n p_i z_i. \quad (2)$$

При активном подходе в модель дополнительно включаются предполагаемые уменьшения вероятностей Δp_i , после чего можно записать следующее:

$$z_a = \sum_{i=1}^n p_i (1 - \Delta p_i) z_i; \quad (3)$$

$$3_a = \sum_{i=1}^n u_i, \quad (4)$$

где u_i — затраты на уменьшение соответствующих вероятностей.

Заметим, что в критерии (1) слагаемое z_n является константой, что дает возможность при оптимизационном подходе вместо максимизации критерия E перейти к минимизации критерия $E_0 = z_a + 3_a$ с дополнительным ограничением $E_0 > z_n$.

Включение распределенных лагов в модель (1)–(4) может в зависимости от содержательного описания риск-факторов и экспертных оценок выполняться несколькими рассмотренными далее

способами. Будем исходить из временного горизонта учета рисков $[0, T]$. Например, разработка большого программного кода для реализации информационных потоков, сопровождающих транспортные процессы (как в [5]) T , определяется длительностью полной реализации проекта либо его существенного этапа, в случае внутреннего судоходства — периодом навигации либо иным базовым периодом календарного планирования и т. п. Рассмотрим три способа включения запаздываний в математическое моделирование активного подхода.

1-й способ. Если для риск-фактора R_i имеются основания (экспертное заключение) считать, что при горизонте T эффект от дополнительных затрат u_i , осуществляемых в начальный момент промежутка, с вероятностью q_i реализуется с фиксированным запаздыванием t_i , то для соответствующих потерь, которые в этом случае возрастают, уменьшая E , следует ввести повышающий коэффициент K_i , на который умножается исходное значение z_i в выражении (3). Представляется обоснованным принять

$$K_i = 1 + q_i t_i / T, \quad (5)$$

в соответствии с условием $K_i = 1$ при $q_i = 0$ и $t_i = 0$, а также с линейной зависимостью K как от q_i , так и от t_i . Тогда

$$z_a = \sum_{i=1}^n p_i (1 - \Delta p_i) K_i \Delta z_i. \quad (6)$$

2-й способ. Если для риск-фактора R_i к рассмотрению с вероятностями $(q_{i1}, q_{i2}, \dots, q_{ik_i})$, $\sum_{l=1}^{k_i} q_{il} \leq 1$ привлекаются несколько альтернативных значений одного запаздывания $0 < t_{i1} < t_{i2} < \dots < t_{ik_i} < T$, то для соответствующего повышающего коэффициента полагаем

$$K_i = 1 + \left(\sum_{l=1}^{k_i} q_{il} t_{il} \right) / T. \quad (7)$$

Здесь также при отсутствии лагов $K_i = 1$ и выражение в скобках задает математическое ожидание запаздывания, если считать, что вероятность $1 - \sum_{l=1}^{k_i} q_{il}$ соответствует нулевому запаздыванию. При значениях (7) повышающих коэффициентов для z_a сохраняется формула (6).

3-й способ. Если по аналогии с анализом незавершенного строительства распределенное запаздывание для риск-фактора R_i формализуется в виде набора лагов: $t_{i1}, t_{i2}, \dots, t_{ik_i}$, $0 < t_{i1} < t_{i2} < \dots < t_{ik_i} < T$, которым соответствуют доли $\lambda_{i1}, \lambda_{i2}, \dots, \lambda_{ik_i}$ от полного эффекта Δp_i , имеющего место при нулевом запаздывании, где $\lambda_{i1} + \lambda_{i2} + \dots + \lambda_{ik_i} = 1$, $t_{i1} < t_{i2} < \dots < t_{ik_i} < T$, то повышающий коэффициент

$$K_i = 1 + \lambda_{i1} \frac{t_{i1}}{T} + \lambda_{i2} \frac{t_{i2}}{T - t_{i1}} + \dots + \lambda_{ik_i} \frac{t_{ik_i}}{T - t_{i1} - t_{i2} - \dots - t_{ik_{i-1}}}. \quad (8)$$

Здесь также при отсутствии запаздываний $K_i = 1$ и имеет место линейная зависимость K_i от λ_{il} .

Следует отметить, что возможна ситуация, когда для одной части риск-факторов применяется формула (5), для другой — (7), для третьей — (8). При этом полное значение z_a получается сложением соответствующих частей.

Включение лагов в оптимизационную модель. Рассмотрим возможный подход к учету запаздываний в оптимизационной модели. Согласно концепции [3] и [8], будем исходить из задачи математического программирования, связанной с минимизацией критерия E_0 :

$$E_0 = z_a + 3_a \rightarrow \min; \quad (9)$$

$$E_0 < z_n. \quad (10)$$

В наиболее общей постановке для каждого риск-фактора R_i выделена совокупность представляющих его субфакторов r_{ij} ($1 \leq j \leq m_i$), которые имеют количественное выражение. С ними связаны значения вероятностей пассивного прогноза их реализации $p_{i1}, \dots, p_{im_i}$ (в наиболее простом

варианте и, по-видимому, наиболее частом, $m_i = 1$, при этом второй индекс можно опустить) и соответствующие прогнозные рисковые потери z_{ij} . Управляемые переменные задачи, к которым относятся уменьшения δ_{ij} вероятностей p_{ij} , с одной стороны, уменьшают z_a , а с другой — увеличивают z_a , чем обусловлена нетривиальность задачи оптимизации. На δ_{ij} накладываются следующие ограничения:

$$0 \leq \delta_{ij} \leq \alpha_{ij}. \quad (11)$$

Далее в модели (задаче) (9)–(11) должны быть детализированы функциональные зависимости δ_{ij} от затрат u_{ij} на их обеспечение:

$$\delta_{ij} = f_{ij}(u_{ij}). \quad (12)$$

От выбора вида этих функций зависит спецификация задачи (9)–(11). Функции могут задаваться экспертным путем либо при наличии достаточного статистического материала средствами корреляционно-регрессионного анализа. Так, в [9] привлекаются линейные функции:

$$\delta_{ij} = a_{ij}u_{ij} + b_{ij},$$

в [8] — квадратичные:

$$\delta_{ij} = a_{ij}u_{ij}^2 + b_{ij}u_{ij} + c_{ij}.$$

Относительно параметров функций следует уточнить, что в первом случае необходимо соблюдение условий: $a_{ij} > 0$, $b_{ij} = 0$, поскольку δ_{ij} растет с увеличением u_{ij} , а нулевому значению u_{ij} отвечает $\delta_{ij} = 0$. Аналогично во втором случае $a_{ij} > 0$, $b_{ij} = 0$, $c_{ij} = 0$.

Таким образом,

$$\delta_{ij} = a_{ij}u_{ij} \quad (13)$$

либо

$$\delta_{ij} = a_{ij}u_{ij}^2. \quad (14)$$

Разумеется, для разных риск-факторов могут привлекаться зависимости разных видов: (13) либо (14).

В ситуации единственного для каждой пары i, j фиксированного запаздывания t_{ij} , имеющей вероятность q_{ij} (при отсутствии запаздывания $t_{ij} = 0$, $q_{ij} = 1$), составляющая z_a критерия E_0 в (9) записывается в виде

$$z_a = \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^{m_i} p_{ij} (1 - \delta_{ij}) K_{ij} z_{ij},$$

где, как и в выражении (3), повышающий коэффициент в отдельном слагаемом задается формулой (5).

Аналогичным образом видоизменяется выражение для z_a при рассмотрении единственного лага как дискретной случайной величины, когда применяется формула (7), и при распределенных лагах, когда применяется формула (8).

Инверсия управляемых переменных и параметров оптимизации. Зависимости (13) и (14) в силу строгой монотонности допускают взаимно однозначное обращение: $\delta_{ij} = a_{ij}^{-1}u_{ij}$ и, соответственно, $\delta_{ij} = \sqrt{a_{ij}^{-1}u_{ij}}$ (при этом во втором случае меняется направление выпуклости функции). В общей записи $u_{ij} = f_{ij}^{-1}(\delta_{ij})$, что позволяет при анализе активной рисковей модели сформулировать еще один вариант задачи математического программирования: рассмотрение фиксированных значений δ_{ij} . Тогда и z_{ij} будут функционально зависящими от δ_{ij} как заданные, но варьируемые при анализе параметры, а u_{ij} — как управляемые переменные. Введя ограничение U на общую сумму затрат, получим:

$$z_a = \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^{m_i} u_{ij} \leq U; \quad (15)$$

$$u_{ij} \geq 0. \quad (16)$$

Теперь альтернативная оптимизационная задача записывается по-прежнему в виде (9), (10), но уже с дополнительными ограничениями (15), (16) и с фиксированным значением активных

потерь — в данном случае для отыскания оптимальной структуры затрат на активное управление. Учет распределенных запаздываний для z_a в виде повышающих коэффициентов сохраняется в (6) прежнем виде: (5) и / или (7) и / или (8).

Распределенные лаги в графовой модели транспортных рисков. Рассмотрим теперь в аспекте распределенных лагов предложенную в [4] и [5] математическую модель анализа транспортных рисков на ориентированных графах. В данном подходе рисковые ситуации разбиваются на цепочки, в которых каждая с определенной вероятностью влечет за собой некоторые другие. Соответствующий каскад рисков представляется ациклическим оргграфом G с множеством вершин $V = \{1, \dots, n\}$ и дуг $E = \{i \rightarrow j\}$. Далее с каждой дугой $i \rightarrow j$ соотносится величина ущерба z_{ij} и вероятность p_{ij} его реализации, после чего каждой дуге приписывается ее взвешенный по вероятности вес $p_{ij}z_{ij}$, полному пути π как связной последовательности дуг — его вес $z(\pi) = \sum_{(i,j) \in \pi} p_{ij}z_{ij} \rightarrow \max$ и решается задача отыскания критического пути $\pi_{кр}$ по критерию $z(\pi_{кр}) = \max_{\pi \in G} z(\pi)$. Рассмотренный подход может развиваться в следующих направлениях.

1. Информативным при сравнении рисков спектров разных транспортных систем представляется показатель среднего рискового веса оргграфа $Z = \frac{1}{N} \sum_{\pi \in G} z_{\pi}$, где N — общее количество полных путей. Оргграф Z следует рассматривать в качестве усредненной интегральной характеристики подверженности транспортной системы рисковому ущербу.

2. Для активного управления возможна также при минимаксном подходе постановка задачи минимизации веса критического пути $\pi_{кр}$ на основе зависимостей $\delta_{ij} = f_{ij}(\Delta u_{ij})$ изменений рисковых вероятностей от соответствующих затрат u_{ij} (после этого он, возможно, перестанет быть критическим):

$$z_a = \sum_{i \rightarrow j \in \pi_{кр}} p_{ij}(1 - \delta_{ij})z_{ij}; \quad (17)$$

$$Z_a = \sum_{i \rightarrow j \in \pi_{кр}} f_{ij}(\delta_{ij}); \quad (18)$$

$$0 \leq \delta_{ij} \leq \alpha_{ij}; \quad (19)$$

$$E_{кр} = z_a + Z_a \rightarrow \min. \quad (20)$$

Здесь, как и в инверсном варианте, использующем обратные зависимости $u_{ij} = f_{ij}^{-1}(\Delta p_{ij})$, при дополнительном учете распределенных лагов последние участвуют в математических моделях в форме (6).

3. Активное управление может быть направлено в прямом или инверсном варианте на минимизацию целевой функции Z :

$$Z = \sum_{\substack{\pi \in G \\ i \rightarrow j \in \pi}} p_{ij}(1 - \delta_{ij})z_{ij} \rightarrow \min.$$

Таким образом, использование лаговых моделей в проблеме активного управления приводит к эффективно решаемым задачам математического программирования, позволяя учесть запаздывание результата от проводимых мероприятий по снижению рисков.

Результаты исследования (Results and Discussion)

В рамках общей концепции развития информационных цифровых технологий управления системами водного транспорта в контуре АСУТП, АСУП, АСТПП и т. п. направлением дальнейшего развития математических моделей, ориентированных на снижение транспортных рисков, может служить концепция активного управления «дополнительные затраты — снижение вероятностей рисков» транспортными рисками, дополненная математическими моделями минимизации рискового ущерба, в том числе учитывающими запаздывание эффекта от управляющих воздействий. Последние сформулированы в виде задач математического программирования. В русле этого подхода

предложена методика включения распределенных лагов в такие модели, что достигается с учетом прогнозных потерь как способа формализации снижения эффекта от дополнительных затрат при наличии запаздываний.

Описан необходимый вид параметров функциональных зависимостей вероятности – затраты при линейной и квадратичной оптимизации. Сформулирован инверсный подход к оптимизации управления, отражающий двойственность управляемых переменных и ограничений, такой как снижение рисков вероятностей и необходимых затрат. Для обоих случаев сформулированы задачи математического программирования, включающие распределенные лаги.

В развитие концепции использования ориентированных графов для анализа потерь от каскадов рисков ситуаций и в рамках стратегии минимакса построены математические модели минимизации потерь на критическом пути средствами активного управления.

Предложен показатель среднего веса орграфа рисков для сравнения рисков спектров разных транспортных систем, получена соответствующая формула.

Таким образом, расширение спектра математических моделей дает дополнительный инструментальный анализ и минимизации рисков потерь в рамках вероятностного подхода.

Выводы (Summary)

В результате проведенного исследования можно сделать следующие выводы:

1. Концепция активного подхода к снижению транспортных рисков является стимулом для разработки и перспективным способом приложения новых математических моделей. Сформулированная первоначально как аналитическая, она дополнена методами оптимизации, в том числе с учетом запаздываний эффекта управляющих воздействий. Привлечение теории графов позволяет в развитие предложенных методов анализа в терминах критического пути реализовать также оптимизационный подход, в том числе с использованием лагов.
2. Предложенные модели допускают двойственное использование, когда параметры и ограничения задачи математического программирования выступают в качестве управляющих переменных: вероятностей и их отрицательных приращений.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Каретников В. В. К вопросу оценки рисков на внутреннем водном транспорте Российской Федерации / В. В. Каретников, К. И. Ефимов, А. А. Сикарев // Вестник Астраханского государственного технического университета. Серия: Морская техника и технология. — 2017. — Т. — № 2. — С. 22–27.
2. Каретников В. В. К вопросу оценки рисков использования безэкипажных средств водного транспорта на участке акватории / В. В. Каретников, С. В. Козик, А. А. Буцанец // Вестник государственного университета морского и речного флота им. адмирала С. О. Макарова. — 2019. — Т. 11. — № 6. — С. 987–1002. DOI: 10.21821/2309-5180-2019-11-6-987-1002. — EDN ACCRDQ.
3. Ястребов И. М. Управление рисками при разработке программного обеспечения в области защиты информации / И. М. Ястребов // Вестник государственного университета морского и речного флота им. адмирала С. О. Макарова. — 2023. — Т. 15. — № 6. — С. 1105–1114. DOI: 10.21821/2309-5180-2023-15-6-1105-1114. — EDN ULIUUE.
4. Нырков А. П. Графовые модели управления рисками / А. П. Нырков, А. А. Нырков // Информационные управляющие системы и технологии: Материалы V Международной научно-практической конференции (ИУСТ-ОДЕССА-2016), Одесса, 20–22 сентября 2016 года. — Одесса: Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования Государственный университет морского и речного флота им. адмирала С. О. Макарова, 2016. — С. 100–102. — EDN XBLQML.
5. Нырков А. П. Модели, алгоритмы и программное обеспечение минимизации рисков мультимодальных перевозок / А. П. Нырков, А. А. Нырков // Вестник государственного университета морского и речного флота им. адмирала С. О. Макарова. — 2013. — № 1(20). — С. 67–73. — EDN RGPDXF.
6. Mamunts D. Models and Algorithms for Estimation and Minimization of the Risks Associated with Dredging / D. Mamunts, S. Sokolov, A. Nyrkov, S. Chernyi, M. Bukhurmetov, V. Kuznetsov // Transport and Telecommunication Journal. — 2017. — Vol. 18. — Is. 2. — Pp. 139–145. DOI: 10.1515/ttj-2017-0013.

7. Ястребов М. Ю. Определение области стабильности технической системы в терминах нечетких множеств / М. Ю. Ястребов, П. В. Комиссаров, С. В. Колесниченко // Вестник государственного университета морского и речного флота имени адмирала С. О. Макарова. — 2023. — Т. 15. — № 4. — С. 692–700. DOI: 10.21821/2309-5180-2023-15-4-692-700. — EDN ELADLE.

8. Ястребов М. Ю. Математическое моделирование в задаче управления транспортными рисками / М. Ю. Ястребов // Цифровая трансформация транспорта: проблемы и перспективы: материалы IV Международной научно-практической конференции, Москва, 25 сентября 2024 года. — М.: Российский университет транспорта, 2024. — С. 272–276. — EDN CYVVTТ.

9. Ястребов М. Ю. К проблеме математического моделирования в задаче управления рисками для систем водного транспорта / М. Ю. Ястребов // Цифровая трансформация транспорта: проблемы и перспективы: материалы III Международной научно-практической конференции, Москва, 27 сентября 2023 года. — М.: Российский университет транспорта, 2023. — С. 212–217. — EDN BVLIOW.

10. Ткаченко Ю. А. О подходе к решению задачи снижения вероятности возникновения затопов на участке реки / Ю. А. Ткаченко, П. Н. Ткаченко, Е. В. Иванов // Проблемы анализа риска. — 2024. — Т. 21. — № 1. — С. 56–64. — EDN VASAHР.

11. Агеев С. А. Адаптивный метод оценки характеристик трафика в высокоскоростных мультисервисных сетях связи на основе процедуры нечеткого регулирования / С. А. Агеев, А. А. Привалов, В. В. Каретников, А. А. Буцанец // Автоматика и телемеханика. — 2021. — № 7. — С. 133–146. DOI: 10.31857/S0005231021070072. — EDN BLOIBR.

12. Калашников П. В. Математическая модель управления рисками, возникающими при функционировании сложных технических систем ответственного назначения, в условиях неопределенности информации о значениях параметров и фазовом состоянии / П. В. Калашников // International Journal of Advanced Studies. — 2022. — Т. 12. — № 3. — С. 22–39. DOI: 10.12731/2227-930X-2022-12-3-22-39. — EDN QZGLRA.

13. Верескун В. Д. Методы управления рисками и надежностью в транспортно-логистических цепях поставок / В. Д. Верескун, А. Н. Гуда, Э. А. Мамаев // Вестник Ростовского государственного университета путей сообщения. — 2024. — № 4(96). — С. 153–160. DOI: 10.46973/0201-727X_2024_4_153. — EDN WKIZHY.

14. Седелев Б. В. Оценка распределенных лагов в экономических процессах. / Б. В. Седелев — М.: Экономика, 1977. — 191 с.

REFERENCES

1. Karetnikov, V. V., K. I. Efimov and A. A. Sikarev. “To the question of risk assessment on domestic water transport of the russian federation.” *Vestnik Of Astrakhan State Technical University. Series: Marine Engineering And Technologies* 2 (2017): 22–27. DOI: 10.24143/2073-1574-2017-2-22-27.

2. Karetnikov, V. V., S. V. Kozik and A. A. Butsanets. “Risks assessment of applying unmanned means of water transport in the water area.” *Vestnik gosudarstvennogo universiteta morskogo i rechnogo flota im. admirala S. O. Makarova* 11.6 (2019): 987–1002. DOI: 10.21821/2309-5180-2019-11-6-987-1002.

3. Yastrebov, I. M. “Risk management in software development in the field of information protection.” *Vestnik gosudarstvennogo universiteta morskogo i rechnogo flota im. admirala S. O. Makarova* 15.6 (2023): 1105–1114. DOI: 10.21821/2309-5180-2023-15-6-1105-1114.

4. Nyrkov, A. P. and A. A. Nyrkov. “Grafovye modeli upravleniya riskami.” *Informatsionnye upravlyayushchie sistemy i tekhnologii: Materialy V Mezhdunarodnoy nauchno-prakticheskoy konferentsii (IUST-ODESSA-2016), Odessa, 20–22 sentyabrya 2016 goda*. Odessa: Federal’noe gosudarstvennoe byudzhethoe obrazovatel’noe uchrezhdenie vysshego obrazovaniya Gosudarstvennyy universitet morskogo i rechnogo flota im. admirala S. O. Makarova, 2016: 100–102.

5. Nyrkov, A. P. and A. A. Nyrkov. “Modeli, algoritmy i programmnoe obespechenie minimizatsii riskov mul’timodal’nykh perevozok.” *Vestnik gosudarstvennogo universiteta morskogo i rechnogo flota im. admirala S. O. Makarova* 1(20) (2013): 67–73.

6. Mamunts, D., V. Kuznetsov, et al. “Models and Algorithms for Estimation and Minimization of the Risks Associated with Dredging.” *Transport and Telecommunication Journal* 18.2 (2017): 139–145. DOI: 10.1515/ttj-2017-0013.

7. Yastrebov, M. Yu., P. V. Komissarov and S. V. Kolesnichenko. “Determining the area of a technical system stability in fuzzy sets terms.” *Vestnik gosudarstvennogo universiteta morskogo i rechnogo flota im. admirala S. O. Makarova* 15.4 (2023): 692–700. DOI: 10.21821/2309-5180-2023-15-4-692-700.

8. Yastrebov, M. Yu. "Mathematical modeling in the problem of management for transport risks." *Tsifrovaya transformatsiya transporta: problemy i perspektivy: materialy IV Mezhdunarodnoy nauchno-prakticheskoy konferentsii, Moskva, 25 sentyabrya 2024 goda*. Moskva: Rossiyskiy universitet transporta, 2024: 272–276.
9. Yastrebov, M. Yu. "To the problem of mathematical modeling in the problem of risk management for water transport systems." *Tsifrovaya transformatsiya transporta: problemy i perspektivy: materialy III Mezhdunarodnoy nauchno-prakticheskoy konferentsii, Moskva, 27 sentyabrya 2023 goda*. Moskva: Rossiyskiy universitet transporta, 2023: 212–217.
10. Tkachenko, Yu. A., P. N. Tkachenko and E. V. Ivanov. "On the approach to solving the problem of reducing the likelihood of congestion on the river section." *Issues Of Risk Analysis* 21.1 (2024): 56–64.
11. Ageev, S. A., A. A. Privalov, V. V. Karetnikov and A. A. Butsanets. "An adaptive method for assessing traffic characteristics in high-speed multiservice communication networks based on a fuzzy control procedure." *Automation And Remote Control* 7 (2021): 133–146. DOI: 10.31857/S0005231021070072.
12. Kalashnikov, P. V. "Mathematical model of risk control arising from the functioning of complex technical systems for critical purposes in conditions of uncertainty of information about the values of parameters and the phase state." *International Journal of Advanced Studies* 12.3 (2022): 22–39. DOI: 10.12731/2227-930X-2022-12-3-22-39.
13. Vereskun, V. D., A. N. Guda and E. A. Mamaev. "Risk and reliability management methods in transport and logistics supply chains." *Vestnik Rostovskogo Gosudarstvennogo Universiteta Putej Soobshcheniya* 4(96) (2024): 153–160. DOI: 10.46973/0201–727X_2024_4_153.
14. Sedelev, B. V. *Otsenka raspredelennykh lagov v ekonomicheskikh protsessakh*. M.: Ekonomika, 1977: 191.

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

Ястребов Михаил Юрьевич —

кандидат экономических наук, профессор кафедры высшей математики, доцент кафедры комплексного обеспечения информационной безопасности ФГБОУ ВО «ГУМРФ имени адмирала С. О. Макарова
Санкт-Петербург, Российская Федерация
e-mail: mikyast@gmail.com

Ланева Ирина Владимировна —

кандидат экономических наук, доцент кафедры прикладной математики ФГБОУ ВО «ГУМРФ имени адмирала С. О. Макарова
Санкт-Петербург, Российская Федерация
e-mail: lanir@list.ru

Рыданов Анатолий Александрович —

кандидат военных наук, доцент кафедры комплексного обеспечения информационной безопасности ФГБОУ ВО «ГУМРФ имени адмирала С. О. Макарова
Санкт-Петербург, Российская Федерация
e-mail: a. a.rydanov@gmail.com

INFORMATION ABOUT THE AUTHOR

Yastrebov, Mikhail Yu. —

Phd, professor Admiral Makarov State University of Maritime and Inland Shipping
5/7 Dvinskaya Str.,
St. Petersburg, 198035,
Russian Federation
e-mail: mikyast@gmail.com

Laneva, Irina V. —

Phd, associate professor Admiral Makarov State University of Maritime and Inland Shipping
5/7 Dvinskaya Str., St. Petersburg, 198035,
Russian Federation
e-mail: lanir@list.ru

Rydanov, Anatoly A. —

Phd, associate professor Admiral Makarov State University of Maritime and Inland Shipping
5/7 Dvinskaya Str., St. Petersburg, 198035,
Russian Federation
e-mail: a. a.rydanov@gmail.com

Статья поступила в редакцию 11 февраля 2025

Received: Feb. 11, 2025

ALGORITHM FOR PARAMETRIC IDENTIFICATION OF FUEL CONSUMPTION CHARACTERISTICS OF A VESSEL USING NEURAL NETWORK TECHNOLOGY

A. A. Chertkov, Ya. N. Kask, V. G. Nikiforov

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

The purpose of the study is to enhance methods for computer monitoring and parametric identification of models describing vessels' fuel consumption characteristics. These improvements aim at analyzing and forecasting energy efficiency indicators of water transport facilities and optimizing the operational modes of diesel generator units. The paper proposes an algorithm for parametric identification of input-output characteristics across various technological processes and systems (technical, biological, economic, social, environmental, etc.) based on measurement data using approximate motor (regression) neural networks. The algorithm enables quantitative error assessment of parametric optimization using the Euclidean norm. Unlike traditional methods relying on statistical series for model fitting, the proposed approach trains a multilayer neural network with backpropagation to minimize deviations in output signal values from reference values by adjusting synaptic weight coefficients. The study demonstrates that radial neural networks with fixed structures—comprising one hidden layer with nonlinear activation functions and one output layer with linear activation functions—are suitable for solving problems in this domain. These networks ensure accurate image mapping based on the Euclidean metric while simplifying training modes and maintaining acceptable approximation and identification accuracy. The algorithm has been implemented to estimate parameters of a vessel's fuel consumption model based on statistical series with a predefined initial approximation. It can also be applied to identify energy consumption characteristics in the inland water transport sector when calculating target indicators and developmental metrics.

Key words: algorithm, parametric identification, fuel consumption characteristics, neural networks, network technologies, approximation, parameter estimation.

For citation:

Chertkov Alexandr A., Ya. N. Kask, and V. G. Nikiforov. Algorithm for parametric identification of fuel consumption characteristics by a vessel using neural network technology. *Vestnik Gosudarstvennogo universiteta morskogo i rechnogo flota imeni admirala S. O. Makarova* 17.2 (2025): 291–301. DOI: 10.21821/2309-5180-2025-17-2-291-301.

УДК. 621.398.04

АЛГОРИТМ ПАРАМЕТРИЧЕСКОЙ ИДЕНТИФИКАЦИИ РАСХОДНОЙ ХАРАКТЕРИСТИКИ СУДНА С ПРИМЕНЕНИЕМ НЕЙРОСЕТЕВОЙ ТЕХНОЛОГИИ

А. А. Чертков, Я. Н. Каск, В. Г. Никифоров

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

Цель работы состоит в усовершенствовании методов компьютерного мониторинга и параметрической идентификации моделей расходных характеристик судов для анализа и прогнозирования показателей энергоэффективности объектов водного транспорта, а также оптимизации режимов работы дизель-генераторных агрегатов. Предложен алгоритм параметрической идентификации характеристик «вход-выход» различных по природе технологических процессов и систем (технических, биологических, экономических, социальных, экологических и др.) по данным измерений с помощью аппроксиматорных

(регрессионных) нейронных сетей с возможностью количественной оценки погрешности параметрической оптимизации по евклидовой норме. В отличие от известных методов параметрической пригонки модели по статистическим рядам предлагаемый способ базируется на обучении многослойной нейронной сети с обратным распространением ошибки отклонений значений выходных сигналов от эталонных с целью ее коррекции за счет введения поправок в значения весовых коэффициентов синаптических связей. Реализация алгоритма идентификации на основе предлагаемого способа пригонки модели выполнена с помощью радиальных нейронных сетей, имеющих фиксированную структуру с одним скрытым и одним выходным слоями в соответствии с нелинейными и линейными функциями активации нейронов, обеспечивающих точность отображения образов на основе евклидовой метрики. Предлагаемый подход позволяет упростить режимы обучения и обеспечить приемлемую точность аппроксимации и идентификации. Алгоритм реализован при оценивании параметров расходной характеристики судна с известной структурой модели потребления топлива по соответствующему статистическому ряду при заданном начальном приближении. Алгоритм может быть применим для идентификации параметров моделей характеристик расхода энергоресурсов как на судах, так и в целом в отрасли внутреннего водного транспорта при вычислении целевых индикаторов и показателей ее развития.

Ключевые слова: алгоритм, параметрическая идентификация, расходная характеристика, нейронные сети, сетевые технологии, аппроксимация, оценка параметров.

Для цитирования:

Чертков А. А. Алгоритм параметрической идентификации расходной характеристики судна с применением нейросетевой технологии / А. А. Чертков, Я. Н. Каск, В. Г. Никифоров // Вестник Государственного университета морского и речного флота имени адмирала С. О. Макарова. — 2025. — Т. 17. — № 2. — С. 291–301. DOI: 10.21821/2309-5180-2025-17-2-291-301. — EDN XZTFOR.

Введение (Introduction)

В условиях цифровой трансформации открываются новые возможности совершенствования методов параметрической идентификации расходных характеристик объектов водного транспорта, что позволяет обеспечить экономный расход топлива и электроэнергии судовыми дизель-генераторными агрегатами, а также повышение надежности их работы за счет выбора энергоэффективных режимов. Использование компьютерных технологий и роботизированных систем на основе искусственного интеллекта в управлении энергетическими системами объектов морского и речного флота является важнейшей задачей цифровизации в судостроении и вспомогательных производствах отрасли [1]–[3].

В последнее десятилетие существенно повысился интерес к применению искусственных нейронных сетей для решения задач обработки, распознавания и кластерного анализа больших объемов информации, а также оптимизации, идентификации моделей и диагностики дефектов на ранних стадиях их проявления. С помощью нейронных моделей можно выполнять диагностирование параметров расходных характеристик как судна, так и отдельно дизель-генераторного агрегата (ДГА), представленных математическими моделями в виде степенных полиномов любого порядка (как правило, второго или третьего), в которых переменными параметрами являются скорость судна или мощность ДГА, а диагностируемыми — постоянные коэффициенты при этих переменных, подлежащие оцениванию [4].

Цифровизация мониторинга и диагностирования параметров, не подлежащих измерениям с применением аппаратных датчиков, заставляет использовать математические датчики и интеллектуальные алгоритмы, базирующиеся на методах интерполяции статистических рядов измерений с применением сплайнов или получивших широкую известность в последнее время нейронных сетей. Далее с применением регрессионного анализа производится оценивание параметров идентифицируемой характеристики путем «пригонки» ее по модели аппроксимации, построенной с применением этих методов. Эффективность мониторинга и прогнозирования характеристик расхода энергоресурсов может быть повышена с применением искусственных нейронных сетей, моделирующих адаптируемые и обучаемые процессы распределенных мультипроцессорных систем, ассоциируемые с нейросетевыми процессами человеческого мозга [5], [6].

Нейросетевые процессы, протекающие в синаптических связях многослойной сети между нейронами за счет массового параллелизма их работы, значительно ускоряют обработку информации, обеспечивая вычисления с требуемой точностью. В отличие от известных технологических процессов они не программируются, а обучаются. Поэтому наиболее предпочтительными нейросетями будут те, которые сами обучаются в автоматическом режиме на заданном числе циклов обучения, а не пользователем вручную. В связи с этим предложены сети, отображающие пространство входного множества в многомерное радиальное пространство точек с ненулевыми значениями, образующих кластер. Такая структура нейросети позволяет гарантировать решение задач распознавания образов с высокой точностью при наличии лишь одного скрытого слоя в двухслойной сети. Таким образом, применение нейросетевых технологий с радиальной организацией многомерного базисного пространства при мониторинге энергоэффективности объектов в судоходных компаниях, портах и других объектах транспортной инфраструктуры может значительно ускорить и облегчить решение задач аппроксимации расходных характеристик и идентификацию их параметров с требуемой точностью [5].

Методы и материалы (Methods and Materials)

Впервые возможность линейного разделения случайного множества входных переменных на подмножества выходных переменных для локальной аппроксимации функций нескольких переменных сформулировал Томас М. Кавер в 1965 г. На основе такого разделения множество ожидаемых (выходных) значений функции может отображать множество входных данных ее аргументов через сумму локальных преобразований в ограниченной области многомерного пространства.

Применительно к нейронным сетям такие локальные преобразования могут выполняться нейронами в скрытом слое. В частности, если в качестве базисных функций для них выбрать радиальные функции $r(x)$, то многомерным пространством, в пределах которого выполняются эти преобразования, будет гиперсфера. Таким образом, в радиальных сетях входное множество данных x_i ($i = 1, 2, \dots, p$) преобразуется каждым скрытым нейроном в локальное радиальное пространство, а множество данных (образов) y_i ($i = 1, 2, \dots, p$) в выходном слое отображается взвешенной суммой локальных множеств в пространстве гиперсферы [7]. Отсюда скрытый слой должен содержать p нейронов, реализующих радиальные базисные функции, а выходной слой может содержать один нейрон для суммирования этих функций с вектором весов w .

Пусть на вход такой сети подаются p пар входных векторов (x_i, y_i) , один из которых x_i задает координаты $c = (c_1, c_2, \dots, c_n)$ одного из p центров сети. Тогда взаимосвязь входа и выхода сети можно описать системой линейных уравнений с вектором переменных весов w .

В задачах распознавания образов широко используется функция Гаусса, которую выбирают в качестве радиальной базисной функции:

$$r(x, c) = e^{-\frac{\sum_{j=1}^n (x_j - c_j)^2}{\Delta^2}}, \quad (1)$$

где Δ — ширина окна функции активации в пространстве гиперсферы [8].

В отличие от традиционных алгоритмов нейронные сети требуют обучения, в процессе которого определяются значения весов синаптических связей между нейронами. При фиксированных координатах c и радиуса Δ функции (1) вектор переменных w может быть найден посредством выполнения процедуры псевдообращения, когда решается задача наилучшей аппроксимации (с минимизацией евклидовой нормы) для системы линейных уравнений. Согласно этой процедуре для интерполяционной матрицы R , состоящей из действительных значений [9], [10]:

$$R = \begin{bmatrix} r_1(x_1) & r_2(x_1) & \dots & r_m(x_1) \\ r_1(x_2) & r_2(x_2) & \dots & r_m(x_2) \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ r_1(x_p) & r_2(x_p) & \dots & r_m(x_p) \end{bmatrix}, \quad (2)$$

определяется псевдообратная матрица

$$R^+ = (R^*R)^{-1}R^*, \quad (3)$$

где R^* — эрмитово сопряженная матрица R , которая для действительных значений $r_i(x_i)$ соответствует транспонированной матрице R , т. е. $R^* = R^T$.

В окончательном виде матрица весов находится из выражения

$$W = (R^*R)^{-1}R^*y = R^+y. \quad (4)$$

Архитектуру сети, реализованной на множестве скрытых нейронов, для гарантированно-го решения задачи распознавания образов достаточно построить с двумя слоями, состоящими из входного слоя скрытых нейронов с радиальными базисными функциями и выходного слоя линейных нейронов. Предложенный алгоритм состоит из двух этапов.

На первом этапе выполняется аппроксимация нейронной моделью расходной характеристики судна вида

$$G(v) = kv^p, \quad (5)$$

где G — расход топлива, кг/ч;

v — скорость судна, уз;

k и p — оцениваемые параметры по данным массивов измерений.

На втором этапе выполняется параметрическая идентификация расходной характеристики с использованием средств MATLAB.

Рассмотрим выполнение алгоритма на каждом этапе.

На **первом этапе** построение нейронной модели расходной характеристики выполняется в следующем порядке: подготовка входных данных для нейросети; выбор сети и ее параметров обучения; тестирование сети и проверка ее работоспособности; обучение сети и построение нейронной модели расходной характеристики с оценкой ее достоверности.

Рассмотрим подробно реализацию первого этапа алгоритма.

1. Определимся с размерностью входного массива. Пусть ряд измерений из $N = 10$ значений функции G получен для соответствующего массива значений скоростей v судна. Согласно данным измерений получены следующие значения расхода топлива:

$$G = [0.1 \ 1 \ 4 \ 10 \ 23 \ 40 \ 65 \ 100 \ 150 \ 205],$$

соответствующие значениям вектора скоростей судна:

$$v = [1 \ 3 \ 5 \ 7 \ 9 \ 11 \ 13 \ 15 \ 17 \ 19].$$

Полученные массивы входных данных будем использовать для обучения нейросети, с помощью которой выполним сначала интерполяцию дискретных данных измерений G , соответствующих значениям v непрерывной функции, т. е. получим нейронную модель, а затем с применением операции регрессии найдем искомые параметры k и p расходной характеристики.

2. Построим предложенную нейронную сеть и определим способ ее обучения. С целью аппроксимации и моделирования расходной характеристики судна по данным измерений выберем нейросеть на базе обобщенно-регрессионной сети (GRNN), представленной в инструментарии MATLAB функцией *newgrnn*. Обобщенная сеть (GRNN) представляет разновидность радиальной базисной сети, широко используемой для аппроксимации функций. В данном случае функция *newgrnn* возвращает регрессионную нейронную модель аппроксимированной расходной характеристики.

Согласно синтаксису функции *newgrnn* (X , T , SPREAD), ее аргументами X и T служат матрицы входных векторов-столбцов размерности $R \times Q$ и целевых векторов-столбцов $S \times Q$ соответственно, а также параметр SPREAD радиальных базисных функций (по умолчанию равен 1.0). Чем больше параметр SPREAD, тем более плавной будет аппроксимация функции, но меньшей точность. Для точной подгонки аппроксимации нейронной модели к входным данным значение параметра SPREAD задается меньше евклидова расстояния между координатами входных векторов.

3. Проверим работоспособность алгоритма на тестовом массиве входных векторов x и t , компоненты которых отличаются от компонентов обучающегося массива векторов X и T . Приведем фрагмент программы, позволяющей проверить работоспособность обобщенной радиальной базисной сети на небольшой выборке входных данных:

```
x = [1 2 3];
t = [2.0 4.1 5.9];
net = newgrnn(x, t);
y = net(x)
y =
    2.8280  4.0250  5.1680
```

Как видно из полученных результатов, построенная нейронная модель на базе обобщенной регрессии массива данных целевого вектора t является для них аппроксимирующей функцией.

4. Убедившись в работоспособности тестовой нейронной модели, используем в качестве обучающей выборки для целевого вектора T данные измерений расхода топлива G , а в качестве вектора входа — соответствующие данным G значения вектора скоростей судна v .

Кроме того, оценим достоверность результатов регрессионного анализа, обеспечивающего сравнение значений целевого вектора со значениями, полученными на выходе сети с помощью функции *postreg* из инструментария MATLAB. Приведем фрагмент программы (основного файла-сценария) построения нейронной модели для аппроксимации данных измерений, являющихся компонентами целевого вектора с оценкой достоверности их отображения:

```
X=[1 3 5 7 9 11 13 15 17 19];
T=[0.1 1 4 10 23 40 65 100 150 205];
G=T';
% Создание и обучение нейронной сети
spread=1.0;
net=newgrnn(X, T, spread)
% Моделирование расходной характеристики
Gm=sim(net, X)
% Графический анализ достоверности результатов обработки
[m, b, r]=postreg(Gm(1,:), T(1,:));
figure
```

С целью анализа результатов обучения нейронной сети построен график, представленный на рис. 1, в котором отображаются значения каждого из компонентов целевого вектора T с соответствующими компонентами вектора выхода G_m нейросети. Как видно из этого графика, все точки целевого вектора (измерений) находятся на прямой, состоящей из значений выходного вектора нейронной модели, что свидетельствует о правильном ее обучении.

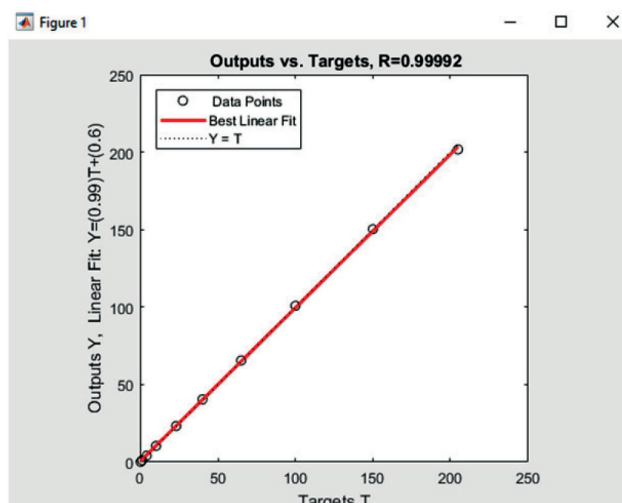


Рис. 1. Графики сравнения компонентов целевого (эталонного) и выходного вектора нейронной модели

В результате обучения нейросети получим следующие ее параметры:

```
net =
Neural Network
name: 'Generalized Regression Neural Network'
userdata: (your custom info)

dimensions:
    numInputs: 1
    numLayers: 2
    numOutputs: 1
    numInputDelays: 0
    numLayerDelays: 0
    numFeedbackDelays: 0
    numWeightElements: 24
    sampleTime: 1

connections:
    biasConnect: [1; 0]
    inputConnect: [1; 0]
    layerConnect: [0 0; 1 0]
    outputConnect: [0 1]
```

Как видно из полученных результатов, обученная модель нейронной сети содержит 24 весовых элемента (numWeightElements). По результатам моделирования построенной нейросетью модели расходной характеристики судна получены следующие оценки исходного статистического ряда Y значений расхода топлива:

```
Gm =
0.1530 1.1168 4.1669 10.3892 23.2225 40.4448 65.5561
100.8339 150.2766 201.7632
```

При этом суммарное среднеквадратическое отклонение, определяемое по формуле

$$\sigma = \sqrt{\sum_{i=1}^{n=10} \|G_i - G_m\|^2}, \quad (6)$$

составило

```
evcm =
3.2394.
```

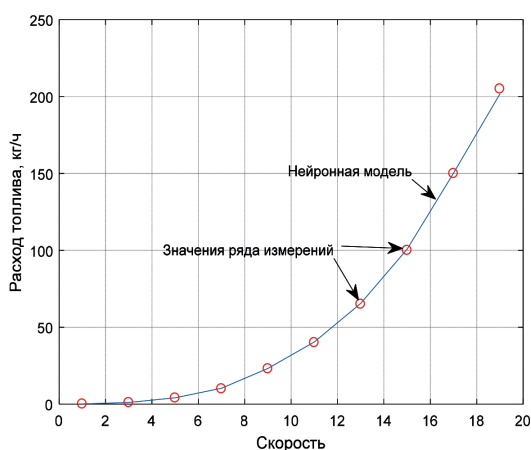


Рис. 2. Аппроксимация расходной характеристики при помощи нейросети

Графики эксперимента (статистического ряда) и нейронной модели расходной характеристики судна представлены на рис. 2. Из приведенных графиков видно, что непрерывная кривая нейронной модели G_m точно проходит через систему точек эксперимента «о», т. е. произведена 100 %-я интерполяция статистического ряда G , что свидетельствует о высоком качестве моделирования обобщенной регрессионной нейросетью.

На **втором этапе** выполняется параметрическая идентификация расходной характеристики путем ее «пригонки» по модели, построенной в результате обучения нейросети с использованием средств MATLAB, по результатам которой рассчитываются численные значения параметров k и p расходной характеристики с оценкой точности их определения.

С этой целью воспользуемся операторной функцией *lsqcurvefit* из инструментария MATLAB, которая обеспечивает наилучшим образом приближение функции (5) расхода топлива судном к выходу нейронной модели $G_m = \text{sim}(\text{net}, X)$.

Компьютерное моделирование на этапе параметрической идентификации предусматривает следующий алгоритм действий:

1. Создается файл-функция к основному файлу-сценарию для модели (5) расходной характеристики судна вида

$$f = a_1(v^{a_2}),$$

где $a_1 = k, a_2 = p$ — искомые постоянные параметры соответствующей размерности;
 v — скорость судна.

2. Обеспечивается соблюдение синтаксиса функции «пригонки» *lsqcurvefit*, аргументами которой являются файл-функция, начальное приближение, вход и выход нейронной модели, нижняя и верхняя границы искомых переменных.

3. С помощью функции «пригонки» по данным вектора G_m реализуются наилучшие оценки вектора коэффициентов $x = [x(1), x(2)]$ искомых параметров $x(1) = a_1$ и $x(2) = a_2$ заданной структуры (5) расходной характеристики судна:

$$f = x(1) * (v^{x(2)}).$$

4. По известной модели $f(x, v)$ находится погрешность параметрической идентификации с использованием метода наименьших квадратов:

$$\min_x \|f(x, v) - G_m\|^2, \quad (7)$$

выполняются графические построения нейронной модели и аппроксимирующей ее модели идентифицированной расходной характеристики.

Приведем фрагмент файла-сценария «пригонки» нейронной модели к идентифицированной кривой расходной характеристики:

```
x0=[0.01 0.01]'; %Вектор начальных условий
lb=zeros(2,1); ul=[]; % Значения нижней и верхней границ переменных
xdata=X';
ydata=Gm';
% Оценки параметров вектора x:
x=lsqcurvefit(@(x, xdata)myfun2(x, xdata), x0, xdata, ydata, lb, ub)
y=x(1)*(xdata.^x(2));
```

Здесь файл-функция представлена следующим набором операторов:

```
function f=myfun2(x, xdata);
f=x(1)*(xdata.^x(2));
```

По результатам моделирования процесса пригонки функции $f(x, v)$ по модели G_m получили вектор коэффициентов $x = [x(1) \ x(2)]^T$:

$x =$
0.0360
2.9343
>>

Полученные численные оценки коэффициентов вектора x соответствуют параметрам a_1, a_2 модели (5), наилучшим образом отображая нелинейную функцию f относительно ее нейронной модели G_m . В результате вектор искоемых коэффициентов модели (6) может быть записан в следующем виде:

$$x = \begin{bmatrix} x(1) \\ x(2) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} a_1 \\ a_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0.360 \\ 2.9343 \end{bmatrix},$$

где $a_1 = x(1) = 0,0360$; $a_2 = x(2) = 2,9343$.

Таким образом, выполнена параметрическая идентификация расходной характеристики судна.

Результаты (Results)

По результатам пригонки по методу наименьших квадратов кривой регрессии f по нейронной модели G_m , являющейся результатом аппроксимации с использованием радиальной нейронной сети, получена следующая идентифицированная модель расходной характеристики судна:

$$G(v) = 0,0360 v^{2.9343}.$$

Графики кривых, визуально отображающих степень «пригонки» идентифицированной (регрессионной) функции $G(v)$ к ее нейронной модели G_m , построенной с помощью радиальной обобщенно-регрессионной сети, приведены на рис. 3.

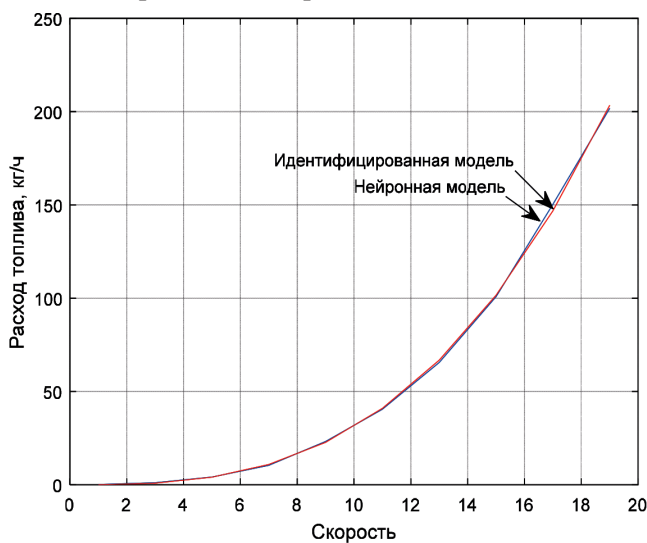


Рис. 3. Графики регрессионной модели функции $G(v)$ расходной характеристики и ее нейронной модели

Выполнена численная оценка качества регрессии расходной характеристики путем вычисления средней ошибки аппроксимации (отклонения идентифицированной функции от статистического ряда измерений расхода топлива) на интервале выборки из десяти значений по формуле

$$\delta_a = \frac{\sum_{i=1}^{n=10} \left(\frac{|G_i - G(v)|}{G_i} \right)}{n} \cdot 100 \% \quad (8)$$

Величина средней ошибки аппроксимации (регрессии) расходной характеристикой данных измерений составляет величину $\delta_a = 9,4324 \%$. Таким образом, ее значение при малочисленной вы-

борке не превышает 10 %, что свидетельствует о высоком качестве подобранной модели расходной характеристики [10].

Обсуждение (Discussion)

Предложен алгоритм параметрической идентификации расходной характеристики судна путем аппроксимации ее нейронной моделью радиальной сети с последующей оценкой ее параметров в результате подгонки по статистическим данным измерений.

Использование нейронной сети с радиальными базисными функциями из пакета NNT (Neural Networks Toolbox) MATLAB позволяет наилучшим образом производить линейное разделение любых нелинейных множеств. Благодаря своим преимуществам этим сетям достаточно только одного скрытого слоя для аппроксимации (моделирования) нелинейной функции, в частности расходной характеристики. Использование евклидовой нормы ошибки при оценивании параметров кривой регрессии расходной характеристики позволяет осуществлять оптимизацию достаточно быстро без риска попадания в локальные минимумы.

Выполнена оценка качества параметрической идентификации по величине средней ошибки аппроксимации расходной характеристики согласно экспериментальным данным, что подтверждает эффективность алгоритма идентификации и подобранной модели расходной характеристики.

Выводы (Summary)

На основе результатов решения задачи параметрической идентификации расходной характеристики можно сделать следующие выводы:

1. Нейросетевые технологии сетей с радиальными базисными функциями позволяют аппроксимировать любую нелинейную функцию с помощью одного лишь слоя скрытых нейронов, упрощая разработчику процесс решения вопроса о выборе числа скрытых слоев.
2. Использование функции Гаусса для активации нейронов скрытого слоя не только задает ширину окна активации в пространстве гиперсферы, но и способствует усилению малого евклидова расстояния между координатами входных векторов.
3. В радиальной нейронной сети оптимизация параметров выходных сигналов сети, являющихся линейной комбинацией взвешенных сумм входных сигналов, обеспечивается применением методов линейной оптимизации, которые отличаются быстродействием и способностью избегать локальных минимумов.
4. Показано, что параметрическая идентификация моделей расходных характеристик, выполняемая с применением радиальных нейронных сетей, обеспечивает наилучшее решение задачи аппроксимации ряда измерений нейронной моделью (с минимизацией евклидовой нормы).
5. Практическая значимость предложенного алгоритма состоит в расширении возможностей численной оценки параметров расходной характеристики судна на этапах испытаний, эксплуатации и диагностики судовых дизель-генераторных агрегатов на различных стадиях мониторинга судовых систем.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Барышников С. О. Модели и алгоритмы управления объектами водного транспорта в условиях цифровой трансформации: монография / С. О. Барышников, Д. В. Дмитриенко, В. В. Сахаров, А. А. Чертков. — СПб: Изд. «Заневская площадь», 2022. — 520 с.
2. Сахаров В. В. Модели и алгоритмы оптимизации технологических процессов на объектах водного транспорта в среде MatLab: монография / В. В. Сахаров, А. А. Кузьмин, А. А. Чертков. — СПб.: Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования Государственный университет морского и речного флота имени адмирала С. О. Макарова, 2015. — 436 с. — EDN ULLIID.
3. Чертков А. А. Алгоритм идентификации параметров моделей производственных функций при помощи нейронной сети / А. А. Чертков, С. В. Сабуров, Я. Н. Каск // Вестник государственного университета

морского и речного флота им. адмирала С. О. Макарова. — 2023. — Т. 15. — № 6. — С. 1096–1104. DOI: 10.21821/2309-5180-2023-15-6-1096-1104. — EDN AQZOGP.

4. Герасимов Б. И. Основы научных исследований / Б. И. Герасимов, В. В. Дробышева, Н. В. Злобина, Е. В. Нижегородов, Г. И. Терехова. — 2-е изд. доп. — М.: Форум: ИНФРА-М, 2015. — 272 с.

5. Хайкин, Саймон. Нейронные сети: полный курс. — 2-е изд. / Пер. с англ. М.: Издательский дом «Вильямс», 2016. — 1104 с.

6. Вакуленко С. А. Практический курс по нейронным сетям / С. А. Вакуленко, А. А. Жихарева. — СПб., Ун-т ИТМО, 2018. — 71 с.

7. Осовский С. Нейронные сети для обработки информации / С. Осовский; пер. с польского И. Д. Рудинского. — М.: Финансы и статистика, 2002. — 344 с.

8. Гашиков М. В. Методы компьютерной обработки изображений: учеб. пособие для студентов вузов, обучающихся по направлению подготовки дипломированных специалистов «Прикладная математика» / М. В. Гашиков, Н. И. Глузов, Н. Ю. Ильясова [и др.]; под ред. В. А. Сойфера. — 2 изд., испр. — М.: ООО Издательская фирма «Физико-математическая литература», 2003. — 784 с. — EDN QMMTJV.

9. Fursov V. A. Constructing unified identification algorithms using a small number of observations for adaptive control and navigation systems / V. A. Fursov // Navigation and Control Technologies for Unmanned Systems II — SPIE, 1997. — С. 34–44. DOI: 10.1117/12.277217.

10. Sanjeev Kumar Dash Radial basis function neural networks: a topical state-of-the-art survey / Kumar Dash Sanjeev, Ajit Kumar Behera, Satchidananda Dehuri, and Sung-Bae Cho // Open Computer Science. — 2016. — Vol. 6. — Is. 1. — Pp. 33–63. DOI: 10.1515/comp-2016-0005.

11. Аникина О. В. Табличная реализация искусственной нейронной сети радиальных базисных функций для классификации образцов / О. В. Аникина, О. М. Гущина, Е. В. Панюкова, Н. Н. Рогова // Современные информационные технологии и ИТ-образование. — 2018. — Т. 14. — № 2. — С. 436–445. DOI: 10.25559/SITITO.14.201802.436–445. — EDN VNHQUM.

12. Goodfellow I. Deep Learning / I. Goodfellow, Y. Bengio, A. Courville — London; Cambridge: MIT Press, 2016.

REFERENCES

1. Baryshnikov, S. O., D. V. Dmitrienko, V. V. Sakharov and A. A. Chertkov. *Modeli i algoritmy upravleniya ob'ektami vodnogo transporta v usloviyakh tsifrovoy transformatsii* SPb: Izd. «Zanevskaya ploschad'», 2022: 520.

2. Sakharov, V. V., A. A. Kuz'min and A. A. Chertkov. *Modeli i algoritmy optimizatsii tekhnologicheskikh protsessov na ob'ekтах водного транспорта в среде MatLab* Sankt-Peterburg: Federal'noe gosudarstvennoe byudzhethnoe obrazovatel'noe uchrezhdenie vysshego obrazovaniya Gosudarstvennyy universitet morskogo i rechnogo flota im. admiralа S. O. Makarova, 2015: 436.

3. Chertkov, A. A., C. V. Saburov and Ya. N. Kask. “Algorithm for identifying parameters of production function models using a neural network.” *Vestnik gosudarstvennogo universiteta morskogo i rechnogo flota im. admiralа S. O. Makarova* 15.6 (2023): 1096–1104. DOI: 10.21821/2309-5180-2023-15-6-1096-1104.

4. Gerasimov, B. I., G. I. Terekhova., et al. *Osnovy nauchnykh issledovaniy*. Second edition. M: Forum: INFRA-M, 2015: 272.

5. Khaikin, Simon. *Neural Networks: A Complete Course*, 2nd Edition. with anrl. Moscow, Williams Publishing House, 2006. 1104 с.: ил.

6. Vakulenko, S. A. and A. A. Zhikhareva. *Prakticheskiy kurs po neyronnym setyam* SPb: Universitet ITMO, 2018: 71.

7. Per, S. Osovskiy. *Neyronnye seti dlya obrabotki informatsii* M: Finansy i statistika, 2002: 344.

8. Gashnikov, M. V. et al. *Metody komp'yuternoy obrabotki izobrazheniy: Uchebnoe posobie dlya studentov vuzov, obuchayuschihsya po napravleniyu podgotovki diplomirovannykh spetsialistov “Prikladnaya matematika”* Ed. by V. A. Soifer. Moskva: ООО Izdatel'skaya firma “Fiziko-matematicheskaya literatura”, 2003: 784.

9. Fursov, V. A. “Constructing unified identification algorithms using a small number of observations for adaptive control and navigation systems.” *Navigation and Control Technologies for Unmanned Systems II* SPIE, 1997: 34–44. DOI: 10.1117/12.277217.

10. Ch. Sanjeev Kumar Dash, Ajit Kumar Behera, Satchidananda Dehuri and Sung-Bae Cho “Radial basis function neural networks: a topical state-of-the-art survey.” *Open Computer Science* 6.1 (2016): 33–63. DOI: doi:10.1515/comp-2016-0005.

11. Anikina, O. V., O. M. Guschina, E. V. Panyukova and N. N. Rogova. "Abular artificial neural network implementation of radial basis functions for the samples classification." *Modern Information Technologies And It-Education* 14.2 (2018): 436–445. DOI: 10.25559/SITITO.14.201802.436–445.

12. Goodfellow, I., Y. Bengio and A. Courville. *Deep Learning* London; Cambridge: MIT Press, 2016.

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

Чертков Александр Александрович —
доктор технических наук, доцент
ФГБОУ ВО «ГУМРФ имени адмирала
С. О. Макарова»
198035, Российская Федерация, Санкт-Петербург,
ул. Двинская, 5/7
e-mail: chertkov51@mail.ru,
kaf_electricautomatic@gumrf.ru
Каск Ярослав Николаевич —
кандидат технических наук, доцент
ФГБОУ ВО «ГУМРФ имени адмирала
С. О. Макарова»
198035, Российская Федерация,
Санкт-Петербург, ул. Двинская, 5/7
e-mail: rgam2010@yandex.ru,
kaf_electricautomatic@gumrf.ru
Никифоров Владимир Григорьевич —
доктор технических наук, профессор
ФГБОУ ВО «ГУМРФ имени адмирала
С. О. Макарова»
198035, Российская Федерация,
Санкт-Петербург, ул. Двинская, 5/7
e-mail: nikiforovvg@gumrf.ru

INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Chertkov, Alexandr 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: chertkov51@mail.ru,
kaf_electricautomatic@gumrf.ru
Kask, Yaroslav N. —
PhD
Admiral Makarov State University of Maritime
and Inland Shipping
5/7 Dvinskaya Str., St. Petersburg, 198035,
Russian Federation
e-mail: rgam2010@yandex.ru, kaf_electricautomatic@gumrf.ru
Nikiforov Vladimir G. —
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: nikiforovvg@gumrf.ru

Статья поступила в редакцию 05 февраля 2025 г.

Received: Feb. 5, 2025.

Научное периодическое издание

**Вестник Государственного университета морского
и речного флота имени адмирала С. О. Макарова**

Том 17. № 2

2025 год

Выпускающий редактор *Н. А. Карамзина*
Дизайн и верстка *М. Н. Евсюткина*

Подписано в печать с оригинал-макета 30.04.25. Формат 60×90/8
Гарнитура Times New Roman. Усл. печ. л. 18,25. Тираж 500 экз. Заказ № 157/25

Государственный университет морского и речного флота имени адмирала С. О. Макарова
198035, Санкт-Петербург, ул. Двинская, 5/7