

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 15. № 2

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

**САНКТ-ПЕТЕРБУРГ
2023**

Вестник Государственного университета морского и речного флота имени адмирала С. О. Макарова. — СПб. : ГУМРФ имени адмирала С. О. Макарова, 2023. — Т. 15. — № 2. — 174 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, 2023

СОДЕРЖАНИЕ

ЭКСПЛУАТАЦИЯ ВОДНОГО ТРАНСПОРТА, ВОДНЫЕ ПУТИ СООБЩЕНИЯ И ГИДРОГРАФИЯ 161

Логиновский В. А. Оценка вероятности нахождения места судна в геометрической фигуре погрешностей линий положения 161

Дерябин В. В. Определение местоположения судна по рельефу дна при помощи нейронной сети 172

Фадюшин С. Г. Концептуальная схема интеллектуальной системы управления движением судна с учетом человеческого фактора 180

Андреева Е. В., Тезиков А. Л. Поиск оптимальных судоходных маршрутов в акватории арктических морей 191

Ершов А. А., Бояринов А. М., Гаккель А. А. Теоретические основы высвобождения судов из тяжелых ледовых условий 200

Подпорин С. А., Холопцев А. В. Современные тенденции изменения повторяемости опасных ветров в западном секторе российской Арктики в зимне-весенний период 215

Фирсов Ю. Г., Зинченко А. Г. Проблемы картографического обеспечения при изучении Северного Ледовитого океана и задачи батиметрических исследований в российской Арктике 226

Купцов Н. В., Лилль А. В. Современное состояние и возможные перспективы использования танк-контейнеров сжиженного природного газа 247

Зуб И. В., Ежов Ю. Е., Касаткин Г. Д. Анализ нормативной документации по проектированию морских портов в части автоматизации технологических процессов на контейнерных терминалах 262

ТЕХНОЛОГИЯ СУДОСТРОЕНИЯ, СУДОРЕМОНТА И ОРГАНИЗАЦИЯ СУДОСТРОИТЕЛЬНОГО ПРОИЗВОДСТВА 272

Бурмистров Е. Г., Щеголева О. А., Бурмистрова А. Е. Перспективы замены поточных линий в цехах верфей многофункциональными сборочно-сварочными манипуляторами 272

Том 15. № 2

2023

РЕДАКЦИОННАЯ КОЛЛЕГИЯ

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.

Свидетельство о регистрации ПИ № ФС 77-54734 от 17.07.2013 г.

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

Адрес редакции: 198035, Санкт-Петербург, ул. Двинская, 5/7.

Подписной индекс в каталоге Урал-Пресс — 37276.

Все материалы, поступившие в редакцию, рецензируются.

В. Л. Ерофеев,
д-р техн. наук, проф.

В. А. Жуков,
дд-р техн. наук, доц.

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

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

А. В. Кириченко,
дд-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.

Пашеева Т. Ю., Фатов В. И. Организационно-технический уровень
подготовки судостроительно-судоремонтного производства
и пути его повышения 282

Ушаков К. М., Яцук Ю. В. Экспериментальное исследование влияния
параметров катамарана на остаточное сопротивление..... 295

**СУДОВЫЕ ЭНЕРГЕТИЧЕСКИЕ УСТАНОВКИ И ИХ ЭЛЕМЕНТЫ
(ГЛАВНЫЕ И ВСПОМОГАТЕЛЬНЫЕ)..... 304**

Федоровский К. Ю., Гриненко Н. К. Тепловая эффективность экологически
безопасных замкнутых систем охлаждения СЭУ 304

**АВТОМАТИЗАЦИЯ И УПРАВЛЕНИЕ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИМИ
ПРОЦЕССАМИ И ПРОИЗВОДСТВАМИ..... 315**

Стародубцев Ю. И., Худайназаров Ю. К., Кныш Т. П. Подходы к
интеллектуализации контроля безопасности
информационно-телекоммуникационных сетей на транспорте 315

CONTENTS

OPERATION OF WATER TRANSPORT, WATERWAYS AND HYDROGRAPHY 161

Loginovsky V. A. Assessment of ship position probability in the geometrical figure of position lines errors 161

Deryabin V. V. Seabed relief-based vessel position fixing with a neural network 172

Fadyushin S. G. Conceptual scheme of intelligent vessel traffic control system with the human factor included 180

Andreeva E. V., Tezikov A. L. Search for optimal shipping routes in the Arctic seas 191

Ershov A. A., Boiarinov A. M., Gakkel A. A. Theoretical foundations of freeing ships from heavy ice conditions 200

Podporin S. A., Kholoptsev A. V. Current trends of dangerous winds frequency variation in the western sector of the Russian Arctic in winter-spring period 215

Firsov Yu. G., Zinchenko A. G. Cartographic support issues in the Arctic Ocean studying and bathymetric investigation objectives in the Russian Arctic 226

Kuptsov N. V., Lill' A. V. The current state and possible prospects for using liquefied natural gas tank containers 247

Zub I. V., Ezhov Yu. E., Kasatkin G. D. Analysis of regulatory documentation on seaports design in terms of technological processes automation at container terminals 262

TECHNOLOGY OF SHIPBUILDING, SHIP REPAIR AND ORGANIZATION OF SHIPBUILDING PRODUCTION 272

Burmistrov E. G., Shchegoleva O. A., Burmistrova A. E. Prospects for replacing production lines in the shipyards workshops with multifunctional assembly and welding manipulators 272

Volume 15. № 2

2023

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

<i>V. L. Erofeev,</i> Doctor of Technical Sciences	<i>Pasheeva T. Yu., Fatov V. I.</i> Organizational and technical level of preparation of shipbuilding and ship repair production and ways to improve it..... 282
<i>V. A. Zhukov,</i> Doctor of Technical Sciences	<i>Ushakov K. M., Yatsuk Yu. V.</i> Experimental study of the influence of catamaran parameters on water resistance..... 295
<i>V. V. Karetnikov,</i> Doctor of Technical Sciences	SHIP POWER PLANTS AND THEIR ELEMENTS (MAIN AND AUXILIARY)..... 304
<i>A. V. Kirichenko,</i> Doctor of Technical Sciences	<i>Fedorovsky K. Yu., Grinenko N. K.</i> Thermal efficiency of environmentally friendly closed cooling systems of marine power plants 304
<i>M. N. Kirsanov,</i> Doctor of Phys.-Math. Sciences	AUTOMATION AND CONTROL OF TECHNOLOGICAL PROCESSES AND PRODUCTIONS 315
<i>M. A. Kolosov,</i> Doctor of Technical Sciences	<i>Starodubtsev Yu. I., Khudainazarov Yu. K., Knysh T. P.</i> Approaches to the intellectualization of information and telecommunication networks security control in transport 315
<i>E. A. Koroleva,</i> Doctor of Economic Sciences	
<i>I. I. Kostylev,</i> Doctor of Technical Sciences	
<i>A. L. Kuznetsov,</i> Doctor of Technical Sciences	
<i>V. A. Loginovskiy,</i> Doctor of Technical Sciences	
<i>A. V. Makshanov,</i> Doctor of Technical Sciences	
<i>V. Ye. Marley,</i> Doctor of Technical Sciences	
<i>T. A. Pantina,</i> Doctor of Economic Sciences	
<i>V. I. Reshnyak,</i> Doctor of Technical Sciences	
<i>A. V. Saushev,</i> Doctor of Technical Sciences	
<i>S. V. Smolentsev,</i> Doctor of Technical Sciences	
<i>S. S. Sokolov,</i> Doctor of Technical Sciences	
<i>M. V. Sukhoterin,</i> Doctor of Technical Sciences	
<i>A. L. Tezikov,</i> Doctor of Technical Sciences	
<i>A. A. Chertkov,</i> Doctor of Technical Sciences	
<i>V. B. Chistov,</i> Doctor of Technical Sciences	

ЭКСПЛУАТАЦИЯ ВОДНОГО ТРАНСПОРТА, ВОДНЫЕ ПУТИ СООБЩЕНИЯ И ГИДРОГРАФИЯ

DOI: 10.21821/2309-5180-2023-15-2-161-171

ASSESSMENT OF SHIP POSITION PROBABILITY IN THE GEOMETRICAL FIGURE OF POSITION LINES ERRORS

V. A. Loginovsky

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

Accurate and reliable determination of the ship position coordinates is one of the most important tasks for ensuring the safety of navigation at sea. A significant condition that contributes to the effective solution of this task is the use of redundancy in measurements of navigation parameters. The implementation of this redundancy allows the navigator or automatic navigation aid to control the trueness of measurements; eliminate gross and systematic errors; reduce the effect of random errors; apply various methods of analysis and algorithms for processing information in order to obtain the most accurate and reliable ship position. Adequate redundancy of navigation measurements makes it possible to obtain asymptotically unbiased estimates of coordinates, as well as to solve other navigation tasks based on redundant data. The results of a study on the probability of finding the true coordinates of the ship's position in a geometric figure formed by random measurement errors are presented. It has been shown in the study that a single redundancy of measurements is not enough to achieve the required level of probability. Elements of classical combinatorics based on the Bernoulli scheme and including Newton's binomial and Pascal's triangle as tools are used as a mathematical apparatus for the study. These tools allow us to effectively analyze combinations of mathematical signs, such as plus and minus, of random measurement errors, reducing them into binary sequences, which are described by binomial coefficients. It has been argued in the paper that the low level of probability of finding the true values of the coordinates in the geometrical figure of measurement errors is a strong signal that any method of averaging the measurement results can lead to asymptotically biased estimates of the ship position coordinates. This is analogous to the influence of systematic errors on the coordinates within a certain time interval. From the point of view of navigational safety, a low probability can be qualified as a near-miss situation, which can lead to incorrect control of the ship position. The probabilistic criteria for the necessary redundancy of measurements to approach asymptotically unbiased estimates of ship position are presented in the paper.

Keywords: ship position, probability, geometrical figure of errors, confidence interval, measurement redundancy.

For citation:

Loginovsky, Vladimir A. "Assessment of ship position probability in the geometrical figure of position lines errors." *Vestnik Gosudarstvennogo universiteta morskogo i rechnogo flota imeni admirala S. O. Makarova* 15.2 (2023): 161–171. DOI: 10.21821/2309-5180-2023-15-2-161-171.

УДК 527.62

ОЦЕНКА ВЕРОЯТНОСТИ НАХОЖДЕНИЯ МЕСТА СУДНА В ГЕОМЕТРИЧЕСКОЙ ФИГУРЕ ПОГРЕШНОСТЕЙ ЛИНИЙ ПОЛОЖЕНИЯ

В. А. Логиновский

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

Отмечается, что одним из ключевых условий, способствующих эффективному решению задачи определения места судна, является применение избыточности измерений навигационных параметров. Реализация этой избыточности позволяет судоводителю или автоматическому навигационному средству осуществлять контроль правильности измерений, исключать грубые и систематические погрешности, уменьшать влияние случайных погрешностей и применять различные методы анализа и алгоритмы обработки информации с целью получения наиболее точных и надежных координат места судна. Адекватная

избыточность навигационных измерений позволяет получать асимптотически несмещенные оценки координат, а также решать другие задачи навигации, основанные на избыточных данных. В статье приведены результаты исследования оценки вероятности нахождения истинных координат места судна в геометрической фигуре, сформированной случайными погрешностями измерений при их различной избыточности. Показано, что единичной избыточности измерений недостаточно для достижения необходимого уровня вероятности, а также сделаны выводы, позволяющие обобщить полученные результаты для линейных пространств любых размерностей, используемых в задачах расчета координат места судна. В качестве математического аппарата для проведения исследования были использованы элементы классической комбинаторики, основанные на схеме Бернулли и включающие в качестве инструментов бином Ньютона и треугольник Паскаля. Эти инструменты позволяют эффективно анализировать комбинации математических знаков случайных погрешностей измерений, сводя их в бинарные последовательности, описываемые биномиальными коэффициентами. В статье приводится доказательство того, что низкий уровень вероятности нахождения истинных значений координат в фигуре погрешностей является сигналом о том, что использование любых методов осреднения результатов таких измерений может привести к асимптотически смещенным оценкам координат места судна, т. е. к влиянию на координаты систематических погрешностей измерений, действующих в пределах некоторого временного интервала. Отмечается, что с точки зрения навигационной безопасности низкая вероятность может квалифицироваться как потенциально-опасная ситуация, способствующая возникновению некорректного контроля за местом судна и неадекватному принятию решений. Приводятся вероятностные критерии необходимой избыточности измерений для приближения к оценке асимптотически несмещенных координат места судна.

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

Для цитирования:

Логиновский В. А. Оценка вероятности нахождения места судна в геометрической фигуре погрешностей линий положения / В. А. Логиновский // Вестник Государственного университета морского и речного флота имени адмирала С. О. Макарова. — 2023. — Т. 15. — № 2. — С. 161–171. DOI: 10.21821/2309-5180-2023-15-2-161-171.

Введение (Introduction)

Неудовлетворительный контроль за местом нахождения судна, а также навигационные ошибки и неверная интерпретация измеренных данных являются наиболее распространенными причинами посадок на мель и касаний грунта [1]–[3]. В публикации [4] рассмотрены некоторые идеи интерпретации избыточных измерений навигационных параметров с точки зрения оценки вероятности нахождения истинного (эталонного) положения места судна в фигуре, образованной случайными погрешностями измерений. В данном исследовании, которое является продолжением темы указанной публикации, сформулированы дополнения, уточнения и разъяснения применения техники комбинаторного анализа к оценке вероятности комбинаций случайных погрешностей при избыточных измерениях.

Объектом исследования является фигура погрешностей, формируемая несовместной нормированной системой линейных уравнений навигационных функций, применяемых для расчета координат места судна:

$$A\Delta X = \Delta U. \quad (1)$$

Здесь A — $(m \times n)$ -матрица коэффициентов линейных уравнений навигационных функций в истинной точке нахождения судна; ΔU — m -мерный вектор измерений; ΔX — n -мерный вектор искомых приращений координат относительно точки линеаризации, за которую принимается истинная (эталонная) точка.

Сделано предположение, что матрица A в некоторой окрестности эталонной точки линеаризации практически постоянна, а вектор ΔU в такой постановке задачи состоит из случайных погрешностей измерений. В соответствии с терминологией источника [5] столбцы матрицы A образуют линейное n -мерное пространство решений системы (1), а вектор ΔU определяет m -мерное пространство измерений. При $m > n$ пространство решений данной системы является *подпространством пространства измерений*. Под избыточностью измерений r будем понимать превышение размерности вектора измерений навигационных параметров m над числом искомых координат n , т. е. $r = m - n$.

Графической интерпретацией системы (1) при $r = 1$ в пространстве решений любой размерности является простейшая фигура — *симплекс погрешностей*, формируемый наличием погрешностей измерений в векторе ΔU : при $n = 1$ — это отрезок прямой линии (1-симплекс), при $n = 2$ — треугольник (2-симплекс), при $n = 3$ — тетраэдр (3-симплекс) и т. д., а обобщением является n -симплекс. При $r > 1$ фигура погрешностей становится более сложной, и в соответствии с терминологией публикаций [6], [7] представляет собой r -комплекс, состоящий из n -симплексов. Например, в задаче расчета координат места судна при $m = 4$ и $n = 2$ фигура погрешностей образуется четырьмя линиями положения (2-комплекс), которая состоит из треугольников (2-симплексов).

Формально задача исследования заключается в оценке вероятности P попадания истинного вектора ΔX , включающего координаты точки положения места судна, в фигуру, образованную вследствие влияния случайных погрешностей измерений навигационных параметров. В данной статье эта фигура погрешностей рассматривается как *текущий достоверный интервал*, в котором с определенной вероятностью P находятся истинные координаты вектора ΔX . Согласно работе [8], указанная вероятность может являться одним из критериев *надежности* определения координат места судна.

Методы и материалы (Methods and Materials)

Избыточные измерения в одномерном пространстве решений (прямая, $n = 1$). Рассмотрим гипотетический пример, представленный на рис. 1¹: из некоторой истинной (эталонной) точки C , в которой находится судно, выполнено двукратное измерение дистанции D до навигационного ориентира B .

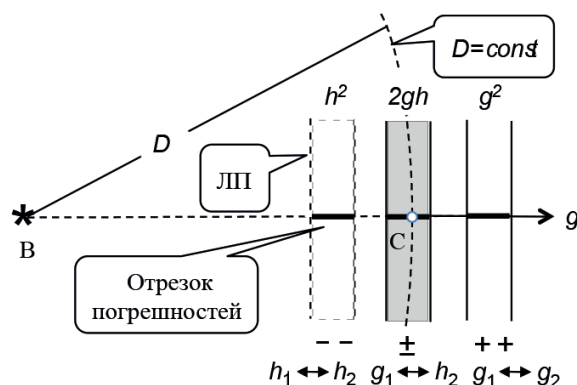


Рис. 1. Отрезки погрешностей при возможных сочетаниях знаков погрешностей линий положения

Предположим, что систематические погрешности измерений отсутствуют, что дает возможность оценить среднее значение величины D при $r = 1$. Случайные погрешности приводят к образованию простейшей фигуры погрешностей, которая в данном случае является отрезком нормали к навигационной изолинии. Отрезок погрешностей (1-симплекс) создает неопределенность для оценки величины D , которая может быть оценена вероятностью P нахождения истинного значения D в полученном отрезке. Обозначим положительные случайные погрешности соответствующих линий положения (ЛП) по направлению градиента символом g , а отрицательные — символом h , не определяя их численных значений.

На рис. 1 символами g_1, h_1 обозначены возможные математические знаки погрешностей ЛП₁, сопутствующие первому измерению дистанции D , а символами g_2, h_2 — случайные погрешности ЛП₂. Далее для удобства изложения материала освободимся от подстрочных индексов. Тогда в результате двукратного измерения навигационного параметра D возможно образование следующих комбинаций символов g и h : gg, gh, hg, hh . Такая последовательность комбинаций аналогична

¹ Пример приведен исключительно для единообразия дальнейшего изложения материала.

результатам работы генератора случайных сигналов в известной задаче из теории вероятностей о подбрасывании двух монет. Естественно считать, что в результате измерений с единичной избыточностью эталонное значение D окажется внутри отрезка погрешностей только в случае выпадения комбинаций символов gh или hg . Комбинации gg и hh не покрывают истинную точку C .

Как показано в работах [9] и [10], при $r = 1$ количество возможных комбинаций k из символов g и h в рассматриваемом примере описывается с помощью формулы бинома Ньютона второго порядка:

$$(g + h)^2 = g^2 + 2gh + h^2 = gg + gh + hg + hh. \quad (2)$$

Здесь $k = 2^m = 4$ (m — количество измерений).

Поэтому теоретическая вероятность попадания истинного значения D в отрезок погрешностей $P = 2/4 = 0,5$. При $r = 2$ (добавляется ЛП₃) повышается также уровень вероятности попадания истинного значения D в более сложную фигуру, формируемую множеством отрезков погрешностей. В этом случае количество комбинаций символов g и h описывается с помощью формулы бинома Ньютона третьего порядка:

$$(g + h)^3 = g^3 + 3g^2h + 3gh^2 + h^3 = ggg + ggh + hgg + ghg + hhg + ghh + hgh + hhh, \quad (3)$$

а соответствующая вероятность оценивается как $P = 6/8 = 0,75$. Очевидно, что при $n = 1$ вероятность P будет расти при увеличении избыточности измерений и может быть определена по формуле

$$P = (k - 2) / k, \quad (4)$$

где $k = 2^m$ — количество размещений с повторениями по формуле бинома Ньютона m -порядка; m — количество измерений.

Избыточные измерения в двумерном пространстве решений (плоскость, $n = 2$). Определение места судна относительно навигационных опасностей, каким бы способом оно не осуществлялось, входит в категорию самых важных задач судовождения, обеспечивающих безопасность мореплавания. *Хорошая морская практика* рекомендует для контроля процедуры определения координат обсервованной точки применять *избыточные измерения*. В практике классической навигации наиболее часто используются измерения навигационных параметров (НП) с единичной избыточностью. Из-за влияния погрешностей измерений на карте образуется некоторая область, ограниченная сторонами треугольника погрешностей, что является геометрической интерпретацией системы уравнений (1), а также аналогом *доверительного интервала*, в пределах которого может находиться место судна с определенной вероятностью P .

Исходя из предположения, что измерения отягощены только случайными погрешностями, для нахождения координат места судна систему (1) решают либо аналитически с помощью метода наименьших квадратов, либо графоаналитически, выполняя прокладку линий положения на навигационной карте или специальном планшете, либо не используют данную систему уравнений, осуществляя прокладку соответствующих изолиний на навигационной карте. В любом случае обсервованную точку определяют внутри образовавшегося треугольника. Вопрос состоит в том, *какова вероятность P нахождения истинной (эталонной) точки положения судна в этом треугольнике.*

Рассмотрим следующую ситуацию: примем начало прямоугольной декартовой системы координат в известной истинной точке C нахождения судна. Предположим, что координаты точки получены с помощью высокоточных средств навигации и поэтому могут использоваться как эталон для анализа качества других менее точных измерений, выполняемых для определения места судна. Точка C используется как опорная точка для формирования системы уравнений (1). Допустим, что в этой точке измерены три НП при условии, что их результаты отягощены только случайными погрешностями, которые при наличии положительных и отрицательных значений могут образовывать треугольники погрешностей различных размеров и ориентации. Для упрощения анализа комбинаций математических знаков погрешностей трех измерений распределим градиенты соответствующих навигационных функций в истинной точке равномерно по горизонту (рис. 2), принимая, что горизонтальная координатная линия является отрезком параллели, которая делит координатную плоскость на полуплоскости. Здесь направления градиентов навигационных функций обозначены

так же, как в одномерном случае, символом g , а противоположные им направления — символом h . Рассмотрим задачу с точки зрения комбинаторики.

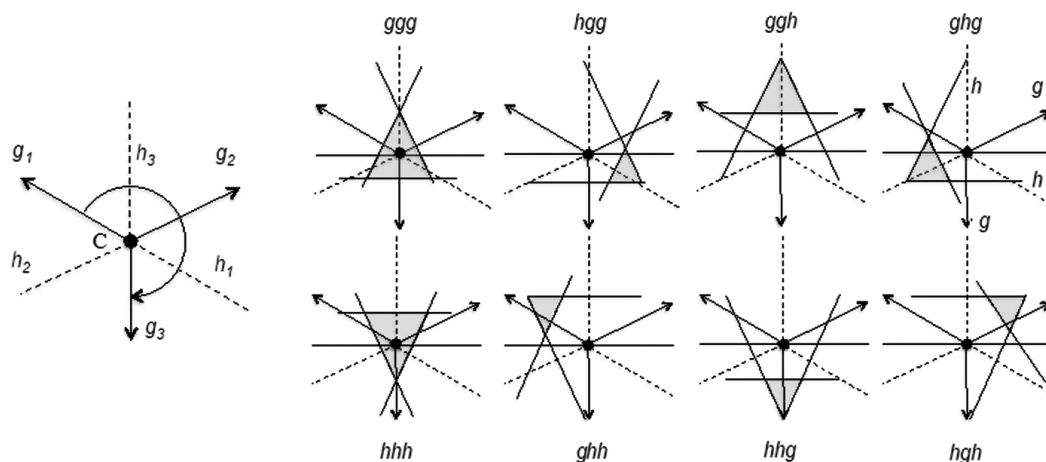


Рис. 2. Треугольники погрешностей при расположении градиентов навигационных функций в разных полуплоскостях (конфигурация 1)

В результате измерения трех НП и влияния случайных погрешностей возникает неопределенность, которую можно описать множеством возможных комбинаций погрешностей линий положения. Таких комбинаций всего восемь, из которых только две, как и на рис. 1, обеспечивают покрытие истинной точки треугольником погрешностей (см. рис. 2), т. е. вероятность P попадания истинной точки в треугольник теоретически равна 0,25. Это соответствует комбинациям символов ggg и hhh случайных погрешностей измерений при условии, что векторы-градиенты навигационных функций находятся в разных полуплоскостях относительно истинной параллели. Указанная вероятность зависит лишь от знаков погрешностей, а не от размеров треугольника погрешностей измерений. Алгебраически эта комбинаторная ситуация может быть описана также с помощью формулы бинома Ньютона третьей степени (3) с суммой биномиальных коэффициентов $k = 2^3 = 8$. По аналогии с первым примером выражение (3) подтверждает, что при $n = 2$ и $r = 1$ покрытие истинной точки обеспечивается только двумя комбинациями математических знаков погрешностей измерений, т. е. комбинациями ggg и hhh .

На рис. 3 показано расположение треугольников в случае, если все градиенты навигационных параметров расположены в одной полуплоскости относительно истинной параллели, хотя, в принципе, это может быть любая произвольная прямая. При такой ориентации градиентов только две комбинации символов: ghg и hgh в выражении (3), определяют попадание истинной точки в треугольник погрешностей.

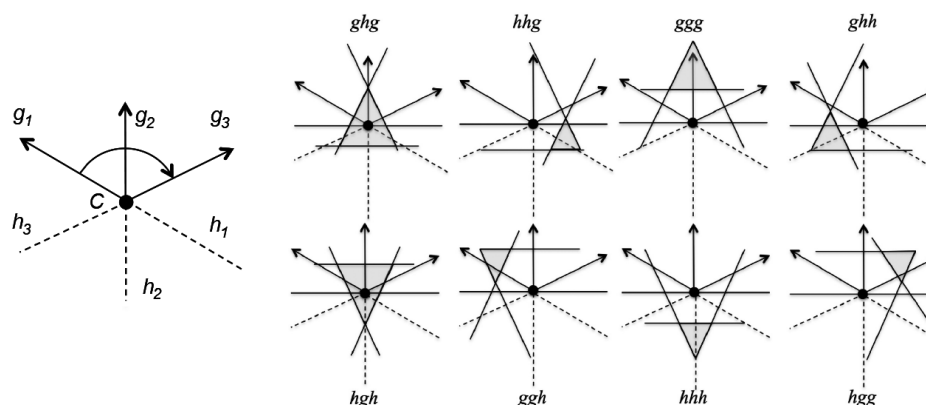


Рис. 3. Треугольники погрешностей при расположении всех градиентов навигационных функций в одной полуплоскости (конфигурация 2)

Таким образом, вероятность нахождения истинной точки в треугольнике погрешностей составляет 0,25 при единичной избыточности измерений НП и не зависит от конфигурации градиентов навигационных функций. Несомненно, что столь низкий уровень вероятности, оцениваемый по формуле

$$P = 2 / k, \quad (5)$$

накладывает ограничения на постановку ряда простейших навигационных задач, и, возможно, требует переосмысления методов их решения.

Очевидным является утверждение, что формула (5) применима для любой размерности пространства решений n при единичной избыточности измерений. На рис. 4 приведены результаты моделирования погрешностей измерений трех НП с помощью рандомизатора Excel, генерирующего случайную последовательность чисел по равномерному закону. В связи с тем, что влияние на исследуемую вероятность оказывают только знаки погрешностей для иллюстрации результата модули случайных погрешностей ЛП1 условно принимались равными единице.

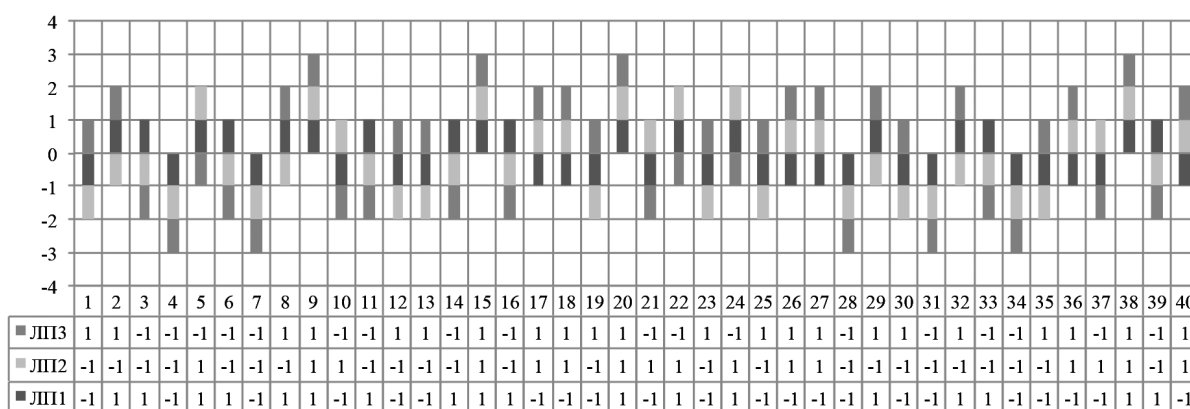


Рис. 4. Распределение математических знаков случайных погрешностей измерений трех линий положения

Из результатов моделирования следует, что комбинации знаков погрешностей линий положения в следующих блоках измерений: 4, 7, 9, 15, 20, 28, 31, 34, 38, формируют треугольники, накрывающие истинную точку при конфигурации 1 градиентов навигационных функций (см. рис. 2), а блоки комбинаций знаков 2, 8, 10, 21, 29, 32, 37 иллюстрируют накрытие истинной точки, если градиенты ориентированы по конфигурации 2 (см. рис. 3).

Избыточные измерения в трехмерном пространстве решений ($n = 3$, $r = 1$). Предположим, что во всех однородных измерениях НП присутствует неизвестная систематическая погрешность, которую необходимо определить, включив ее в вектор ΔX системы уравнений (1) наравне с координатами места судна. Формально это включение третьей координаты в вектор неизвестных. В данном случае для сохранения единичной избыточности ($r = 1$) необходимо выполнить четыре измерения, которые, как и в ранее рассмотренном случае, отягощены случайными погрешностями. Увеличение размерности пространства решений на единицу ($n = 3$) и сохранение единичной избыточности измерений ($m = 4$) не оказывает влияния на логику дальнейших рассуждений об истинной вероятности нахождения истинной точки в фигуре погрешностей, которая в данном случае является тетраэдром. Это простейшая фигура, образованная плоскостями положения в трехмерном пространстве решений системы (1). В данном случае разложение двучлена, состоящего из символов g и h в бином Ньютона, имеет следующий вид:

$$(g + h)^4 = g^4 + 4g^3h + 6g^2h^2 + 4gh^3 + h^4. \quad (6)$$

Данная формула показывает, что при расположении градиентов аналогично конфигурации 1 (см. рис. 2) только две комбинации: $gggg$ и $hhhh$, накрывают истинную точку положения судна.

При этом общее количество комбинаций увеличивается до шестнадцати, что объясняет снижение вероятности нахождения истинной точки в тетраэдре погрешностей по сравнению с отрезком и треугольником. Таким образом, вероятность попадания истинной точки в тетраэдр при соблюдении всех ранее изложенных предположений, в соответствии с формулой (5), составляет $P = 2/16 = 0,125$. Результат не меняется при расположении градиентов в одном полупространстве (конфигурация 2).

Моделирование вероятности накрытия истинных координат n -симплексом погрешностей.

При увеличении размерности вектора измерений (например, до $m = 5...6$ и более) и сохранении $r = 1$ формулы бинома Ньютона приобретают аналогичный вид и биномиальные коэффициенты могут быть собраны в так называемый *треугольник Паскаля* (табл. 1), в котором в каждой строке сумма биномиальных коэффициентов определяет число комбинаций математических знаков случайных погрешностей измерений. Здесь $P = 2/k$ — теоретическая вероятность нахождения истинной точки в фигуре погрешностей при $r = 1$; p — вероятность, полученная на основе результатов моделирования в сериях, каждая из которых составляет 100 блоков измерений.

Таблица 1

Бином Ньютона и треугольник Паскаля

№ п/п.	Бином Ньютона m -степени	$k = 2^m$	$r = 1$	
			P	p
1	$(g + h)^1 = g + h$	2		
2	$(g + h)^2 = g^2 + 2gh + h^2$ (отрезок)	4	0,5000	0,50
3	$(g + h)^3 = g^3 + 3g^2h + 3gh^2 + h^3$ (треугольник)	8	0,2500	0,25
4	$(g + h)^4 = g^4 + 4g^3h + 6g^2h^2 + 4gh^3 + h^4$ (тетраэдр)	16	0,1250	0,11
5	$(g + h)^5 = g^5 + 5g^4h + 10g^3h^2 + 10g^2h^3 + 5gh^4 + h^5$	32	0,0625	0,06
6	$(g + h)^6 = g^6 + 6g^5h + 15g^4h^2 + 20g^3h^3 + 15g^2h^4 + 6gh^5 + h^6$	64	0,0312	0,04
7	$(g + h)^7 = g^7 + 7g^6h + 21g^5h^2 + 35g^4h^3 + 35g^3h^4 + 21g^2h^5 + 7gh^6 + h^7$	128	0,0160	0,03
8	$(g + h)^8 = g^8 + 8g^7h + 28g^6h^2 + 56g^5h^3 + 70g^4h^4 + 56g^3h^5 + 28g^2h^6 + 8gh^7 + h^8$	256	0,0080	0,00
9	$(g + h)^9 = g^9 + 9g^8h + 36g^7h^2 + 84g^6h^3 + 126g^5h^4 + 126g^4h^5 + 84g^3h^6 + 36g^2h^7 + 9gh^8 + h^9$	512	0,0040	0,00
m	$(g + h)^m = C_m^0 g^m + C_m^1 g^{m-1}h + C_m^2 g^{m-2}h^2 + \dots + C_m^{m-1} g^1h^{m-1} + C_m^m h^m$	2^m		

Примечание. В нижней строке табл. 1 приведена обобщенная формула бинома Ньютона, описывающая комбинации положительных и отрицательных погрешностей m измерений навигационных параметров, где $C_m^0 g^m \dots C_m^m h^m$ — биномиальные коэффициенты.

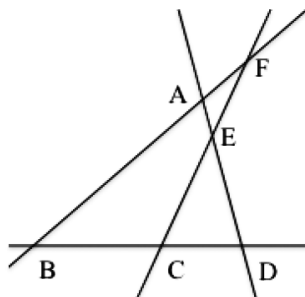
На основании результатов проведенного исследования можно сделать вывод о том, что при увеличении размерности пространства решений и сохранении $r = 1$ вероятность P нахождения истинной величины в n -симплексе погрешностей измерений уменьшается в два раза по сравнению с $(n - 1)$ -симплексом за счет увеличения в два раза количества комбинаций случайных погрешностей в векторе измерений ΔU , что является важной информацией. Используя терминологию оценки риска, можно утверждать, что при $r = 1$ любые методы осреднения измерений приводят к смещенной оценке результата, что эквивалентно для навигации понятию *потенциально-опасной ситуации*, которую необходимо контролировать.

Вероятность нахождения истинного места судна в фигуре погрешностей при $r > 1$. Рассмотрим задачу определения места судна, полагая, что выполнено четыре измерения ($r = 2$) и пять измерений ($r = 3$). В этих случаях в пространстве решений (плоскости) образуются более сложные фигуры погрешностей. При $r = 2$ это *2-комплекс*, состоящий из *2-симплексов* (треугольников) — рис. 5, а. Для $r = 3$ — это *3-комплекс*, количество треугольников в котором увеличивается до десяти (рис. 5, б).

Следуя ранее приведенной логике, можно предположить, что вероятность накрытия эталонной точки такими фигурами погрешностей должна увеличиться по сравнению с треугольником.

Комбинации знаков погрешностей измерений описываются, соответственно, строками 4 и 5 табл. 1, а вероятность P вычисляется с учетом избыточности измерений. Так, для $r = 2$ количество комбинаций линий положения, которые накрывают истинную точку C , составляет 8 из 16, т. е. $P = 8/16 = 0,5$. Для $r = 3$ таких комбинаций 24. Таким образом, при пяти линиях положения вероятность накрытия истинной точки фигурой, образованной случайными погрешностями измерений, составляет $P = 24/32 = 0,75$. Таким образом, с увеличением количества измерений наблюдается очевидный рост вероятности P .

а)



б)

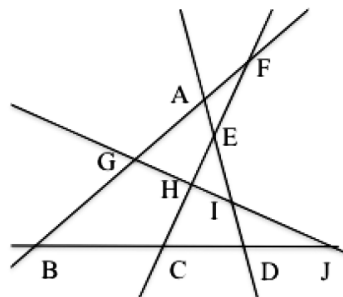


Рис. 5. Фигуры погрешностей на плоскости решений, образованные линиями положения: а — при $r = 2$; б — при $r = 3$

Аналогичные рассуждения справедливы для линейных пространств любых размерностей, образованных столбцами матрицы A в системе линейных уравнений навигационных функций (1).

Результаты (Results)

Итогом представленного в статье исследования является получение значений вероятностей накрытия истинной точки (истинных составляющих вектора неизвестных ΔX) фигурой, сформированной случайными погрешностями измерений (табл. 2).

Таблица 2

Вероятность накрытия истинной точки фигурами погрешностей

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

Полученная вероятность P определяется соотношением размерностей пространства решений n и избыточности измерений r в нем. Комбинаторная ситуация конкретного соотношения описывается соответствующей строкой треугольника Паскаля.

Обсуждение (Discussion)

В статье не рассматриваются вопросы точности определения координат места судна, но исследуется комбинаторный подход к оценке надежности рассчитываемых координат, основанный

на избыточности навигационных измерений и вероятности принадлежности истинных координат вектора ΔX фигуре погрешностей. Под *надежностью* координат места судна в статье понимается вероятность P нахождения истинного значения координат в *доверительном интервале*, сформированном текущей фигурой погрешностей измерений в n -мерном пространстве решений системы уравнений (1) при различной избыточности измерений r навигационных параметров. Такой *доверительный интервал* существует только на момент избыточных измерений. Геометрически это случайный, меняющийся во времени *симплекс / комплекс*, так как он сформирован случайными погрешностями измерений. Несомненно, мера Лебега¹ такого интервала связана с точностью искомых координат места судна, а не с вероятностью P . Тем не менее такая интерпретация вероятности P нахождения истинной точки в реальном доверительном интервале создает предпосылки для необходимости осуществления контроля за количеством избыточных измерений с целью получения теоретически достоверного результата.

Комбинаторный подход к оценке исследуемой вероятности использует конечное множество дискретных измерений, что отличает его от подходов к оценке вероятности, основанных на принципе чрезмерного обобщения параметров непрерывных законов распределения (например, закона Гаусса на конкретные измерения). Комбинаторный подход с практической точки зрения описывает более реалистично текущие навигационные измерения. Выполненное исследование содержит следующие ограничения:

1. Вероятность P нахождения истинной точки в фигуре погрешностей анализируется только на основе свойства симметричности распределения математических знаков случайных погрешностей и не затрагивает вопросов точности определения места судна.
2. Комбинаторный метод оценки вероятности, основанный на схеме Бернулли, предполагает, что погрешности измерений являются независимыми.
3. Результаты исследования не учитывают влияние величин и знаков систематических погрешностей измерений на вероятность накрытия истинной точки фигурой погрешностей.

Выводы (Summary)

Несмотря на то, что случайные погрешности измерений современных средств навигации достаточно малы, тем не менее для правильного восприятия измерительной навигационной информации, а также понимания и прогнозирования динамики развития навигационных сценариев целесообразно учитывать следующие полученные в данной работе результаты:

1. Низкий уровень вероятности нахождения места судна (координат вектора ΔX) в фигуре, образованной случайными погрешностями измерений при их единичной избыточности, не обеспечивает достаточной надежности оценки искомых координат, что независимо от методов их обработки способствует возникновению смещенных оценок и может квалифицироваться как *потенциально-опасная навигационная ситуация*, развитие которой при определенных обстоятельствах способно привести к навигационному происшествию.
2. Для повышения этого уровня вероятности, т. е. для увеличения *надежности* *обсервованных координат* необходимо обеспечить увеличение количества измерений навигационных параметров. Число измерений m , при указанных ранее условиях, не должно быть меньше величины $2n + 1$, где n — размерность пространства решений системы (1). Этот результат обеспечивает вероятность попадания истинной точки в указанный *доверительный интервал* более 90 % и является «ключом» процедуры контроля уровня необходимой избыточности навигационных измерений, особенно при плавании в сложных навигационных районах.
3. При действии случайных погрешностей измерений вероятность попадания истинной точки в указанный доверительный интервал не зависит от геометрических размеров и размерности фигуры погрешностей (симплекса / комплекса), а также от взаимной ориентации градиентов навигационных функций, используемых для определения места судна. Данная вероятность зависит только

¹ Мера Лебега — мера, обобщающая понятия длины отрезка, площади фигуры и объема тела на произвольное n -мерное евклидово пространство.

от количества комбинаций математических знаков погрешностей измерений, определяемых соответствующими коэффициентами бинома Ньютона. В пространстве решений любой размерности при единичной избыточности измерений существуют только две комбинации случайных погрешностей, формирующих фигуру (текущий доверительный интервал), включающую истинное значение координат вектора ΔX .

4. Важным результатом является то, что выводы распространяются как на однородные, так и на разнородные измерения, поскольку ключевым фактором служит лишь комбинация математических знаков случайных погрешностей измерений.

5. Увеличение размерности пространства измерений m при сохранении единичной избыточности системы уравнений (1) приводит к последовательному уменьшению вероятности нахождения истинного положения места судна в симплексе погрешностей измерений за счет увеличения количества комбинаций математических знаков $k = 2^m$ случайных погрешностей измерений навигационных параметров.

6. Полученные результаты побуждают к переосмыслению и дальнейшему исследованию некоторых основ классической навигации, касающихся достаточности и избыточности измерений, методов их обработки для расчета координат места судна, а также правильности понимания ключевых идей, заложенных в функционирование современной навигационной техники.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Nwigwe T. Statistical Analysis of Bulk Carrier Accident from 2011 to 2020/ T. Nwigwe, M. Kiyokazu // *TransNav: International Journal on Marine Navigation and Safety of Sea Transportation*. — 2022. — Vol. 16. — No. 1. — Pp. 153–157. DOI: 10.12716/1001.16.01.18.
2. Kerbrat A. Analysis of Navigational Casualties within European Waters and Case Study / A. Kerbrat // *TransNav: International Journal on Marine Navigation and Safety of Sea Transportation*. — 2021. — Vol. 15. — No. 4. — Pp. 729–736. DOI: 10.12716/1001.15.04.02.
3. Galić S. A Chronological Overview of Scientific Research on Ship Grounding Frequency Estimation Models / S. Galić, Z. Lušić, S. Mladenović, A. Gudelj // *Journal of Marine Science and Engineering*. — 2022. — Vol. 10. — Is. 2. — Pp. 207. DOI: 10.3390/jmse10020207.
4. Логиновский В. А. Вероятность принадлежности истинной точки фигуре погрешностей / В. А. Логиновский // Методы и технические средства навигации: сб. науч. тр. / Государственная морская академия имени адмирала С. О. Макарова. — М.: Мортехинформреклама, 1993. — С. 41–48.
5. Strang G. Linear algebra and its application / G. Strang. — 3d edition. — Thomson Learning, Inc., 1988. — 505 p.
6. Devriendt K. The simplex geometry of graphs / K. Devriendt, P. Van Mieghem // *Journal of Complex Networks*. — 2019. — Vol. 7. — Is. 4. — Pp. 469–490. DOI: 10.1093/comnet/cny036.
7. Карпенко А. П. Метод комплексов. МГТУ им. Н. Э. Баумана, кафедра САПР (2003–2019) [Электронный ресурс] / А. П. Карпенко. — Режим доступа: <http://195.19.40.251/?cnt/?doc=BCRXQY6RLJMZHRT8VUX> (дата обращения: 20.12.2022).
8. Закс Ш. Теория статистических выводов / Ш. Закс. — М.: МИР, 1975. — 779 с.
9. Филатов О. В. Треугольник Паскаля — основной объект теории вероятностей и комбинаторики длинных последовательностей / О. В. Филатов // Проблемы современной науки и образования. — 2020. — № 9 (154). — С. 28–37. DOI: 10.24411/2304-2338-2020-10901.
10. Кудряшов Ю. Г. Комбинаторика-2. Бином Ньютона [Электронный ресурс] / Ю. Г. Кудряшов, И. В. Щуров, И. А. Хованская. — Режим доступа: <http://math-info.hse.ru/f/2011-12/auto-old/ling/lecture3.pdf> (дата обращения: 20.12.2022).

REFERENCES

1. Nwigwe, T., and M. Kiyokazu. “Statistical Analysis of Bulk Carrier Accident from 2011 to 2020.” *TransNav: International Journal on Marine Navigation and Safety of Sea Transportation* 16.1 (2022): 153–157. DOI: 10.12716/1001.16.01.18.

2. Kerbrat, Agnieszka. "Analysis of Navigational Casualties within European Waters and Case Study." *TransNav: International Journal on Marine Navigation and Safety of Sea Transportation* 15.4 (2021): 729–736. DOI: 10.12716/1001.15.04.02
3. Galić, Stipe, Zvonimir Lušić, Saša Mladenović, and Anita Gudelj. "A Chronological Overview of Scientific Research on Ship Grounding Frequency Estimation Models." *Journal of Marine Science and Engineering* 10.2 (2022): 207. DOI: 10.3390/jmse10020207.
4. Loginovskii, V. A. "Veroyatnost' prinadlezhnosti istinnoi točki figure pogreshnostei." *Metody i tekhnicheskie sredstva navigatsii. Sbornik nauchnykh trudov*. M.: Mortechnikinformreklama, 1993. 41–48.
5. Strang, Gilbert. *Linear algebra and its application*. 3d edition. Thomson Learning, Inc., 1988.
6. Devriendt, Karel, and Piet Van Mieghem. "The simplex geometry of graphs." *Journal of Complex Networks* 7.4 (2019): 469–490. DOI: 10.1093/comnet/cny036.
7. Karpenko, A. P. Metod kompleksov. Web. 20 Dec. 2022 <<http://195.19.40.251/?cnt/?doc=BCRXQY6RLJ MJHZRT8VUX>>.
8. Zaks, Sh. *Teoriya statisticheskikh vyvodov*. M.: MIR, 1975.
9. Filatov, Oleg Vladimirovich. "Pascal's triangle — the main object of the theory of probability and combinatorics of long sequences." *Problemy sovremennoi nauki i obrazovaniya* 9(154) (2020): 28–37. DOI: 10.24411/2304-2338-2020-10901.
10. Kudryashov, Yu. G., I. V. Shhurov, and I. A. Xovanskaya. Kombinatorika-2. Binom N'yutona. Web. 20 Dec. 2022 <<http://math-info.hse.ru/f/2011-12/auto-old/ling/lecture3.pdf>>.

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРЕ

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

INFORMATION ABOUT THE AUTHOR

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

Статья поступила в редакцию 10 января 2023 г.
Received: January 10, 2023.

SEABED RELIEF-BASED VESSEL POSITION FIXING WITH A NEURAL NETWORK

V. V. Deryabin

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

A seabed relief-based vessel position fixing system on the basis of a neural network is proposed. The neural network satisfies the conditions of the universal approximation theorem and has one hidden layer. The hidden neurons have hyperbolic tangent activation functions. The model is constructed for 1-D case that can be considered as vessel motion throw a narrow channel or fairway. A sequence of depth derivatives (in relation to the coordinate) is fed to the network input. The depth is assumed to be measured with an echo-sounder. The vessel linear coordinate registered for the last depth derivative is formed on the network output. The training set contains not only data presumably registered at the stage of preliminary depth survey but also their noise-added versions obtained with the use of a random number generator. The validation set contains the survey data only. The Adamax algorithm is implemented for the neural network training. The maximum of absolute value of the prediction error is used as a performance criterion of the net. Modeling has been conducted in Python with Tensorflow. The depth is considered to be a polynomial function of the coordinate at each path region. So, the depth derivatives can be calculated analytically. As the result it is possible to state that the neural network predicts a vessel position with acceptable accuracy even in input signal noise conditions. Moreover, the neural network architecture of the radial-basis functions has been examined, but it is not possible to achieve acceptable accuracy by using it. The conducted investigations of the influences of a mini-batch size and learning rate values on the accuracy has shown that these parameters have the significant impact and an issue of their choice remains opened and actual in the framework of the task.

Keywords: vessel, position, depth, neural network, machine learning, autonomous mode, seabed relief, calculation algorithm.

For citation:

Deryabin, Victor V. "Seabed relief-based vessel position fixing with a neural network." *Vestnik Gosudarstvennogo universiteta morskogo i rechnogo flota imeni admiral S. O. Makarova* 15.2 (2023): 172–179. DOI: 10.21821/2309-5180-2023-15-2-172-17.

УДК 656.61.052:527.62:004.032.26

ОПРЕДЕЛЕНИЕ МЕСТОПОЛОЖЕНИЯ СУДНА ПО РЕЛЬЕФУ ДНА ПРИ ПОМОЩИ НЕЙРОННОЙ СЕТИ

В. В. Дерябин

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

Предложена модель определения места судна по рельефу дна на основе нейронной сети прямого распространения, удовлетворяющей условию универсальной аппроксимации. Рассматриваемая нейронная сеть имеет один скрытый слой с нейронами, обладающими функциями активации в виде гиперболического тангенса. Данная модель реализована для одномерного случая, соответствующего движению судна в узком канале или на фарватере. На вход сети поступает последовательность производных глубины (по координате), измеренной эхолотом. На выходе получается значение линейной координаты судна на момент определения последней производной глубины. Обучающая выборка содержит не только записи, полученные по результатам предполагаемых предварительных промеров, но и их зашумленные видоизменения, полученные при помощи датчиков случайных чисел. Контрольная выборка содержит исключительно промерные данные. Для обучения нейронной сети используется метод Adamax. В качестве критерия качества работы нейронной сети используется наибольшее значение модуля ошибки координаты на контрольной выборке. Моделирование выполнялось на языке программирования Python с библиотекой Tensorflow. Глубина аквато-

рии представлена в виде полиномиальной функции координаты, что позволяет вычислять ее производную аналитически. Проведено моделирование, результаты которого свидетельствуют об удовлетворительной точности прогноза координаты нейронной сетью в условиях наличия погрешностей входного сигнала. Выполненные исследования зависимости качества обучения от размера мини-пакета и коэффициента скорости обучения позволяют сделать вывод о том, что данные параметры оказывают существенное влияние на результат, поэтому вопрос их оптимального выбора остается нерешенным и актуальным в рамках рассматриваемой задачи.

Ключевые слова: судно, местоположение, глубина, нейронная сеть, машинное обучение, автономный режим, рельеф дна, алгоритм расчета

Для цитирования:

Дерябин В. В. Определение местоположения судна по рельефу дна при помощи нейронной сети / В. В. Дерябин // Вестник Государственного университета морского и речного флота имени адмирала С. О. Макарова. — 2023. — Т. 15. — № 2. — С. 172–179. DOI: 10.21821/2309-5180-2023-15-2-172-17.

Введение (Introduction)

Определение местоположения судна по рельефу дна может использоваться для обеспечения его навигации в автономном режиме, без использования внешней информации. В качестве датчика навигационной информации при этом может выступать обычный эхолот, измеряющий только глубину под килем, который установлен на многих судах торгового флота.

В основе систем навигации по рельефу лежат алгоритмы сравнения текущей последовательности глубин, полученной по результатам измерений, с реализациями, полученными заранее на основе предварительно выполненных промеров [1], [2]. Такие алгоритмы относят к алгоритмам корреляционно-экстремальной навигации, точнее к поисковым методам. Отличительной особенностью этих методов является *требовательность* к вычислительным ресурсам для обеспечения навигации в режиме реального времени. Алгоритмы расчета взаимной корреляционной функции прямого поиска относятся к классу требовательных в вычислительном плане.

Для повышения скорости расчетов, критично важной с точки зрения навигации в режиме реального времени, представляется разработка других методов, имеющих меньшую вычислительную сложность. В качестве таковых могут рассматриваться нейронные сети, известные своей способностью к быстрым вычислениям. Идея использования нейронных сетей в задачах корреляционно-экстремальной навигации не нова. В частности, в работе [3] предлагается использовать нейронные сети для решения задачи прогнозирования временных рядов, элементами которых являются энергетические характеристики поверхности местности, с использованием которой осуществляется навигация. В работе [4] предлагается построение нейронной сети, позволяющей определять координаты судна на основе данных от магнитных и гидроакустических маячков, заранее установленных на дне. К задачам навигации по рельефу дна близки задачи моделирования геометрии рельефа. Например, в статье [5] рассматриваются нейронная сеть, решающая задачу моделирования рельефа местности при помощи расчета высоты по известным горизонтальным координатам. В статье [6] рассматриваются вопросы моделирования рельефа на основе сплайнов, которые тоже в определенной степени могут иметь нейросетевую интерпретацию. Различные подходы к решению задач батиметрической навигации содержатся также в исследованиях [7]–[9].

В указанных ранее исследованиях отсутствуют непосредственные решения задачи навигации судна по рельефу на основе нейронной сети с использованием обычного эхолота. Нейронная сеть (или близкая структура), если и используется, то лишь в качестве вспомогательного инструмента или в случае, когда для работы алгоритма нужны дополнительные технические средства. В настоящей статье предлагается нейросетевая модель определения места судна, которая непосредственно прогнозирует его координату на основе данных о рельефе дна.

Методы и материалы (Methods and Materials)

Постановка задачи. Ограничимся в работе рассмотрением одномерного случая. Пусть судно совершает движение в одномерном пространстве, двигаясь вдоль оси Ox из некоторой начальной

точки с постоянной скоростью хода V . Такая ситуация может наблюдаться во время движения вдоль оси некоторого узкого прохода или фарватера. По мере движения судно проходит последовательность точек $x_0 = 0, x_1, x_2, \dots, x_n = l$, где l — общее расстояние, пройденное судном вдоль направления оси Ox . Указанной последовательности точек соответствует некоторая последовательность глубин: $d_0, d_1, d_2, \dots, d_n$, элементы которой определены заранее по результатам гидрографических промеров. Пусть в режиме навигации на судне при помощи эхолота измеряется подмножество, состоящее из p глубин: $\{D\} = d_k, d_{k+1}, d_{k+2}, \dots, d_{k+p-1}$ в некотором интервале времени. Возникает общая задача — на основе последовательности $\{D\}$ определить текущую координату x_{k+p-1} . Иными словами, необходимо по последовательности измеренных значений глубин определить координату на момент последнего поступившего измерения.

Указанная ранее общая постановка задачи может быть использована в непосредственном ее виде лишь в случае, когда уровень моря в районе плавания остается неизменным, что довольно редко наблюдается на практике. Даже в районах, где приливы практически отсутствуют, могут наблюдаться колебания уровня моря, связанные с нагонными ветровыми процессами. В связи с данным обстоятельством следует перейти к дифференциальной постановке задачи, т. е. от значений глубины к ее производной. Таким образом, необходимо решить следующую задачу: по последовательности производных глубин: $\{D'\} = d'_k, d'_{k+1}, d'_{k+2}, \dots, d'_{k+p-1}$ определить текущую координату x_{k+p-1} .

Сформулированная задача может быть решена *методом прямого поиска*, при котором полным перебором всех подпоследовательностей из общей последовательности глубин находится наиболее близкая (по заданной метрике) к измеренной реализации, для последнего элемента которой выбирается глубина. Можно записать, что $x_{k+p-1} = f(d'_k, d'_{k+1}, d'_{k+2}, \dots, d'_{k+p-1})$, т. е. текущее значение координаты является функцией текущего значения производной глубины и еще нескольких более ранних ее значений. Из теории нейронных сетей известно, что нейронные сети могут приблизить любую непрерывную функцию с любой наперед заданной точностью [10]–[12]. Таким образом, возникает задача реализации функционального преобразования $f(\cdot)$ на основе нейронной сети.

Архитектура нейронной сети. Как известно, нейронная сеть с одним скрытым слоем и полными связями обладает возможностью аппроксимировать любую непрерывную функцию с любой заданной точностью. Скрытый слой должен содержать нейроны, имеющие функции активации, которые не являются полиномами. Выходной слой имеет единственный нейрон с тождественной функцией активации. К сожалению, теоремы об аппроксимации нейронных сетей не дают ответа на вопрос о количестве нейронов, необходимых для обеспечения заданной точности. Количество нейронов зависит от вида приближаемой функции, точный вид которой, как правило, неизвестен. В связи с этим вопрос о количестве скрытых нейронов обычно решается опытным путем. На вход сети поступает вектор $d'_k, d'_{k+1}, d'_{k+2}, \dots, d'_{k+p-1}$, а на выходе получается текущее значение глубины x_{k+p-1} .

Формирование набора учебных данных. Набор учебных данных формируется следующим образом. На основе предварительно выполненных промеров глубин вдоль всего отрезка плавания оси Ox формируется генеральная последовательность $d_0, d_1, d_2, \dots, d_n$. Численным дифференцированием формируется соответствующая генеральная последовательность производных. Выбирается количество производных в подпоследовательности $\{D'\}$, равное $p - 1$. Формируется матрица входного сигнала, каждая строка которой соответствует $p - 1$ подряд идущим значениям производной глубины. Для каждого из значений производных в правом столбце матрицы соотносятся значения координат, которые и формируют *выходной вектор*.

Указанных данных, казалось бы, должно быть достаточно для настройки сети. Однако вопрос осложняется тем, что при этом отсутствует выборка для контроля обобщающих свойств сети, необходимого во избежание переобучения. Более того, в действительности производные могут быть получены с ограниченной точностью. Решить эти две проблемы можно следующим образом: к каждому элементу входной матрицы необходимо прибавить случайную погрешность, а затем вновь получившуюся матрицу присоединить снизу к исходной матрице. Выходной вектор

остаётся прежним (без погрешностей) и также присоединяется к концу первичного вектора. Процедуру необходимо повторить n_random раз. Случайная ошибка входа генерируется по закону равномерного распределения с величиной в процентном соотношении $percent_random$ от модуля производной глубины. В качестве контрольной выборки используются данные без смоделированных погрешностей, т. е. фактически записанные данные на стадии предварительного промера акватории.

Алгоритм обучения. В качестве алгоритма обучения используется Adamax — модификация алгоритма Adam [13]. Величина параметра скорости обучения выбрана равной 0,01. Все остальные параметры взяты по умолчанию в TensorFlow (v. 2.9.1). Указанный алгоритм предполагает также, что обучение может быть реализовано в мини-пакетном режиме. Размер мини-пакета был выбран равным десяти.

Результаты (Results)

Компьютерное моделирование. Для проверки идеи возможности использования нейронной сети для задачи навигации по рельефу дна выполним моделирование следующим образом. Рассмотрим движение судна вдоль оси Ox . Ось пересекает десять районов, в каждом из которых зависимость глубины от координаты представляется полиномом второй степени, коэффициенты которого индивидуальны для каждого участка и задаются случайным образом из интервалов от $-0,1$ до $0,1$ (для коэффициента первой степени) и от $-0,01$ до $0,01$ (для коэффициента второй степени). Кроме того, коэффициенты должны удовлетворять следующим условиям:

- глубина на каждом отрезке должна находиться в пределах 50–150 % от среднего уровня (10 м);
- наибольшее значение глубины на отрезке должно быть не менее 130 % по отношению к среднему уровню, наименьшее — не более 70 % по отношению к тому же уровню;
- при переходе от одного отрезка к другому должна быть обеспечена непрерывность функции, выражающей зависимость глубины от координаты x .

Указанные условия обеспечиваются моделированием. Организуется цикл, критерием выхода из которого является выполнение первых двух условий. Моделирование выполняется в Python. В результате получаются дискретные значения кусочно-полиномиальной функции глубины от координаты x .

Для каждого района выполняется 300 измерений глубин. Предполагается, что измерения выполняются в равноотстоящих точках на оси Ox . Таким образом, общая протяженность прямолинейного маршрута составляет примерно 3000 м, если предположить, что измерения глубины берутся с интервалом 1 м, что, в принципе, не обязательно, он может быть и другим, выбранным исходя из выраженности рельефа на стадии промеров. Производные глубин, формирующие входной сигнал, определяются точно, так как известен вид полинома, описывающего динамику глубины на каждом участке. Берется 100 значений производных, т. е. $p = 101$, по которым определяется глубина. Значения $n_random = 10$, $percent_random = 1$ %. Используется нейронная сеть описанной ранее архитектуры со 100 скрытыми нейронами. В качестве функции активации указанных нейронов используется гиперболический тангенс.

Процесс обучения выполняется в соответствии с алгоритмом, описанным ранее. Особенность заключается в том, что на каждой итерации фиксируется не только средний квадрат ошибки (минимизируемая функция), но и наибольшее значение модуля ошибки определения координаты x , при этом лучшее состояние сети в соответствии с данным критерием сохраняется. Общее количество итераций составляет 1000. Размер обучающей выборки составил 31911 образцов, а размер контрольной выборки — 2901. Параметр скорости обучения алгоритма Adamax был выбран равным 0,01. В качестве библиотеки обучения была выбрана Keras (Tensorflow).

По прошествии 1000 итераций наибольший модуль ошибки: 260,75 м на контрольной выборке, был достигнут после 973-й итерации. Состояние сети, соответствующее данной итерации, было сохранено как оптимальное. Средний модуль ошибки составил для указанного состояния сети 51,73 м на контрольной выборке. График процесса обучения приведен на рисунке.

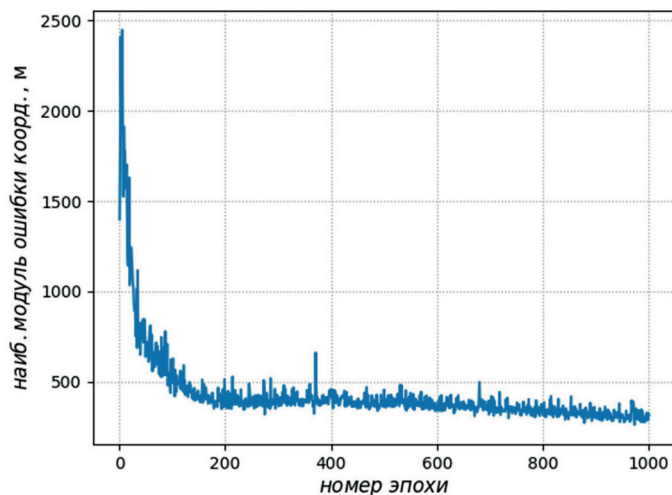


График процесса обучения нейронной сети

После обучения сеть проходит дополнительное тестирование на образцах, полученных в результате прибавления к входной выборке 1 %-го уровня шума. Получены следующие результаты:

- средний модуль ошибки 53,92 м;
- наибольший модуль ошибки 323,87 м.

Рассмотрим еще одну архитектуру нейронных сетей — архитектуру на основе радиальных базисных функций (РБФ-сеть). Причем будем рассматривать такой вариант РБФ-сети, при котором центры радиальных базисных функций сами являются настраиваемыми параметрами. Повторим моделирование со всеми параметрами, которые были обозначены ранее для сети персептронного типа. Для РБФ-сети коэффициент, характеризующий степень затухания функции Гаусса при удалении от ее центра, выбран равным единице. К сожалению, результаты обучения сети не позволяют судить о ее способности прогнозировать координату судна с приемлемой точностью — на контрольной выборке наибольшее значение модуля ошибки координаты достигает 1547 м, что составляет примерно половину от общей протяженности оси канала.

Рассмотрим более подробно первый вариант нейронной сети. Изучим зависимость качества обучения от размера мини-пакета. Будем варьировать данный параметр в соответствии с приведенной последовательностью: 1, 100, 1000, 10000 и 31911. Размер мини-пакета 10 был рассмотрен ранее. Следует отметить, что размер мини-пакета 1 соответствует последовательному режиму обучения (методу стохастического градиента), а 31911 — пакетному режиму. Результаты представлены в табл. 1.

Таблица 1

Зависимость результатов обучения от размера мини-пакета

Размер мини-пакета	Наибольший модуль ошибки (шум), м	Средний модуль ошибки (шум), м
1	1433,73	733,89
10	323,87	53,92
100	289,77	33,51
1000	1150,13	466,23
10000	1140,97	372,88
31911	1486,34	724,73

Как следует из приведенной таблицы, удовлетворительные результаты определения координаты получаются при использовании размеров мини-пакета 10 и 100. При этом предельные случаи (последовательный и пакетный режимы) обнаруживают самую худшую точность.

Исследуем теперь зависимость сходимости алгоритма настройки нейронной сети от параметра скорости обучения (*learning_rate*), выбрав 100 образцов в мини-пакете, что соответствует наиболее точному варианту в соответствии с табл. 1. Результаты представлены в табл. 2.

Таблица 2

Зависимость результатов обучения от learning_rate

Значение learning_rate	Наибольший модуль ошибки (шум), м	Средний модуль ошибки (шум), м
1	774,17	130,22
1/10	978,07	261,96
1/100	289,77	33,51
1/1000	1443,0	711,06
1/10000	1457,08	724,74
1/100000	1432,12	727,58

Лучшие результаты, приведенные в табл. 2, получены для значения параметра скорости обучения 0,01, которое и было выбрано ранее для десяти образцов в мини-пакете.

Обсуждение (Discussion)

Приведенные результаты показывают, что предлагаемая модель может использоваться для определения места судна по рельефу дна. Если считать, что общая протяженность плавания составляет 3000 м, то относительная погрешность — не более 10 %. При этом учитываются возможные погрешности определения производных глубины, на основе которых сеть определяет значение координаты.

Отдельно следует рассмотреть вопрос о погрешностях определения входного сигнала сети. Во-первых, эти погрешности возникают в результате неточного определения глубин эхолотом (ошибки измерений). Во-вторых, имеют место ошибки численного дифференцирования глубины. В-третьих, ошибки возникают в результате несоответствия эталонной координатной шкалы измерений фактической, так как взять глубину в точности в той точке, где она была измерена на стадии промера, не представляется возможным. Уменьшение координатного шага измерений глубин на стадии промера, конечно, приводит к уменьшению данной составляющей ошибки. Наконец, на точность измерения входа также оказывает влияние скорость движения судна, так как временной интервал измерения глубин будет определяться именно ею. Погрешность определения скорости будет вносить погрешности в место судна, полученное на основе измерения глубин предлагаемым способом.

Рассмотренный одномерный случай имеет практическое значение, так как при добавлении второй координаты каждой последовательности глубины (или ее производной) также соответствует точка на плоскости, задаваемая уже двумя числами — координатами. Конечно, при переходе к плоскости увеличивается объем данных, повышается вероятность неоднозначностей, что будет усложнять процесс обучения для достижения заданной точности, но при этом принцип остается неизменным.

Сравнивать работу нейронной сети с классическим метрическим алгоритмом на стадии моделирования, наверное, не имеет особого смысла. Понятно, что он будет точнее нейронной сети, так как проверяются все возможные подпоследовательности на близость с измеренной. Не менее понятно и то, что при большом объеме данных метрический алгоритм будет, скорее всего, более медленным, чем нейронная сеть, или вовсе непригодным для реализации с учетом ограничений вычислительных возможностей судового компьютера. Также необходимо отметить, что точность предлагаемой модели будет ухудшаться по мере того, как меняется рельеф дна, что характерно, например, для песчаных грунтов при наличии течений. Указанное обстоятельство является существенным ограничением модели, которая может долго (без дополнительных промеров) применяться только для твердых грунтов (например, каменистых), не подверженных существенным изменениям во времени. Тем не менее применение модели для изменяющихся во времени грунтов также возможно, но точность ее будет в таком случае зависеть от частоты выполнения предварительных промеров, т. е. от того, насколько используемые промеры актуальны на момент применения модели.

Заключение (Conclusion)

Предложена модель определения места судна по рельефу дна на основе нейронной сети прямого распространения с полными связями (многослойного персептрона) для одномерного случая. Принимая на вход последовательность производных глубин, нейронная сеть прогнозирует координату судна. Результаты моделирования позволяют судить об удовлетворительной точности сети. Проведенные исследования зависимости качества обучения от размера мини-пакета и коэффициента скорости обучения позволяют сделать вывод о том, что указанные параметры оказывают существенное влияние на результат, поэтому вопрос их оптимального выбора остается открытым и актуальным в рамках решаемой задачи. Рассмотрено также решение данного вопроса на основе сетей с радиальными базисными функциями, точность которых оказалась неудовлетворительной.

В качестве дальнейших направлений исследования в первую очередь необходимо указать уменьшение ошибок системы при высоком уровне шумов входных данных. Повышение точности может быть достигнуто на каждом из этапов построения модели, а не только на стадии поиска оптимальной структуры. После того как необходимая точность будет достигнута, можно переходить к более практически значимому двумерному случаю. Другим возможным направлением исследований следует считать поиск путей перехода от производных глубин к самим глубинам для устранения ошибок численного дифференцирования. При этом модель должна учитывать возможные колебания уровня моря.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Ключева С. Ф. Синтез алгоритмов батиметрических систем навигации / С. Ф. Ключева, В. В. Завьялов. — Владивосток: Мор. гос. ун-т, 2013. — 132 с.
2. Степанов О. А. Методы оценки потенциальной точности в корреляционно-экстремальных навигационных системах: аналитический обзор / О. А. Степанов. — СПб.: ЦНИИ «Электроприбор», 1993. — 84 с.
3. Каменев А. А. Применение искусственных нейронных сетей при моделировании спектроэнергетических характеристик местности для систем технического зрения с корреляционно-экстремальными алгоритмами навигации / А. А. Каменев, А. Ю. Тонышев // СПбНТОРЭС: тр. ежегодной НТК. — 2021. — № 1(76). — С. 259–262.
4. Hou G. A Novel Underwater Simultaneous Localization and Mapping Online Algorithm Based on Neural Network / G. Hou, Q. Shao, B. Zou, L. Dai, Z. Zhang, Z. Mu, Y. Zhang, J. Zhai // ISPRS International Journal of Geo-Information. — 2019. — Vol. 9. — Is. 1. — Pp. 5. DOI: 10.3390/ijgi9010005.
5. Боронников Д. А. Нейросетевой алгоритм организации пространственных данных о рельефе местности / Д. А. Боронников, Д. В. Пантюхин, С. В. Данько // Известия МГТУ МАМИ. — 2013. — Т. 1. — № 3 (17). — С. 157–164.
6. Ююкин И. В. Сплайновая модель оперирования гридированными данными как принцип электронного картографирования топографии морского дна / И. В. Ююкин // Вестник Государственного университета морского и речного флота имени адмирала С. О. Макарова. — 2022. — Т. 14. — № 5. — С. 656–675. DOI: 10.21821/2309-5180-2022-14-5-656-675.
7. Ling Y. Active Bathymetric SLAM for autonomous underwater exploration / Y. Ling, Y. Li, T. Ma, Z. Cong, S. Xu, Z. Li // Applied Ocean Research. — 2023. — Vol. 130. — Pp. 103439. DOI: 10.1016/j.apor.2022.103439.
8. Ma T. AUV robust bathymetric simultaneous localization and mapping / T. Ma, Y. Li, R. Wang, Z. Cong, Y. Gong // Ocean Engineering. — 2018. — Vol. 166. — Pp. 336–349. DOI: 10.1016/j.oceaneng.2018.08.029.
9. Norgren P. A multibeam-based SLAM algorithm for iceberg mapping using AUVs / P. Norgren, R. Skjetne // IEEE Access. — 2018. — Vol. 6. — Pp. 26318–26337. DOI: 10.1109/ACCESS.2018.2830819.
10. Haykin S. Neural Networks and Learning Machines / S. Haykin. — New Jersey: Pearson, 2009. — 936 p.
11. Hornik K. Some new results on neural network approximation / K. Hornik // Neural Networks. — 1993. — Vol. 6. — Is. 8. — Pp. 1069–1072. DOI: 10.1016/S0893-6080(09)80018-X.
12. Pinkus A. Approximation theory of the MLP model in neural networks / A. Pinkus // Acta Numerica. — 1999. — Vol. 8. — Pp. 143–195. DOI: 10.1017/S0962492900002919.
13. Kingma D. P. Adam: A method for stochastic optimization / D. P. Kingma, J. Ba // 3rd International Conference on Learning Representations. — 2015. DOI: 10.48550/arXiv.1412.6980.

REFERENCES

1. Klyueva, S. F., and V. V. Zav'yalov. *Sintez algoritmov batimetriceskikh sistem navigatsii*. Vladivostok: Mor. gos. un-t, 2013.
2. Stepanov, O. A. *Metody otsenki potentsial'noi tochnosti v korrelyatsionno-ekstremal'nykh navigatsionnykh sistemakh: Analiticheskii obzor*. Spb.: TsNII «Elektropribor», 1993.
3. Kamenev, A. A., and A. Y. Tonychev. "The use of artificial neural networks in modeling the spectral-energy characteristics of the terrain for vision systems with correlation-extreme navigation algorithms." *SPbNTORES: trudy ezhegodnoi NTK* 1(76) (2021): 259–262.
4. Hou, Guangchao, Qi Shao, Bo Zou, Liwen Dai, Zhe Zhang, Zhehan Mu, Yadong Zhang, and Jingsheng Zhai. "A novel underwater simultaneous localization and mapping online algorithm based on neural network." *ISPRS International Journal of Geo-Information* 9.1 (2019): 5. DOI: 10.3390/ijgi9010005.
5. Boronnikov, D. A., D. V. Pantiukhin, and S. V. Danko. "Neural network algorithm of spatial relief data organization." *Izvestiya MGTU "MAMI"* 1.3(17) (2013): 157–164.
6. Yuyukin, Igor V. "Spline model of gridded data operation as a principle of electronic mapping seabed topography." *Vestnik Gosudarstvennogo universiteta morskogo i rechnogo flota imeni admirala S. O. Makarova* 14.5 (2022): 656–675. DOI: 10.21821/2309-5180-2022-14-5-656-675.
7. Ling, Yu, Ye Li, Teng Ma, Zheng Cong, Shuo Xu, and Zhihui Li. "Active Bathymetric SLAM for autonomous underwater exploration." *Applied Ocean Research* 130 (2023): 103439. DOI: 10.1016/j.apor.2022.103439.
8. Ma, Teng, Ye Li, Rupeng Wang, Zheng Cong, and Yusen Gong. "AUV robust bathymetric simultaneous localization and mapping." *Ocean Engineering* 166 (2018): 336–349. DOI: 10.1016/j.oceaneng.2018.08.029.
9. Norgren, Petter, and Roger Skjetne. "A multibeam-based SLAM algorithm for iceberg mapping using AUVs." *IEEE Access* 6 (2018): 26318–26337. DOI: 10.1109/ACCESS.2018.2830819.
10. Haykin, Simon. *Neural Networks and Learning Machines*. Third Edition. New Jersey: Pearson, 2009.
11. Hornik, Kurt. "Some new results on neural network approximation." *Neural Networks* 6.8 (1993): 1069–1072. DOI: 10.1016/S0893-6080(09)80018-X.
12. Pinkus, Allan. "Approximation theory of the MLP model in neural networks." *Acta numerica* 8 (1999): 143–195. DOI: 10.1017/S0962492900002919.
13. Kingma, Diederik P., and Jimmy Ba. "Adam: A method for stochastic optimization." *3rd International Conference on Learning Representations*. 2015. DOI: 10.48550/arXiv.1412.6980.

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРЕ

Дерябин Виктор Владимирович —
доктор технических наук, доцент
ФГБОУ ВО «ГУМРФ имени адмирала
С. О. Макарова»
198035, Российская Федерация, Санкт-Петербург,
ул. Двинская, 5/7
e-mail: gmavitder@mail.ru, deryabinvv@gumrf.ru

INFORMATION ABOUT THE AUTHOR

Deryabin, Victor V. —
Dr. of Technical Sciences, associate professor
Admiral Makarov State University of Maritime
and Inland Shipping
5/7 Dvinskaya Str., St. Petersburg 198035,
Russian Federation
e-mail: gmavitder@mail.ru, deryabinvv@gumrf.ru

Статья поступила в редакцию 11 января 2023 г.
Received: January 11, 2023.

CONCEPTUAL SCHEME OF INTELLIGENT VESSEL TRAFFIC CONTROL SYSTEM WITH THE HUMAN FACTOR INCLUDED

S. G. Fadyushin

Far Eastern Federal University, Vladivostok, Russian Federation

The subject of the research is the development of technologies for automated and automatic ship traffic control systems, which is of great importance in modern shipping conditions. At the same time, special attention is paid to intelligent control systems based on artificial intelligence methods, such as artificial neural networks, fuzzy logic, machine learning, evolutionary computing and genetic algorithms. As a result, integrated information navigation systems, which provide decision-making on all aspects of navigation tasks, primarily where reception, processing, storage and transmission of navigation information is required, are being created and widely used in practice. However, in such developments, due importance is not given to the human factor, namely, it is often not taken into account that the control system of a moving object is a man-machine and consists of a regulator, which includes a human operator (navigator). The inclusion of the navigator in the vessel control link leads to the need to simultaneously take into account the human factor and the characteristics of the vessel controllability, i. e. human and machine factors in their unity. In connection with the development of artificial intelligence, the concept of “human-machine symbiosis” is becoming increasingly relevant in the study of human-machine systems. The problem is that there is still no single point of view on this issue due to the lack of reasonable methods for taking into account the human factor in the process of controlling the movement of moving objects. The results of the theoretical research on the formalization of some aspects of human mental activity and their implementation in the conceptual scheme of an intelligent vessel control system are reflected in the paper. The results obtained may be of interest to specialists in vessel traffic control automation, artificial intelligence, the creation of intelligent control systems and navigation safety.

Keywords: navigation, the human factor of navigation, navigation safety, vessel control, entropy, information, intelligent system, unmanned vessel.

For citation:

Fadyushin, Sergey G. “Conceptual scheme of intelligent vessel traffic control system with the human factor included.” *Vestnik Gosudarstvennogo universiteta morskogo i rechnogo flota imeni admirala S. O. Makarova* 15.2 (2023): 180–190. DOI: 10.21821/2309-5180-2023-15-2-180-190.

УДК 656.61.052

КОНЦЕПТУАЛЬНАЯ СХЕМА ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНОЙ СИСТЕМЫ УПРАВЛЕНИЯ ДВИЖЕНИЕМ СУДНА С УЧЕТОМ ЧЕЛОВЕЧЕСКОГО ФАКТОРА

С. Г. Фадюшин

Дальневосточный федеральный университет, Владивосток, Российская Федерация

Темой исследования является имеющая большое значение в современных условиях судоходства разработка технологий автоматизированных и автоматических систем управления движением судна. При этом особое внимание уделяется интеллектуальным системам управления на основе методов искусственного интеллекта, таких как искусственные нейронные сети, нечеткая логика, машинное обучение, эволюционные вычисления и генетические алгоритмы. В результате создаются и находят широкое применение на практике интегрированные информационные навигационные комплексы, обеспечивающие принятие решений судоводителем прежде всего там, где требуется прием, обработка, хранение и передача навигационной информации. Однако в таких разработках не уделяется должного внимания человеческому фактору, а именно зачастую не учитывается, что система управления подвижным объектом является частью человеко-машинной системы, в состав которой входят: регулятор (машина) и человек-оператор (судоводитель). Включение судоводителя в звено управления судном приводит к необходимости одновременно учитывать человеческий фактор и характеристики управляемости судна, т. е. человеческий и машинный факторы

одновременно. В связи с развитием искусственного интеллекта понятие «симбиоза человека и машины» становится все более актуальным в исследованиях человеко-машинных систем, однако проблема состоит в том, что пока не существует единой точки зрения по данному вопросу ввиду отсутствия обоснованных методик учета человеческого фактора в процессе управления движением подвижных объектов. В статье отражены результаты проведенных теоретических исследований по формализации некоторых аспектов мыслительной деятельности человека и реализация их в концептуальной схеме интеллектуальной системы управления судном. Полученные результаты могут представлять интерес для специалистов по автоматизации управления движением судна, искусственному интеллекту, созданию интеллектуальных систем управления и безопасности мореплавания.

Ключевые слова: судовождение, человеческий фактор судовождения, безопасность судовождения, управление судном, энтропия, информация, интеллектуальная система, безэкипажное судно.

Для цитирования:

Фадюшин С. Г. Концептуальная схема интеллектуальной системы управления движением судна с учетом человеческого фактора / С. Г. Фадюшин // Вестник Государственного университета морского и речного флота имени адмирала С. О. Макарова. — 2023. — Т. 15. — № 2. — С. 180–190. DOI: 10.21821/2309-5180-2023-15-2-180-190.

Введение (Introduction)

Автоматизация управления подвижными объектами является перспективным направлением развития кибернетики. Уже сейчас современные информационные технологии позволяют автоматизировать процесс управления движением морского судна и перейти к беспилотному вождению безэкипажного судна. Однако даже при автоматизации судовождения на безопасности плавания сказывается влияние *человеческого фактора*, который по разным статистическим данным является главной причиной в 70–80 % случаев аварий и других инцидентов на море. Так, по статистическим данным обзора аварийности с судами на море за I квартал 2022 г., из семи аварий пять случаев (71 %) произошло по причине некомпетентности или неправильных действий членов экипажа судов, т. е. так называемого *человеческого фактора* [1].

Современные технологии автоматизации управления подвижными объектами по-прежнему требуют контроля со стороны оператора и его вмешательства в процесс управления в сложных ситуациях. Всецело полагаясь на автоматизацию, человек-оператор часто теряет контроль над управлением, что не лучшим образом сказывается на безопасности движения. Поэтому не случайно в ходе исследования взаимодействия человека и машины в автоматизированных системах управления отмечается важность учета прежде всего *человеческого фактора* [2], [3]. При разработке интеллектуальных систем автоматического управления в настоящее время широко используются методы системного анализа, математической статистики, спектрального анализа случайных процессов, теории искусственных нейронных сетей, нечеткой логики, генетических алгоритмов, имитационного моделирования, т. е. методы, находящиеся в основе общей теории управления — кибернетики. Данные методы занимаются исследованием «петель обратной связи», когда функционирование какой-либо системы приводит к некоторым изменениям в окружающей среде, вызывающим через обратную связь трансформацию поведения самой системы.

Принцип обратной связи, наблюдаемой в технике, был использован американским математиком Н. Винером для формализации сознательной деятельности человека и положен им в основу науки об управлении — кибернетики. Так, в работе [4, с. 31] отмечается следующее: «...*исключительно важным фактором в сознательной деятельности служит явление, которое в технике получило название обратной связи <...> Чтобы некоторое устройство выполняло заданное движение, разница между заданным и фактическим движением используется как новый входной сигнал, заставляющий регулируемую часть устройства двигаться так, чтобы фактическое движение устройства все более приближалось к заданному.*»

Принцип обратной связи — универсальный принцип управления, позволяющий в изменяющейся среде достигать поставленной цели, который заключается в коррекции входных воздействий в процессе управления, формирующемся на основе информации о выходе управляемой системы.

Управляемая система вместе с регулятором, корректирующим входные воздействия, образует замкнутый контур, так называемый *контур обратной связи* (рис. 1).

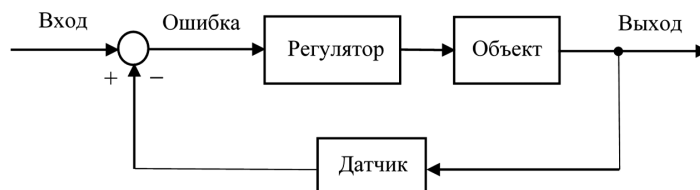


Рис. 1. Контур обратной связи

На рис. 1 приняты следующие условные обозначения: *ошибка* — разностный сигнал между эталонным сигналом на входе и сигналом на выходе; *регулятор* (корректирующий элемент, фильтр) — элемент, с помощью которого обеспечиваются приемлемые характеристики системы в целом; *объект* — часть системы, которая подлежит управлению; *датчик* — устройство для измерения сигнала. Указанные элементы образуют одноконтурную замкнутую систему управления [5].

Обратная связь в кибернетике считается не только возможной, но и необходимой как в системах автоматического управления машинами, так и во всех живых организмах. Все управляемые системы (кибернетические системы) можно считать объектами кибернетики, в том числе *интеллектуальную систему управления судном*. Однако в исследованиях часто не учитывается, что это человеко-машинная система, в состав регулятора которой входит человек-оператор, т. е. судоводитель [6]. Включение судоводителя в звено управления судном приводит к необходимости одновременно учитывать психологические характеристики человека и характеристики управляемости судна, т. е. *человеческий и машинный факторы*. Поэтому в случае смешанного управления подвижным объектом: человеком и машиной, появляется необходимость учета субъективной составляющей процесса управления, которая получила название *смысла действий* (the Sense of Agency) [7] оператора, или просто *смысла* (Sense). Понятие *симбиоз человека и машины* все чаще упоминается в исследованиях человеко-машинных систем. Тем не менее пока не существует единой точки зрения в вопросе, что представляет собой единство человека и машины [8]. Для решения проблемы человеко-машинных систем в данной работе предлагается концептуальная схема интеллектуальной системы управления движением морского судна, учитывающая *человеческий фактор*.

Методы и материалы (Methods and materials)

Концептуальная схема интеллектуальной системы управления движением морского судна, в основе которой находятся понятия теории вероятностной оценки смыслов [9], показана на рис. 2.

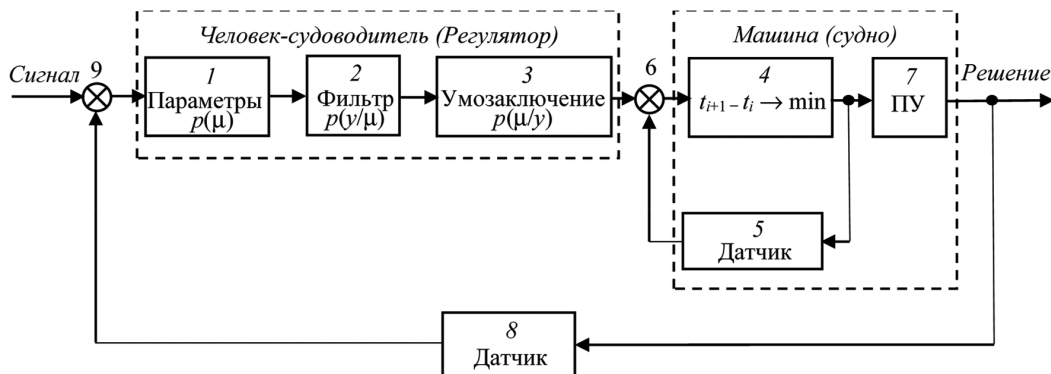


Рис. 2. Концептуальная схема интеллектуальной системы управления движением морского судна:

- 1, 2, 3 — блоки формирования управленческого решения (умозаключения);
- 4 — вычислительный блок; 5 — датчик интенсивности машинного фактора;
- 6 — элемент сравнения интенсивностей человеческого и машинного факторов;
- 7 — пульт управления (ПУ) машиной (судном); 8 — датчик навигационной переменной величины;
- 9 — элемент сравнения навигационной переменной величины и навигационного сигнала

Концептуальная схема интеллектуальной системы управления движением морского судна, приведенная на рис. 2, имеет два контура: внутренний контур управления (блоки: *Человек-судоводитель (Регулятор)*, *Машина (судно)*, элемент сравнения 6); внешний контур управления (блоки: *Человек-судоводитель (Регулятор)*, *Машина (судно)*, датчик 8, элемент сравнения 9). В состав схемы входят следующие основные блоки: 1–3 — блоки формирования управленческого решения. На рис. 2 они объединены пунктирной линией, т. е. представляют собой единый блок *Человек-судоводитель (Регулятор)* (см. рис. 1). В этом блоке судоводителем формируются логические умозаключения по управлению движением судна, в результате чего происходит образование концепта, называемого *человеческим фактором*¹.

Механизм умозаключения основан на силлогизме Бейеса — Налимова — «инструменте» выработки осмысленных решений, т. е. решений, содержащих смысл [10]. В структуре силлогизма Бейеса – Налимова смысл описывается своей функцией распределения $p(\mu)$ (блок 1), которая мультипликативно взаимодействует с фильтром $p(y/\mu)$ (блок 2). Взаимодействие описывается теоремой Бейеса и задается формулой в виде

$$p(\mu | y) = kp(y | \mu)p(\mu), \quad (1)$$

где $p(\mu | y)$ — условная функция распределения, определяющая семантику сделанного умозаключения;

k — константа нормировки.

По мнению советского и российского математика и философа В. В. Налимова, теорема Бейеса, представленная в виде формулы (1), выступает как силлогизм: из двух посылок $p(\mu)$ и $p(y/\mu)$ следует новая семантика $p(\mu/y)$, и в результате из отдельных семантических знаков² *формируется программа осмысленных действий человека (судоводителя)*.

Фильтр — это абстрактный элемент мышления, задающий условную функцию распределения $p(y/\mu)$, которая зависит от интенсивности принятия решений (умозаключений) судоводителем и, соответственно, оказывает влияние на интенсивность процесса управления судном в целом. Эта функция описывается законом Пуассона, согласно которому вероятность того, что количество принятых решений примет определенное значение, выражается формулой

$$P_m = \frac{a^m}{m!} e^{-a} (m = 0, 1, \dots),$$

где a — некоторая положительная величина, называемая *законом Пуассона*;

m — количество принятых решений на отрезке траектории l .

Закон Пуассона в контексте вероятностной теории смыслов — это закон, описывающий работу фильтра. В качестве примера единичного логического умозаключения на рис. 3 показана априорная функция распределения семантических знаков. Видно, что с каждым знаком вероятностным образом связано множество смысловых значений. Ранги смысловых значений отложены по оси абсцисс μ и распределены по вероятности их появления $p(\mu)$, определяемой по оси ординат. Таким образом, каждому участку смысловой шкалы соответствуют свои вероятности, с которыми они ассоциируются с определенным знаком в сознании человека. Поэтому соответствующие им функции распределения могут быть названы *априорными* (субъективными, персональными, человеческими) функциями, формирующими *человеческий фактор*.

Принимаемое решение должно быть осмысленным, т. е. *содержать смысл или быть сознательным, разумным*. На рис. 3 показано, что смысл заключен между семантическими знаками. Если знаки выразить к единицам информационной энтропии H , то отрезок между знаками (в данном случае отрезок 3) определяет величину смысла между ними — квант смысла ΔH :

$$\Delta H = |H(\text{знак 1}) - H(\text{знак 2})|.$$

¹ В данной работе выражение «формируются умозаключения» тождественно понятию «принимаются решения» или «принятие решений». «Принятие решения» означает заключительное итоговое умозаключение, за которым следует управляющее действие лица, принимающего решения.

² В контексте темы данного исследования семантические знаки представляют собой навигационные сигналы различной природы, поступающие на вход системы.

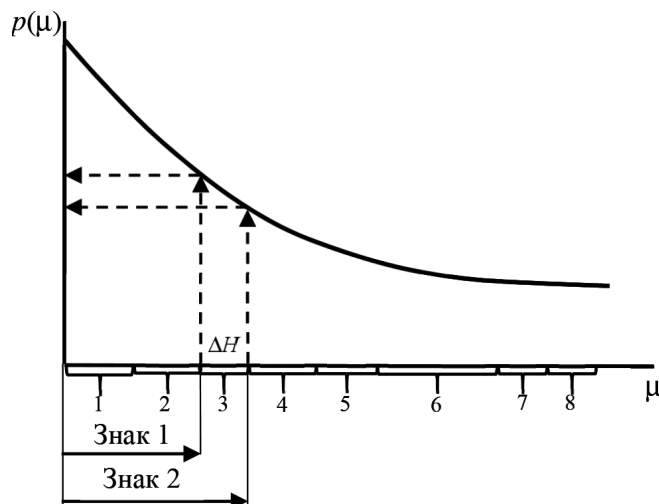


Рис. 3. Формирование логического умозаключения

Информационную энтропию можно рассчитать по формуле К. Шеннона:

$$H = -\sum p_i \log p_i,$$

где H — энтропия множества вероятностей p_i ;

p_i — вероятность появления какого-либо семантического знака.

Квант смысла представляет собой случайную величину. Содержащий смысл код, состоящий из цепочки взаимосвязанных квантов смысла, можно охарактеризовать статистическими параметрами экспоненциального распределения непрерывной случайной величины. Формальным аналогом информационной энтропии по К. Шеннону для непрерывной случайной величины является *дифференциальная энтропия*, т. е. понятие смысла оказывается тождественным понятию дифференциальной энтропии. Отсюда следует, что *смысл* — это статистический параметр семантической функции распределения квантов смысла в виде экспоненциального распределения, измеряющий среднее количество дифференциальной энтропии, приходящейся на одно умозаключение в виде силлогизма Бейеса – Налимова. В более краткой формулировке смысл — это статистический параметр, измеряющий среднее количество энтропии, приходящейся на одно умозаключение.

Как отмечалось ранее, каждому участку смысловой шкалы (см. рис. 3) соответствуют свои вероятности, с которыми они ассоциируются со знаком в сознании человека (судоводителя), поэтому соответствующие им функции распределения — это субъективные (человеческие) функции. Отсюда следует, что смысл непосредственным образом связан с человеческим фактором. Тогда, по аналогии с формулировкой смысла, человеческий фактор судовождения можно охарактеризовать как статистический параметр, который измеряет среднее количество энтропии вероятностного состояния системы «судоводитель – судно», приходящееся на одно принятое судоводителем решение [11]. При этом следует учесть, что человеческий фактор формируется как бы «поверх» *детерминированного фактора*, т. е. принятию решения судоводителем должна предшествовать логическая проработка задачи управления в математическом (детерминированном) виде, результатом которой является программа управления движением судна U .

Таким образом, из приведенных основных положений теории вероятностной оценки смыслов следует, что мерой величины смысла (M) и, соответственно, человеческого фактора служит *дифференциальная энтропия* $h(\Delta H)$ как статистический параметр экспоненциального распределения случайной величины в виде квантов смысла: $M = f(h(\Delta H))$. Для количественной оценки величины смысла достаточно рассчитать и сравнить дифференциальную энтропию программы действий судоводителя M_s и соответствующей эталонной программы¹ M_p . Если $M_s > M_p$, то, вероятнее

¹ Эталонная программа действий судоводителя создаётся из исходной путем случайной перестановки знаков.

всего, принятые решения содержат смысл; если $M_s \leq M_p$, то, вероятнее всего, они не содержат смысла.

Одной из основных функций рассматриваемой интеллектуальной системы управления движением судна является *регулирование*, т. е. поддержание на определенном уровне или изменение по требуемому закону некоторой величины (например, курса) в системах управления судном [12]. Устройство, решающее задачу регулирования, называется *регулятором*, в качестве которого в описываемой системе выступает человек (судоводитель). В данном случае управляемая величина должна одновременно удовлетворять требованиям человека и возможностям машины. Другими словами, она должна обеспечить «паритет» между человеческим и машинным факторами. Для обоснования выбора такой управляемой величины следует обратиться к выражению, по которому рассчитывается дифференциальная энтропия экспоненциального распределения случайной величины:

$$h(\Delta H) = 1 - \ln \lambda,$$

где λ — параметр экспоненциального распределения (интенсивность, или обратный коэффициент масштаба).

Конкретное значение параметра λ связано с выбором шкалы измерения. При разработке интеллектуальной системы управления движением морского судна параметр λ может быть интерпретирован как среднее время, затрачиваемое судоводителем на принятие одного решения, т. е. интенсивность¹. Другими словами, этот параметр показывает интенсивность принятия решений судоводителем:

$$\lambda = 1/t_{\text{cp}},$$

где t_{cp} — среднее время принятия решений судоводителем за определенный промежуток движения по траектории l .

Блоки 4–6 на рис. 2 объединены пунктирной линией в единый блок — *Машина (судно)*, в котором вырабатывается машинный фактор. Рассмотрим отдельные блоки, входящие в его состав.

Блок 4 — вычислительный блок. В нем осуществляется поэтапная (многошаговая) процедура учета возможностей машины, которую можно представить в виде решения следующей динамической задачи исследования операций.

Формулировка задачи. Предположим, что судно движется из текущей точки с координатами (x_{1i}, x_{2i}) в заданную точку (x_{1i+1}, x_{2i+1}) — рис. 4, с постоянной скоростью $v(t)$ как функцией времени t , затрачиваемого на перемещение из одной точки в другую. Необходимо найти такую программу управления рулями U , которая обеспечивает движение судна из начальной точки в заданную в течение минимального времени.

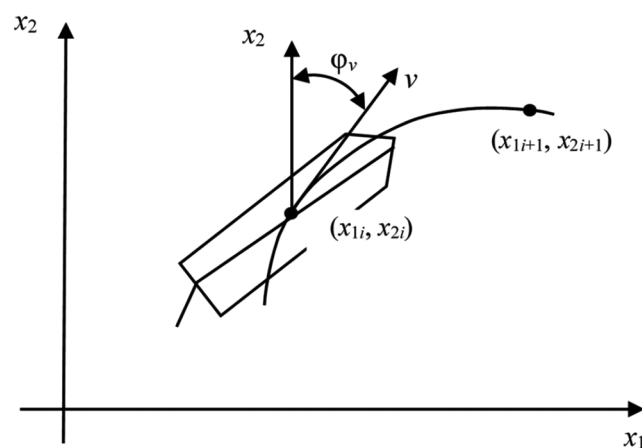


Рис. 4. Оси координат и элементы неустановившегося движения судна

¹ Кроме общепринятого определения: «интенсивность процесса — это результат процесса, отнесенный к единице времени и единице его рабочего параметра», интенсивность можно трактовать как напряженность, энергичность, сосредоточенность, запас внутренних сил.

Математическая модель задачи. Уравнения движения судна можно представить в следующем виде:

$$\begin{cases} \dot{x}_1(t) = v \sin \varphi_v; \\ \dot{x}_2(t) = v \cos \varphi_v, \end{cases} \quad (2)$$

где φ_v — угол скорости.

Множество допустимых решений G представляет собой совокупность вектор-функций $(x_1(t), x_2(t))^T$, удовлетворяющих системе уравнений:

$$\begin{cases} \dot{x}_1(t) = v \sin \varphi_v; \\ \dot{x}_2(t) = v \cos \varphi_v; \\ x_1(t_i) = x_{1i}, x_2(t_i) = x_{2i}, x_1(t_{i+1}) = x_{1i+1}, x_2(t_{i+1}) = x_{2i+1}; \\ t \in (t_i, t_{i+1}). \end{cases} \quad (3)$$

Так как время прибытия в заданную точку траектории движения зависит от программы управления рулями судна U , т. е. $t_{i+1} = f(U)$, в соответствии с условиями задачи критерий оптимальности будет иметь следующий вид:

$$t_{i+1} - t_i \rightarrow \min_{U \in G}. \quad (4)$$

Блок 5 — датчик интенсивности машинного фактора. В нем рассчитывается и измеряется интенсивность возможностей исполнения машиной, принимаемых судоводителем решений, которую можно представить в виде

$$\Lambda = 1/T_{\text{ср}}, \quad (5)$$

где $T_{\text{ср}}$ — среднее время, необходимое машине на «отработку» принимаемых судоводителем решений за определенный промежуток движения по траектории l .

Избрав в качестве управляемой величины внутреннего контура интеллектуальной системы управления движением судна для судоводителя интенсивность принятия решений λ , а для машины — интенсивность исполнения принятых судоводителем решений Λ , с их помощью можно установить «паритет» между человеческим и машинным факторами. Для этого во временной шкале рассчитываются и затем сравниваются с помощью элемента b внутреннего контура управления (см. рис. 2) значения λ и Λ :

- если $\lambda = \Lambda$, то принимается окончательное решение (человеческий и машинный факторы находятся в «паритете»);
- если $\lambda < \Lambda$, то необходимо уменьшить интервал между моментами принятия решений, тем самым увеличив их интенсивность (машинный фактор превышает возможности человеческого фактора);
- если $\lambda > \Lambda$, то можно увеличить интервал между моментами принятия решений (человеческий фактор превышает возможности машинного фактора).

Используя понятие интенсивности, можно по аналогии с формулировкой человеческого фактора сформулировать понятие *машинного фактора судовождения* как статистического параметра, измеряющего среднее количество энтропии вероятностного состояния системы «судоводитель – судно», приходящееся на одно принятое судоводителем решение за время, необходимое машине для его выполнения.

В случае, если $\lambda = \Lambda$ и судоводитель принимает окончательное решение, то активируется внешний контур управления и выходной сигнал о принятом решении поступает на **Блок 8** — датчик навигационной переменной величины, измеряющий управляемую величину (например, курс судна) и передающий полученные данные на элемент сравнения внешнего контура управления **9** (см. рис. 2). Далее в зависимости от величины и знака отклонения рассчитанного значения управляемой величины от ее фактического значения судоводитель принимает решение о целе-

сообразности дальнейших умозаключений (принятий решений) в сложившейся навигационной обстановке. Если при рассогласовании между рассчитанным значением управляемой величины и ее фактическим значением будет принято положительное решение о необходимости продолжения умозаключений (анализа навигационной обстановки), то описанные действия по внутреннему контуру повторяются.

В качестве примера рассмотрим абстрактную¹ ситуацию сближения судна с объектом маневра, представленную отдельными событиями — семантическими знаками в виде промежуточных точек траектории движения, описывающими программу действий судоводителя (табл. 1) [9].

Таблица 1

Программа действий судоводителя

Точки	0–1	1–2	2–3	3–4	4–5	5–6	6–7	7–8	8–9	9–10	10–11	11–12	12–13	13–14	14–15
ΔT , мин	3,23	0,03	3,23	0,16	2,26	2,26	2,26	0,16	1,61	1,61	1,61	0,03	0,32	0,16	0,03
l , м	1000	1000	1000	50	700	700	700	50	500	500	500	10	100	50	10

Известны скорость судна V , время плавания между точками ΔT , длина всей траектории сближения L и длина траектории между соседними точками l . Траектория движения объекта маневра также разбита на отдельные точки, которые соответствуют точкам на траектории судна. Ситуация сближения судна с объектом маневра показана на рис. 5.

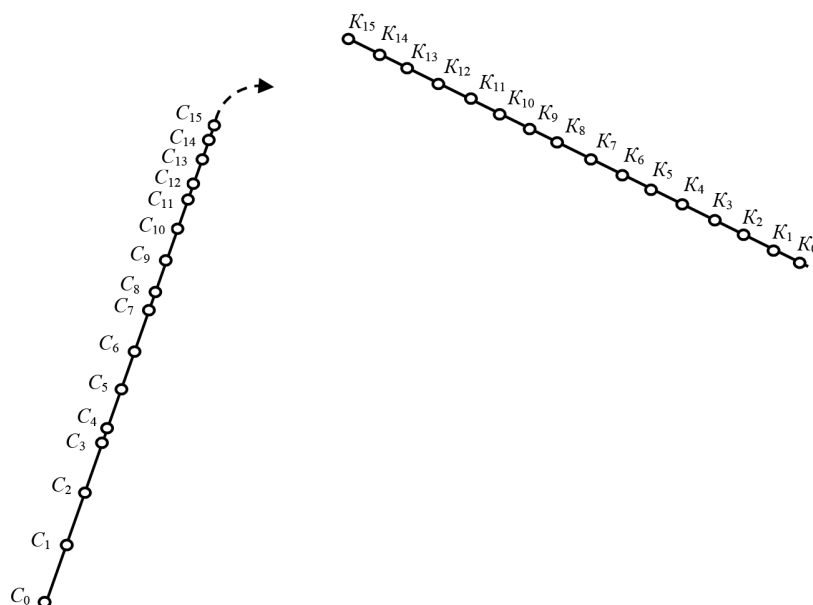


Рис. 5. Ситуация сближения судна с объектом маневра:
С — судно; К — объект маневра

Точки на траектории движения судна (см. рис. 5) имеют двойственное значение: с одной стороны, это *вещественные знаки* (точки, в которых определялись параметры сближения), с другой — *смыслообразующие элементы* (точки, в которых принимались решения). Неравномерный характер распределения точек по траектории движения судна, плотность которых возрастает с уменьшением расстояния до объекта маневра, является косвенным доказательством того, что в этих точках судоводителем принимались решения с увеличивающейся интенсивностью.

Расчеты для исходных событий (промежуточных точек) выполняются в соответствии с пп. 1–6 разработанного алгоритма [9, с. 97] оценки величины смысла в смысловой форме произвольного типа. Полученные результаты показали, что дифференциальная энтропия экспоненциального распределения случайной величины ΔH исходной смысловой формы (программы действий

¹ Приведенный пример служит иллюстрацией полученных результатов.

судоводителя): $h(\Delta H) = 1 - \ln(\lambda) = 1 - \ln(0,319858) = 2,139878$, т. е., согласно методике оценки величины смысла, $M_s = h(\Delta H) = 2,139878$ ¹.

Исходная программа действий судоводителя приводится к эталонному виду путем случайной перестановки семантических знаков, в результате чего она примет спонтанный вид без каких-либо явных признаков осмысленности действий (табл. 2). Количество смысла в такой программе действий можно считать равным нулю.

Таблица 2

Эталонная программа действий судоводителя

Точки	9–10	0–1	5–6	12–13	14–15	13–14	10–11	2–3	8–9	6–7	1–2	4–5	11–12	3–4	7–8
ΔT , мин	1,61	3,23	2,26	0,32	0,03	0,16	1,61	3,23	1,61	2,26	0,03	2,26	0,03	0,16	0,16
l , м	500	1000	700	100	10	50	500	1000	500	700	1000	700	10	50	0

Расчеты эталонных событий выполняются согласно пп. 1–6 алгоритма оценки смысла [9, с. 97]. Дифференциальная энтропия экспоненциального распределения случайной величины ΔH эталонной программы действий судоводителя $h(\Delta H) = 1 - \ln(\lambda) = 1 - \ln(0,396001) = 1,926339$. Принимаем $M_p = h(\Delta H) = 1,926339$. Сравнение полученных значений оценочных статистических параметров исходной M_s и эталонной M_p смысловых форм показывает, что $M_s > M_p$. Следовательно, исходная программа действий судоводителя все-таки содержит смысл. Полученное умозаключение «программа действий содержит смысл» включает программу управления рулями судна U для сложившейся к этому моменту навигационной обстановки.

Интенсивность принятия решений судоводителем для заданного примера² $\lambda = 1/t_{cp} = 1/1,48 = 0,67 \text{ мин}^{-1}$. Для расчета интенсивности возможностей исполнения машиной принимаемых судоводителем решений Λ используется математическая модель задачи учета возможностей машины, представленная выражениями (2)–(4) и формулой (5). В этой формуле время, необходимое машине на «отработку» принимаемых судоводителем решений T_{cp} , рассчитывается как среднее значение промежутков времени, найденных с помощью критерия оптимальности (4). По результатам расчетов, согласно данным на рис. 5, принимаются следующие решения:

- если $\lambda < \Lambda$ (точки C_0 – C_3 , C_4 – C_7), то необходимо увеличить интенсивность принятия решений;
- если $\lambda > \Lambda$ (точки C_3 – C_4 , C_7 – C_8), то интенсивность принятия решений может быть уменьшена;
- если $\lambda = \Lambda$ (точки C_{13} – C_{14}), то принимается окончательное решение по расхождению с объектом маневра, полученное путем формальной логической проработки задачи управления для сложившейся навигационной обстановки в математическом виде. В рассмотренном примере это изменение курса судна вправо.

При рассогласовании между рассчитанным значением управляемой величины и ее фактическим значением в процессе выполнения маневра расхождения судоводитель принимает решение о целесообразности дальнейших умозаключений в сложившейся навигационной обстановке, которые в случае необходимости вновь повторяются по внутреннему контуру управления (см. рис. 2).

Заключение (Conclusion)

В контексте кибернетического подхода к решению проблемы человеческого фактора в судовождении этот фактор оказывается тесно связан с таким понятием, как смысл. *Смысл* — это статистический параметр, измеряющий среднее количество энтропии, приходящейся на одно умозаключение. Смысл как статистический параметр показывает осмысленность и эффективность принимаемых решений, приводящих к положительному результату.

Человеческий фактор судовождения — это статистический параметр, который измеряет среднее количество энтропии вероятностного состояния системы «судоводитель – судно», приходящееся на одно принятое судоводителем решение. Принятию решений судоводителем должна предшествовать формальная логическая проработка задачи управления в математическом виде.

¹ Здесь и при расчете эталонной программы действий судоводителя параметр экспоненциального распределения λ соответствует смысловой шкале измерений.

² В данном случае параметр экспоненциального распределения λ соответствует шкале времени.

Машинный фактор можно считать понятием, тождественным человеческому фактору, но относящимся к машине. Это статистический параметр, измеряющий среднее количество энтропии вероятностного состояния системы «судоводитель – судно», приходящееся на одно принятое судоводителем решение в течение времени, необходимого машине для его выполнения.

Учет *человеческого фактора* представляет собой поэтапную (многошаговую) процедуру установления смысла в действиях человека с принятием во внимание возможностей машины при реализации принятых решений. Другими словами, учет человеческого фактора — это поэтапный процесс нахождения «паритета» между человеческим и машинным факторами, учитывающий интенсивность принятия решений человеком и интенсивность их реализации машиной.

Перешагнув барьер смысла («Barrier of Meaning») [13], можно вплотную приблизиться к созданию искусственного разумного существа, которое сможет самостоятельно управлять «безэкипажным» судном. Возможность создания подобной машины, способной мыслить, рассмотрена в статье академика А. Н. Колмогорова «Автоматы и жизнь» (Возможное и невозможное в кибернетике: сб. ст. / Сост. В. Д. Пекелис; под ред. А. И. Берга и Э. Я. Кольмана. — М.: Наука, 1964. — 222 с.), в которой автор отмечает следующее: «...не существует принципиальных аргументов против положительного ответа на вопрос о возможности создания искусственного разумного существа...». Остается присоединиться к мнению выдающегося ученого и надеяться, что результаты изложенного в данной статье исследования будут способствовать созданию систем поддержки принятия решений нового класса по типу *социокиберфизических* [14] и *человеко-машинных систем* [15] и, возможно, созданию искусственного разумного существа, способного управлять «безэкипажным» судном.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Сведения об аварийности с судами на море и внутренних водных путях в I квартале 2022 года [Электронный ресурс]. — Режим доступа: <https://rostransnadzor.gov.ru/documents/1322> (дата обращения 05.01.2023).
2. Wen W. The sense of agency in driving automation / W. Wen, Y. Kuroki, H. Asama // *Frontiers in Psychology*. — 2019. — Vol. 10. — Pp. 2691. DOI: 10.3389/fpsyg.2019.02691.
3. Wen W. The sense of agency in perception, behaviour and human-machine interactions / W. Wen, H. Imamura // *Nature Reviews Psychology*. — 2022. — Vol. 1. — Is. 4. — Pp. 211–222. DOI: 10.1038/s44159-022-00030-6.
4. Винер Н. Кибернетика, или управление и связь в животном и машине / Н. Винер / Пер. с англ.; под ред. Г. Н. Поварова. — 2-е изд. — М.: Наука, 1983. — 343 с.
5. Филлипс Ч. Системы управления с обратной связью / Ч. Филлипс, Р. Харбор. — М.: Лаборатория базовых знаний, 2001. — 616 с.
6. Сазонов А. Е. Человеческий фактор и безопасность управления подвижными объектами / А. Е. Сазонов // Сб. мат. XVI Общего собрания академии навигации и управления движением. — 2003. — С. 6–8.
7. Haggard P. Sense of agency / P. Haggard, V. Chambon // *Current biology*. — 2012. — Vol. 22. — Is. 10. — Pp. R390–R392. DOI: 10.1016/j.cub.2012.02.040.
8. Inga J. Human-machine symbiosis: A multivariate perspective for physically coupled human-machine systems / J. Inga, M. Ruess, J. H. Robens, T. Nelius, S. Rothfuß, S. Kille, P. Dahlinger, A. Lindenmann, R. Thomaschke, G. Neumann, S. Matthiesen, S. Hohmann, A. Kiesel // *International Journal of Human-Computer Studies*. — 2023. — Vol. 170. — Pp. 102926. DOI: 10.1016/j.ijhcs.2022.102926.
9. Фадюшин С. Г. Вероятностная оценка смыслов. Логико-философский анализ проблемы смысла в кибернетике: моногр. / С. Г. Фадюшин. — Владивосток: Изд-во Дальневост. федерал. ун-та, 2022. — 196 с.
10. Fadyushin S. G. Nalimov's Bayesian Syllogism to Overcome the Barrier of Meaning in AI Systems / S. G. Fadyushin, E. A. Vereshchagina, Y. V. Pafnuteva // 2020 International Multi-Conference on Industrial Engineering and Modern Technologies (FarEastCon). — IEEE, 2020. DOI: 10.1109/FarEastCon50210.2020.9271411.
11. Фадюшин С. Г. Математическое описание количественной оценки принятия решений судоводителем / С. Г. Фадюшин // Вестник Государственного университета морского и речного флота имени адмирала С. О. Макарова. — 2020. — Т. 12. — № 2. — С. 239–251. DOI: 10.21821/2309-5180-2020-12-2-239-251.
12. Каретников В. В. Автоматизация судовождения: учебник для студентов судоводительской специальности / В. В. Каретников, В. Д. Ракитин, А. А. Сикарев. — СПб.: СПГУВК, 2007. — 265 с.
13. Mitchell M. Artificial Intelligence Hits the Barrier of Meaning / M. Mitchell // *Information*. — 2019. — Vol. 10. — Is. 2. — Pp. 51. DOI: 10.3390/info10020051.

14. Смирнов А. В. Модели поддержки принятия решений в социокиберфизических системах / А. В. Смирнов, Т. В. Левашова // Информационно-управляющие системы. — 2019. — № 3 (100). — С. 55–70. DOI: 10.31799/1684-8853-2019-3-55-70.

15. Смирнов А. В. Поддержка принятия решений на основе человеко-машинного коллективного интеллекта: современное состояние и концептуальная модель / А. В. Смирнов, Т. В. Левашова, А. В. Пономарев // Информационно-управляющие системы. — 2020. — № 2 (105). — С. 60–70. DOI: 10.31799/1684-8853-2020-2-60-70.

REFERENCES

1. Svedeniya ob avariynosti s sudami na more i vnutrennikh vodnykh putyakh v I kvartale 2022 goda. Web. 5 Jan. 2023 <<https://rostransnadzor.gov.ru/documents/1322>>.
2. Wen, Wen, Yoshihiro Kuroki, and Hajime Asama. “The sense of agency in driving automation.” *Frontiers in Psychology* 10 (2019): 2691. DOI: 10.3389/fpsyg.2019.02691.
3. Wen, Wen, and Hiroshi Imamizu. “The sense of agency in perception, behaviour and human-machine interactions.” *Nature Reviews Psychology* 1.4 (2022): 211–222. DOI: 10.1038/s44159-022-00030-6.
4. Wiener, Norbert. *Cybernetics: or Control and Communication in the Animal and the Machine*. Second edition. The MIT Press, 1965.
5. Phillips, Charles L., and Royce D. Harbor. *Feedback Control Systems*. 4th Edition. Prentice Hall, 2000.
6. Sazonov, A. Ye. “Chelovecheskiy faktor i bezopasnost’ upravleniya podvizhnymi ob’yektami.” *Sbornik materialov XVI Obshchego sobraniya akademii navigatsii i upravleniya dvizheniyem*. 2003: 6–8.
7. Haggard, Patrick, and Valerian Chambon. “Sense of agency.” *Current biology* 22.10 (2012): R390–R392. DOI: 10.1016/j.cub.2012.02.040.
8. Inga, Jairo, Miriam Ruess, Jan Heinrich Robens, Thomas Nelius, Simon Rothfuß, Sean Kille, Philipp Dahlinger, Andreas Lindenmann, Roland Thomaschke, Gerhard Neumann, Sven Matthiesen, Sören Hohmann, and Andrea Kiesel. “Human-machine symbiosis: A multivariate perspective for physically coupled human-machine systems.” *International Journal of Human-Computer Studies* 170 (2023): 102926. DOI: 10.1016/j.ijhcs.2022.102926.
9. Fadyushin, S. G. *Veroyatnostnaya otsenka smyslov. Logiko-filosofskiy analiz problemy smysla v kibernetike*. Vladivostok: Izdatel’sтво Dal’nevost. federal. un-ta, 2022.
10. Fadyushin, S. G., E. A. Vereshchagina, and Ya. V. Pafnuteva. “Nalimov’s Bayesian Syllogism to Overcome the Barrier of Meaning in AI Systems.” *2020 International Multi-Conference on Industrial Engineering and Modern Technologies (FarEastCon)*. IEEE, 2020. DOI: 10.1109/FarEastCon50210.2020.9271411.
11. Fadyushin, Sergey G. “Mathematical description of the quantitative assessment of decisions making by the navigator.” *Vestnik Gosudarstvennogo universiteta morskogo i rechnogo flota imeni admirala S. O. Makarova* 12.2 (2020): 239–251. DOI: 10.21821/2309-5180-2020-12-2-239-251.
12. Karetnikov, V. V., V. D. Rakitin, and A. A. Sikarev. *Avtomatizatsiya sudovozhdeniya: uchebnyk dlya studentov sudovoditel’skoi spetsial’nosti*. SPb.: Sankt-Peterburgskii gos. un-t vodnykh kommunikatsii, 2007.
13. Mitchell, Melanie. “Artificial intelligence hits the barrier of meaning.” *Information* 10.2 (2019): 51. DOI: 10.3390/info10020051.
14. Smirnov, A.V., and T. V. Levashova. “Models of decision support in socio-cyber-physical systems.” *Information and Control Systems* 3(100) (2019): 55–70. DOI: 10.31799/1684-8853-2019-3-55-70.
15. Smirnov, A.V., T. V. Levashova, and A. V. Ponomarev. “Decision support based on human-machine collective intelligence: state-of-the-art and conceptual model.” *Information and Control Systems* 2(105) (2020): 60–70. DOI: 10.31799/1684-8853-2020-2-60-70.

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРЕ

Фадюшин Сергей Геннадьевич —
кандидат технических наук, доцент
Дальневосточный федеральный университет
690091, Российская Федерация,
г. Владивосток, Суханова, 8
e-mail: fadyushin.sg@dvfu.ru

INFORMATION ABOUT THE AUTHOR

Fadyushin, Sergey G. —
PhD, associate professor
Far Eastern Federal University
8 Sukhanova Str., Vladivostok, 690090,
Russian Federation
e-mail: fadyushin.sg@dvfu.ru

Статья поступила в редакцию 21 октября 2022 г.
Received: October 21, 2022.

DOI: 10.21821/2309-5180-2023-15-2-191-199

SEARCH FOR OPTIMAL SHIPPING ROUTES IN THE ARCTIC SEAS

E. V. Andreeva, A. L. Tezikov

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

A method for choosing optimal shipping routes and determining the conditions under which the Northern Sea Route can be used year-round is developed in the paper. The topic and purpose of the study are directly related to the tasks, the implementation of which is provided by the Development Plan of the Northern Sea Route, approved by the decree of the Government of the Russian Federation on August 1, 2022, confirmed by the financing program for the development and implementation of the digital board of the Northern Sea Route, approved by the Government in mid-January, 2023. The assessment of the current state of the network of shipping routes, navigation, hydrographic and hydro meteorological support, as well as the structure and composition of the Arctic icebreaker and transport fleet is given. The main factors affecting the implementation of the year-round navigation program in the eastern sector of the Arctic include severe ice conditions, unreliable forecasts of the ice situation, the lack of a sufficient number of icebreakers and transport vessels capable of overcoming thick ice fields in the Arctic shallow waters. Based on the results of the review of existing methods for determining safe and cost-effective shipping routes, the basic requirements for methods of choosing optimal routes in the waters of the Arctic seas have been developed. Using the method of multi-criteria evaluation of alternative routes according to a variety of safety criteria depending on the navigation period and the method of transport vessels navigation in ice is justified. A list of information necessary for implementation of the developed multi-criteria method for finding optimal routes and a list of the main stages of its implementation have been compiled. The results of testing the method of comparative evaluation of alternative routes using a set of simulation models are presented. Recommendations on the use of the developed method are given. The main directions of further research are determined.

Keywords: Northern Sea Route, shipping routes, safety criteria, transit time, Pareto optimization, modeling.

For citation:

Andreeva, Ekaterina V., and Aleksandr L. Tezikov. "Search for optimal shipping routes in the Arctic seas." *Vestnik Gosudarstvennogo universiteta morskogo i rechnogo flota imeni admirala S. O. Makarova* 15.2 (2023): 191–199. DOI: 10.21821/2309-5180-2023-15-2-191-199.

УДК 528.47

ПОИСК ОПТИМАЛЬНЫХ СУДОХОДНЫХ МАРШРУТОВ В АКВАТОРИИ АРКТИЧЕСКИХ МОРЕЙ

Е. В. Андреева, А. Л. Тезиков

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

Статья посвящена разработке метода выбора оптимальных судоходных маршрутов и определения условий, при которых Северный морской путь может быть использован круглогодично. Тема и цель исследования непосредственно связаны с задачами, реализация которых предусмотрена планом развития Северного морского пути, утвержденным распоряжением Правительства Российской Федерации 1 августа 2022 г., в соответствии с программой финансирования работ по созданию и внедрению цифровой платформы Северного морского пути, утвержденной Правительством в январе 2023 г. Дана оценка современного состояния сети судоходных маршрутов, навигационно-гидрографического и гидрометеорологического обеспечения, а также структуры и состава арктического ледокольного и транспортного флота. Отмечается, что к основным факторам, оказывающим влияние на реализацию программы круглогодичной навигации в Восточном секторе Арктики, относятся тяжелые ледовые условия, недостоверные прогнозы ледовой обстановки, отсутствие достаточного количества ледоколов и транспортных судов, способных на арктическом мелководье преодолевать поля толстых льдов. По результатам обзора существующих методов определения безопасных и экономически выгодных судоходных маршрутов разработаны основные

требования к методам выбора оптимальных маршрутов в акваториях арктических морей. Обосновано использование метода многокритериальной оценки альтернативных маршрутов по множеству критериев безопасности, зависящих от навигационного периода и способа плавания транспортных судов во льдах. Составлен перечень информации, необходимой для реализации разработанного многокритериального метода поиска оптимальных маршрутов, и перечень основных этапов его реализации. Приведены результаты проверки метода сравнительной оценки альтернативных маршрутов с использованием набора имитационных моделей. Даны рекомендации по использованию разработанного метода. Определены основные направления дальнейших исследований.

Ключевые слова: Северный морской путь, судоходные маршруты, критерии безопасности, время перехода, Парето-оптимизация, моделирование.

Для цитирования:

Андреева Е. В. Поиск оптимальных судоходных маршрутов в акватории арктических морей / Е. В. Андреева, А. Л. Тезиков // Вестник Государственного университета морского и речного флота имени адмирала С. О. Макарова. — 2023. — Т. 15. — № 2. — С. 191–199. DOI: 10.21821/2309-5180-2023-15-2-191-199.

Введение (Introduction)

1 августа 2022 г. распоряжением Правительства РФ утвержден обновленный план развития Северного морского пути (СМП) до 2035 г. [1], реализация которого направлена на решение стратегической задачи обеспечения круглогодичного судоходства в акватории СМП. В дополнение к плану Правительством РФ утвержден порядок финансирования создания цифровой экосистемы СМП, включающей единую платформу цифровых сервисов, предоставляемых в акватории СМП, бортовых автоматизированных информационно-вычислительных комплексов, комплексов оперативного мониторинга ледовой обстановки и информационного фонда данных о состоянии акватории СМП для обеспечения функционирования цифровых платформ маршрута [2]. Цифровая платформа должна способствовать решению задачи выбора безопасного (оптимального) маршрута для каждого судна в условиях непрерывно меняющейся ледовой и навигационной обстановки.

Круглогодичная навигация в акватории СМП осуществляется с 2006 г. только в юго-западной части Карского моря, отличающегося относительно легкими ледовыми условиями, сравнительно большими глубинами, небольшой протяженностью морских путей, высоким уровнем гидрографической изученности рельефа дна [3], [4], многолетними наблюдениями ледовой обстановки [5], [6] и активно развивающейся инфраструктурой [7]. Проблема круглогодичной навигации здесь решена вводом в эксплуатацию крупнотоннажных судов ледового класса Arc7, использованием ледоколов, проведением дноуглубительных работ в акватории портов и на подходах к ним, а также обоснованными прогнозами гидрометеорологической и ледовой обстановки в акватории [8]. В северо-восточной части Карского моря, а также в акватории моря Лаптевых, Восточно-Сибирского и Чукотского морей в зимне-весенний навигационный период (с середины ноября по декабрь и с января до середины июля) на регулярной основе судоходство не осуществляется. Основными причинами этого являются тяжелые ледовые условия и отсутствие достаточного количества ледоколов и транспортных судов, способных преодолевать льды толщиной более 3 м [9]. Судоходство в этих районах преимущественно осуществляется только в летне-осенний навигационный период (с середины июля до середины ноября).

Судоходство в акватории СМП выполняется по рекомендованным маршрутам, проложенным по участкам с хорошей гидрографической изученностью рельефа дна. Значительное отклонение от линии рекомендованного маршрута может привести в необследованную область с опасными глубинами [10]. Рекомендованные маршруты представляют собой оптимальные судоходные маршруты для судов с заданной осадкой в летне-осенний навигационный период при отсутствии льда, так как на них гарантировано плавание по безопасным глубинам и минимальное время перехода. При наличии льда рекомендованные маршруты остаются оптимальными по критерию безопасных глубин, но по времени перехода и критерию ледопроеходимости к оптимальным маршрутам могут не относиться. Кроме того, льды могут перегораживать линии рекомендованных маршрутов, тем самым делая их непригодными или опасными для плавания.

Существующие методы выбора оптимальных судоходных маршрутов [11], как правило, сводятся к *решению двухкритериальной задачи*, в которой в качестве критериев используются длина маршрута между двумя фиксированными точками и время перехода. Выбор оптимальных маршрутов в акватории СМП в общем случае предполагает решение многокритериальной задачи, в которой учитывается влияние нескольких факторов на безопасность судоходных маршрутов, их протяженность и время перехода. К основным факторам, влияющим на безопасность маршрута, относятся: глубины, толщина льда, стесненность, гидрографическая изученность, к экономическим — длина маршрута и время перехода по маршруту между двумя точками.

На практике используется два основных подхода к решению задачи выбора оптимальных маршрутов: *судоводительский* и *гидрографический*. Первый подход используется при проработке перехода конкретного судна и выборе его пути в реальных навигационных условиях в заданный период времени. Второй подход используется при разработке рекомендаций для плавания судов разных типов, основанной на обработке навигационно-гидрографической информации, данных многолетних наблюдений за изменениями состояния ледового покрова и опыте арктического судоходства.

Целью работы является исследование гидрографического подхода к решению задачи поиска оптимальных маршрутов в акватории СМП.

Методы и материалы (Methods and Materials)

В качестве основных источников информации для решения задачи поиска оптимальных маршрутов используются следующие документы и материалы:

- морские навигационные карты акватории СМП;
- обязательные постановления капитанов арктических портов;
- схемы гидрографической изученности;
- ледовые карты;
- результаты многолетних наблюдений изменчивости толщины льда по данным полярных станций;
- проектная документация строящихся и эксплуатируемых ледоколов и транспортных судов;
- руководящие документы, устанавливающие критерии допуска судов для плавания в акватории арктических морей.

Каждый маршрут r_i , принадлежащий к множеству маршрутов R , характеризуется длиной $l(r_i)$, минимальной глубиной $Z_{\min}(r_i)$, максимальной толщиной льда $h_{\max}(r_i)$, показателем гидрографической изученности $L(r_i)$ и шириной фарватера $B(r_i)$. Оценка маршрутов по критериям безопасности выполняется для расчетных судов с заданной ледопроходимостью $h_{\text{пр}}$ и осадкой d , осуществляющих самостоятельное плавание (СП) во льдах или плавание под проводкой ледокола (ПЛ). Набор частных критериев навигационной безопасности каждого маршрута включает следующие критерии: по осадке f_1 , по ледовым условиям f_2 , по стесненности f_3 , по гидрографической изученности f_4 , а также расчетное время перехода по маршруту T , характеризующему время перехода по маршруту.

Между двумя точками в акватории может быть проложено множество маршрутов R , среди которых необходимо выделить *оптимальные маршруты*, отвечающие требованиям безопасности и экономичности. Решение задачи осложняется противоречивым влиянием учитываемых факторов на оценку состояния маршрутов, а также зависимостью этого влияния от навигационного периода. Задачи подобного рода решаются методами многокритериальной оценки альтернатив [12], [13], включающими следующие основные этапы:

- этап 1 — выбор критериев и разработка оценочных шкал;
- этап 2 — формирование множества маршрутов (альтернатив);
- этап 3 — вычисление частных показателей безопасности для каждого маршрута;
- этап 4 — отбраковка маршрутов, непригодных для плавания судов в заданный навигационный период;
- этап 5 — формирование множества безопасных маршрутов в заданный навигационный период;

этап 6 — вычисление расчетного времени перехода по каждому безопасному маршруту;
этап 7 — выбор оптимальных маршрутов по критерию безопасности и критерию времени перехода.

Сравнительная оценка состояния маршрутов по частным критериям безопасности выполняется с использованием фазовых диаграмм. Каждый частный критерий f_k ($k = 1, \dots, 4$) определен на интервале $[0; 1]$. Условие $f_k = 0$ соответствует нулевому уровню безопасности маршрута, при котором использование маршрута для судоходства по критерию f_k запрещено. Условие $f_k = 1$ соответствует наивысшему уровню безопасности маршрута по критерию f_k . Для каждого частного критерия f_k вводятся нормированные шкалы $\varphi(f_k) \in [0; 1]$, а также пороговые значения частных критериев f_k^{*min} и f_k^{*max} , используемых для оценки безопасности маршрутов (рис. 1).

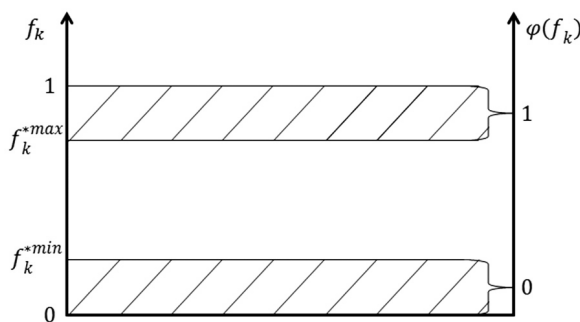


Рис. 1. Нормированная шкала $\varphi(f_k)$

К множеству *опасных маршрутов* по критерию f_k относятся все маршруты, для которых выполняется условие:

$$r_{\text{оп}}(f_k) = \{r_{\text{оп}} \in R \mid \varphi(f_k) = 0\}. \quad (1)$$

К множеству *безопасных маршрутов* по критерию f_k относятся все маршруты, для которых выполняется условие:

$$r_{\text{б}}(f_k) = \{r_{\text{б}} \in R \mid 0 < \varphi(f_k) < 1\}. \quad (2)$$

К *абсолютно безопасным* маршрутам по критерию f_k относится часть безопасных маршрутов, для которых выполняется условие:

$$r_{\text{а.б}}(f_k) = \{r_{\text{а.б}} \in R \mid \varphi(f_k) = 1\}. \quad (3)$$

Поиск оптимальных маршрутов r^* ведется среди безопасных маршрутов по величине показателя безопасности и расчетного времени перехода T по маршруту с использованием метода Парето оптимального поиска альтернатив» [13]. Если маршрут по критерию f_k оценивается как *абсолютно безопасный*, то он не влияет на выбор оптимальных маршрутов. В этом случае единственным критерием оптимизации является *время перехода*.

Задача поиска оптимальных маршрутов по времени перехода T и одному критерию безопасности f_k обобщается в задачу поиска по времени перехода T и четырем критериям безопасности: f_1, f_2, f_3, f_4 . К множеству *опасных маршрутов* по критериям f_1, f_2, f_3 и f_4 относятся все маршруты, для которых выполняется условие:

$$r_{\text{оп}}(f_1, f_2, f_3, f_4) = r_{\text{оп}} \in R \mid [\varphi(f_1) = 0] \vee [\varphi(f_2) = 0] \vee [\varphi(f_3) = 0] \vee [\varphi(f_4) = 0]. \quad (4)$$

К множеству безопасных маршрутов по критериям f_1, f_2, f_3 и f_4 относятся все маршруты, для которых выполняется следующее условие:

$$r_{\text{б}}(f_1, f_2, f_3, f_4) = r_{\text{б}} \in R \mid [0 < \varphi(f_1) < 1] \vee [0 < \varphi(f_2) < 1] \vee [0 < \varphi(f_3) < 1] \vee [0 < \varphi(f_4) < 1]. \quad (5)$$

К *абсолютно безопасным* маршрутам по критериям f_1, f_2, f_3 и f_4 относится часть безопасных маршрутов, для которых выполняется условие:

$$r_{a.6}(f_1, f_2, f_3, f_4) = r_{a.6} \in R \mid [\varphi(f_1) = 1] \vee [\varphi(f_2) = 1] \vee [\varphi(f_3) = 1] \vee [\varphi(f_4) = 1]. \quad (6)$$

Поиск оптимальных маршрутов r^* ведется среди безопасных маршрутов по величине каждого из четырех показателей безопасности и расчетного времени перехода T по маршруту с использованием метода Парето оптимального поиска альтернатив». Критерии, по которым маршруты оцениваются как *абсолютно безопасные*, не влияют на выбор оптимальных маршрутов, что позволяет их не использовать.

Результаты (Results)

Проверка метода поиска оптимальных маршрутов выполнена с использованием модели, схема которой приведена на рис. 2.

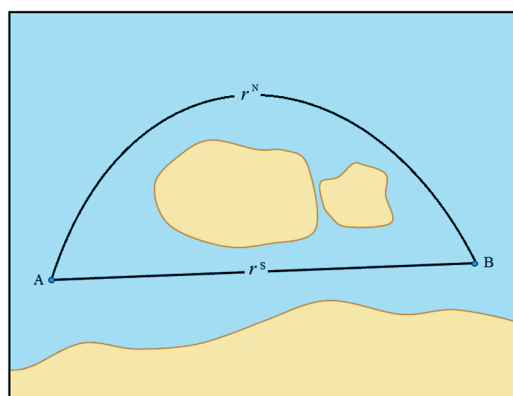


Рис. 2. Маршруты в акватории СМП

Между точками A и B проложено два маршрута: r^N — северный маршрут и r^S — южный маршрут. Маршруты проходят вблизи берегов, обозначенных на схеме коричневым цветом. В табл. 1 приведены характеристики маршрутов, отличающихся длиной и значениями минимальных глубин. По состоянию ледовых условий выделено три периода: лед на маршрутах отсутствует (июль — сентябрь), толщина льда составляет 100 см (декабрь — январь) и толщина льда составляет 200 см.

Таблица 1

Характеристика маршрутов

Маршрут	Характеристика маршрутов				
	Длина, мили	Глубины минимальные, м	Толщина льда, см		
			июль – сентябрь	декабрь – январь	апрель – май
Северный, r^N	860	19,0	0	100	200
Южный, r^S	720	13,0			

Оценивается возможность круглогодичного плавания судов ледовой категории Arc4 и ледовой категории Arc7 при их самостоятельном плавании (СП) по маршрутам и при плавании (Пл.) под проводкой ледоколов Icebreaker8 и Icebreaker9. Характеристики судов и их ледопроеходимости в зависимости от способа плавания приведены в табл. 2.

Таблица 2

Характеристика судов

Номер судна	Ледовый класс	Осадка, м	Ледопроеходимость, м			
			Летне-осенний период		Зимне-весенний период	
			СП	Пл	СП	Пл
1	Arc4	9,0	0,8	1,0	0,6	0,7
2	Arc7	11,0	1,7	3,2	1,4	2,0
3	Icebreaker8	8,5	Без ограничений	–	3,0	–
4	Icebreaker9	13,0	Без ограничений	–	4,0	–

Допускается, что факторы стесненности и гидрографической изученности рельефа дна при плавании по маршрутам r^N и r^S не представляют опасности. На этом основании $f_3 = 1$ и $f_4 = 1$. Результаты оценки маршрутов по критериям f_1, f_2 и T при отсутствии льда приведены в табл. 3.

Таблица 3

**Оценка маршрутов по критериям f_1, f_2 и T
при отсутствии льда**

Номер варианта	Номер судна (способ плавания)	Северный маршрут r^N			Южный маршрут r^S		
		$\Phi(f_1)$	$\Phi(f_2)$	T , ч	$\Phi(f_1)$	$\Phi(f_2)$	T , ч
1	1(СП)	0,53	1	57	0,31	1	48
2	2(СП)	0,42	1	57	0,15	1	48
3	3	0,55	1	57	0,35	1	48
4	4	0,32	1	57	0	1	—

При отсутствии льда плавание судов оценивается только по критерию f_1 и времени перехода T судна по маршруту. Южный маршрут для первых трех вариантов плавания оказывается более предпочтительным по времени перехода. Использование четвертого варианта плавания по южному маршруту должно быть запрещено по критерию f_1 . Этот вариант (плавание ледокола Icebreaker9, имеющего осадку 13 м) может быть реализован только по северному маршруту. Северный маршрут для всех четырех вариантов является наиболее предпочтительным по критерию f_1 . Результаты оценки маршрутов по критериям f_1, f_2 и T при толщине льда 100 см приведены в табл. 4.

Таблица 4

**Оценка маршрутов по критериям f_1, f_2 и T
при толщине льда 100 см**

Номер варианта	Номер судна (способ плавания)	Северный маршрут, r^N			Южный маршрут, r^S		
		$\Phi(f_1)$	$\Phi(f_2)$	T , ч	$\Phi(f_1)$	$\Phi(f_2)$	T , ч
5	1(СП)	0,53	0	—	0,31	0	—
6	2(СП)	0,42	0,28	205	0,15	0,28	180
7	3	0,55	0,67	86	0,35	0,67	72
8	4	0,32	0,77	75	0	0,77	—
9	1(ПЛЗ)	0,53	0	—	0,31	0	—
10	1(ПЛ4)	0,32	0	—	0	0	—
11	2(ПЛЗ)	0,42	0,50	123	0,15	0,50	103
12	2(ПЛ4)	0,32	0,50	123	0	0,50	—

В табл. 4 варианты 9–12 соответствуют вариантам плавания судна 1 или 2 под проводкой ледокола 3 или 4. Наличие льда приводит к увеличению времени перехода по северному и южному маршруту, а также накладывает запрет на возможность использования вариантов плавания 5, 9 и 10 для северного маршрута. Совместное влияние льда и малых глубин накладывает запрет на возможность использования вариантов плавания 5, 8, 9, 10 и 12 для южного маршрута.

Судно № 1 не может использоваться ни на одном из маршрутов при любом варианте плавания. Судно № 2 может использоваться при самостоятельном плавании на обоих маршрутах (вариант 6). При этом южный маршрут является предпочтительным по времени перехода, но более опасным по критерию f_1 . Оптимальным для судна № 2 является его плавание по северному маршруту под проводкой ледокола (вариант 11), на котором обеспечивается преимущество по времени перехода и критерию f_2 . Результаты оценки маршрутов по критериям f_1, f_2 и T при толщине льда 200 см приведены в табл. 5.

Таблица 5

**Оценка маршрутов по критериям f_1, f_2 и T
при толщине льда 200 см**

Номер варианта	Номер судна (способ плавания)	Северный маршрут, r^N			Южный маршрут, r^S		
		$\varphi (f_1)$	$\varphi (f_2)$	$T, \text{ч}$	$\varphi (f_1)$	$\varphi (f_2)$	$T, \text{ч}$
13	1(СП)	0,53	0	—	0,31	0	—
	2(СП)	0,42	0	—	0,15	0	—
15	3	0,55	0,33	173	0,35	0,33	144
16	4	0,32	0,53	107	0	0,53	—
17	1(ПЛЗ)	0,53	0	—	0,31	0	—
18	1(ПЛ4)	0,32	0	—	0	0	—
19	2(ПЛЗ)	0,42	0,22	287	0,15	0,22	240
20	2(ПЛ4)	0,32	0,22	287	0	0,22	—

В табл. 5 варианты 17–20 соответствуют вариантам плавания судна 1 или 2 под проводкой ледокола 3 или 4. Судно № 1 не может использоваться ни на одном из маршрутов при любом варианте плавания (варианты 13, 17 и 18). Судно № 2 на северном маршруте может использоваться под проводкой ледокола № 3 (вариант 19) или № 4 (вариант 20), а на южном маршруте оно может использоваться только под проводкой ледокола № 3 (вариант 19). По времени перехода преимущество имеет южный маршрут (вариант 19). Однако по критерию f_1 южный маршрут уступает северному. При прочих равных условиях вариант 19 по сравнению с вариантом 20 имеет преимущество по критерию f_1 .

Обсуждение (Discussions)

Полученные в ходе моделирования результаты хорошо согласуются с данными реального судоходства. Вместе с тем следует отметить, что проверка метода выбора оптимальных маршрутов и вариантов плавания не учитывает всего разнообразия возможных судоходных маршрутов, ледовых условий, типов используемых судов, а также факторов, влияющих на безопасность и эффективность судоходства. В модели использован локальный фрагмент трассы, поэтому полученные оценки и заключения относятся только к нему и не могут без дополнительного обоснования быть распространены на другие участки маршрута, расположенные вне границ этого фрагмента.

Реальное распределение толщины льда в акватории отличается не только по величине, но и по разнообразию. При моделировании использованы максимальные значения толщины припайного льда, полученные на полярных станциях в используемые навигационные периоды. Очевидно, что измеряемая на полярных станциях толщина припайного льда может существенно отличаться от распределения толщины льда по маршрутам движения судов, находящихся на значительном расстоянии от полярных станций, а кроме того, проложенных в зонах распространения плавучих льдов.

Принятое при моделировании допущение о том, что линии маршрутов, соответствующих летне-осеннему и зимне-весеннему периодам навигации совпадают, на практике, как правило, не соблюдается. В зимне-весенний навигационный период маршруты могут отклоняться от летних маршрутов на значительные расстояния, что естественным образом влияет на сравнительную оценку маршрутов по критериям безопасности. Учет влияния отклонений маршрутов на оценку их безопасности требует дополнительного специального исследования. Вместе с тем полученные результаты позволяют оценивать безопасность использования маршрутов различными типами судов как при их самостоятельном плавании, так и под проводкой ледоколов с использованием множества количественных оценок.

Заключение (Conclusion)

Проблема перехода к круглогодичной навигации во всей акватории Северного морского пути включает комплекс взаимосвязанных задач, к которым относятся:

- строительство новых судов и оптимизация структуры арктического флота;
- развитие системы навигационно-гидрографического и гидрометеорологического обеспечения;
- создание единой сети информационно-измерительных комплексов, расположенных на полярных станциях, на судах и космических аппаратах;
- разработка новых методов и моделей.

Настоящая работа посвящена решению части указанных задач. По мере поступления актуальной информации разрабатываемый метод будет совершенствоваться.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Распоряжение Правительства РФ от 1 августа 2022 г. № 2115-р. «Об утверждении плана развития Северного морского пути на период до 2035 г.» [Электронный ресурс]. — Режим доступа: <http://government.ru/news/46171/> (дата обращения: 10.01.2023).
2. Постановление Правительства Российской Федерации от 12.01.2023 № 8 «Об утверждении Правил предоставления субсидии из федерального бюджета на обеспечение создания цифровой экосистемы Северного морского пути» [Электронный ресурс]. — Режим доступа: <http://publication.pravo.gov.ru/Document/View/0001202301160013> (дата обращения: 20.01.2023).
3. *Шацбергер Э. М.* Тактика плавания во льдах. Ледовые пути Арктики / Э. М. Шацбергер. — СПб.: Артиком, 2012. — 400 с.
4. *Афонин А. Б.* Комплексная оценка безопасности плавания в акватории Северного морского пути / А. Б. Афонин // Вестник Государственного университета морского и речного флота имени адмирала С. О. Макарова. — 2018. — Т. 10. — № 6. — С. 1132–1142. DOI: 10.21821/2309-5180-2018-10-6-1132-1142.
5. *Егоров А. Г.* Изменение возрастного состава и толщины зимнего покрова арктических морей России в начале XXI века / А. Г. Егоров // Проблемы Арктики и Антарктики. — 2020. — Т. 66. — № 2. — С. 124–143. DOI: 10.30758/0555-2648-2020-66-2-124-143.
6. *Смоляницкий В. М.* Сравнительный анализ прямых измерений толщин льда и высот снега, наблюдений Cryosat — 2 и численных оценок системы PIOMAS / В. М. Смоляницкий, А. Б. Тюряков, К. В. Фильчук, И. Е. Фролов // Проблемы Арктики и Антарктики. — 2020. — Т. 66. — № 3. — С. 337–348. DOI: 10.30758/0555-2648-2020-66-3-337-348.
7. *Башмакова Е. П.* Развитие Северного морского пути и инфраструктуры арктической транспортной системы / Е. П. Башмакова, М. В. Ульченко // Региональные проблемы преобразования экономики. — 2019. — № 12 (110). — С. 88–96. DOI: 10.26726/1812-7096-2019-12-88-96.
8. Вячеслав Рукша, Росатом: «На СМП можно переориентировать до 15 % грузопотока из Суэцкого канала» [Электронный ресурс]. — Режим доступа: <https://www.atomic-energy.ru/statements/2022/10/13/129239> (дата обращения 25.01.2023).
9. Проблемы Северного морского пути / Отв. ред. А. Г. Гранберг, В. И. Пересыпкин. — М.: Наука, 2006. — 580 с.
10. *Андреева Е. В.* Учет влияния гидрографической изученности на безопасность плавания крупнотоннажных судов в акватории Северного морского пути / Е. В. Андреева, К. Я. Исаулова, А. Л. Тезиков // Вестник Государственного университета морского и речного флота имени адмирала С. О. Макарова. — 2019. — Т. 11. — № 5. — С. 856–866. DOI: 10.21821/2309-5180-2019-11-5-856-866.
11. *Акмайкин Д. А.* Эвристический поиск оптимального маршрута судна по северному морскому пути / Д. А. Акмайкин, С. Ф. Ключева, П. А. Салюк // Вестник Государственного университета морского и речного флота имени адмирала С. О. Макарова. — 2015. — № 5 (33). — С. 55–62. DOI: 10.21821/2309-5180-2015-7-5-55-62.
12. *Андреева Е. В.* Многокритериальный подход в задаче выбора оптимальных маршрутов в акватории Северного морского пути / Е. В. Андреева // Вестник Государственного университета морского и речного флота имени адмирала С. О. Макарова. — 2021. — Т. 13. — № 3. — С. 399–408. DOI: 10.21821/2309-5180-2021-13-3-399-408.
13. *Ногин В. Д.* Принятие решений в многокритериальной среде / В. Д. Ногин. — М.: Физматлит, 2005. — 176 с.

REFERENCES

1. Rasporyazhenie Pravitel'stva RF ot 1 avgusta 2022 g. № 2115-r. «Ob utverzhdenii plana razvitiya Severnogo morskogo puti na period do 2035 g. Web. 10 Jan. 2023 <<http://government.ru/news/46171/>>.
2. Postanovlenie Pravitel'stva Rossiiskoi Federatsii ot 12.01.2023 № 8 «Ob utverzhdenii Pravil predostavleniya subsidii iz federal'nogo byudzheta na obespechenie sozdaniya tsifro-voi ekosistemy Severnogo morskogo puti». Web. 20 Jan. 2023 <<http://publication.pravo.gov.ru/Document/View/0001202301160013>>.
3. Shatsberger, E. M. *Taktika plavaniya vo l'dakh. Ledovye puti Arktiki*. SPb.: Artikom, 2012.
4. Afonin, Andrej B. "A comprehensive assessment of the safety of navigation in the water area of the Northern sea route." *Vestnik Gosudarstvennogo universiteta morskogo i rechnogo flota imeni admirala S. O. Makarova* 10.6 (2018): 1132–1142. DOI: 10.21821/2309-5180-2018-10-6-1132-1142.
5. Egorov, Alexander G. "The Russian arctic seas ice age composition and thickness variation in winter periods at the beginning of the 21st century." *Arctic and Antarctic Research* 66.2 (2020): 124–143.
6. Smolyanitsky, Vasily M., Andrey B. Turyakov, Kirill V. Filchuk, and Ivan E. Frolov. "Comparison of direct measurements of sea ice thickness and snow height, CryoSat-2 observations and PIOMAS numerical estimates." *Problems of the Arctic and Antarctic* 66.3 (2020): 337–348. DOI: 10.30758/0555-2648-2020-66-3-337-348.
7. Bashmakova, Elena Petrovna, and Mikhail Vasilievich Ulchenko. "Development of the Northern Sea Route and infrastructure Arctic transport system." *Regional problems of transforming the economy* 12(110) (2019): 88–96. DOI: 10.26726/1812-7096-2019-12-88-96.
8. Vyacheslav Ruksha, Rosatom: «Na SMP možno pereorientirovat' do 15 % gruzopotoka iz Suetskogo kanala». Web. 25 Jan. 2023 <<https://www.atomic-energy.ru/statements/2022/10/13/129239>>.
9. Granberg, A.G., and V. I. Peresypkin, eds. *Problemy Severnogo morskogo puti*. M.: Nauka, 2006.
10. Andreeva, Ekaterina V., Kristina Y. Esaulova, and Aleksandr L. Tezikov. "Accounting the impact of hydrographic studies on the safety of navigation of large-tonnage vessels in the Northern Sea Route water area." *Vestnik Gosudarstvennogo universiteta morskogo i rechnogo flota imeni admirala S. O. Makarova* 11.5 (2019): 856–866. DOI: 10.21821/2309-5180-2019-11-5-856-866.
11. Akmaykin, Denis Aleksandrovich, Svetlana Fedorovna Klyueva, and Pavel Anatolievich Salyuk. "Heuristic search for the optimal route ship Northern Sea Route." *Vestnik Gosudarstvennogo universiteta morskogo i rechnogo flota imeni admirala S. O. Makarova* 5(33) (2015): 55–62. DOI: 10.21821/2309-5180-2015-7-5-55-62.
12. Andreeva, Ekaterina V. "Multi-criteria approach to the problem of choosing the optimal routes in the waters of the Northern Sea Route." *Vestnik Gosudarstvennogo universiteta morskogo i rechnogo flota imeni admirala S. O. Makarova* 13.3 (2021): 399–408. DOI: 10.21821/2309-5180-2021-13-3-399-408.
13. Nugin, V. D. *Prinyatie reshenii v mnogokriterial'noi srede*. M.: Fizmatlit, 2005.

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

Андреева Екатерина Валерьевна — ассистент
ФГБОУ ВО «ГУМРФ имени адмирала
С. О. Макарова»
198035, Российская Федерация, Санкт-Петербург,
ул. Двинская, 5/7
e-mail: kaf_gm@gumrf.ru
Тезиков Александр Львович —
доктор технических наук, профессор
ФГБОУ ВО «ГУМРФ имени адмирала
С. О. Макарова»
198035, Российская Федерация, Санкт-Петербург,
ул. Двинская, 5/7
e-mail: altezikov@yandex.ru, TezikovAL@gumrf.ru

INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Andreeva, Ekaterina V. — Assistant
Admiral Makarov State University of Maritime
and Inland Shipping
5/7 Dvinskaya Str., St. Petersburg, 198035,
Russian Federation
e-mail: kaf_gm@gumrf.ru
Tezikov, Aleksandr L. — Dr. of Technical Sciences,
professor
Admiral Makarov State University of Maritime
and Inland Shipping
5/7 Dvinskaya Str., St. Petersburg, 198035,
Russian Federation
e-mail: altezikov@yandex.ru, TezikovAL@gumrf.ru

Статья поступила в редакцию 29 января 2023 г.
Received: January 29, 2023.

THEORETICAL FOUNDATIONS OF FREEING SHIPS FROM HEAVY ICE CONDITIONS

A. A. Ershov, A. M. Boiarinov, A. A. Gakkel

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

The topic of the study is to prevent damage to the ships hulls when sailing in polar waters in severe ice conditions, which is a dangerous situation that threatens environmental pollution and possible death of the vessel, its passengers and crew. It is noted that the intensive development of ice navigation in the development of the Arctic regions of the Russian Federation and other polar waters requires the development and improvement of methods for freeing ships trapped in heavy ice. Navigation of vessels in severe ice conditions is accompanied by significant difficulties and dangers for the vessel, its passengers and crew. This situation can be significantly aggravated if, at a certain stage of navigation in ice conditions, heavy ice begins to move, leading to compression of the ice channel in which the vessel is located. At the same time, the risk of the vessel hull destruction, the creation of water leakage and the possible death of the vessel, its passengers and crew increases, as well as environmental pollution occurs. The theoretical foundations of freeing a vessel from severe ice conditions, based on the principles of rocking and pushing, as well as cutting ice, clamping the vessel, which have proven their effectiveness in other fields of science and technology, are discussed in the paper. The use of the vessel theory apparatus and the experience of ice-breaking assistance make it possible to substantiate the possibility of effective application of methods of rocking, pushing and chopping ice to release ships caught in severe ice conditions. The theoretical possibility of using combinations of the operation of the ballast system, cargo booms and cranes, special actions of the crew trapped in the ice of the vessel, as well as its interaction with icebreakers and other vessels for cutting the clamping ice, rocking and pushing, increasing the efficiency of freeing the vessel from severe ice conditions, is shown. The materials of the paper can be used to develop practical recommendations for freeing ships from heavy ice conditions independently and using icebreakers and other vessels.

Keywords: ice navigation, severe ice conditions, vessel release, ballast system, icebreaker use, practical recommendations, special actions of the crew.

For citation:

Ershov, Andrey A., Aleksandr M. Boiarinov, and Alexey A. Gakkel. "Theoretical foundations of freeing ships from heavy ice conditions." *Vestnik Gosudarstvennogo universiteta morskogo i rechnogo flota imeni admirala S. O. Makarova* 15.2 (2023): 200–214. DOI: 10.21821/2309-5180-2023-15-2-200-214.

УДК 655.62.052.4

ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ ВЫСВОБОЖДЕНИЯ СУДОВ ИЗ ТЯЖЕЛЫХ ЛЕДОВЫХ УСЛОВИЙ

А. А. Ершов, А. М. Бояринов, А. А. Гаккель

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

Темой исследования является предотвращение повреждения корпусов судов при плавании в полярных водах в тяжелых ледовых условиях, представляющее собой опасную ситуацию, которая грозит экологическими загрязнениями и возможной гибелью судна, его пассажиров и экипажа. Отмечается, что интенсивное развитие ледового плавания при освоении арктических регионов Российской Федерации и других полярных вод требует разработки и совершенствования методов освобождения судов, зажатых в тяжелых льдах. Плавание судов в тяжелых ледовых условиях сопровождается значительными трудностями и опасностями для судна, его пассажиров и экипажа. Такая ситуация может значительно усугубляться в том случае, если на определенном этапе плавания в ледовых условиях начинается подвизжка тяжелых льдов, приводящая к сжатию ледового канала, в котором находится судно. При этом

возрастает опасность разрушения корпуса судна, создания водотечности и возможной гибели судна, его пассажиров и экипажа, а также происходит загрязнение окружающей среды. В статье рассматриваются теоретические основы высвобождения судна из тяжелых ледовых условий, основанные на принципах раскачивания и толкания, а также рубки льда, зажимающего судна, которые доказали свою эффективность в других областях науки и техники. Использование аппарата теории судна и опыта ледовых проводок позволили обосновать возможность эффективного применения методов раскачивания, толкания и рубки льда для высвобождения судов, оказавшихся в тяжелых ледовых условиях. Показана теоретическая возможность использования комбинаций работы балластной системы, грузовых стрел и кранов, специальных действий экипажа зажатого во льду судна, а также его взаимодействия с ледоколами и другими судами для рубки зажимающего льда, раскачивания и толкания, увеличивающих эффективность высвобождения судна из тяжелых ледовых условий. Материалы статьи могут быть использованы для разработки практических рекомендаций по высвобождению судов из тяжелых ледовых условий самостоятельно, а также с использованием ледоколов и других судов.

Ключевые слова: ледовое плавание, тяжелые ледовые условия, высвобождение судна, балластная система, использование ледоколов, практические рекомендации, специальные действия экипажа

Для цитирования:

Ершов А. А. Теоретические основы высвобождения судов из тяжелых ледовых условий / А. А. Ершов, А. М. Бояринов, А. А. Гаккель // Вестник Государственного университета морского и речного флота имени адмирала С. О. Макарова. — 2023. — Т. 15. — № 2. — С. 200–214. DOI: 10.21821/2309-5180-2023-15-2-200-214.

Введение (Introduction)

Высвобождение судна, зажатого в тяжелых ледовых условиях, может рассматриваться как самостоятельный выход судна из ледового плена или освобождение его с использованием ледоколов или других судов. В настоящее время наиболее распространенным вариантом освобождения судна, зажатого в тяжелых льдах, является его окалывание (околка) с использованием ледокола. В других областях науки и техники (например, в столярном или слесарном деле) для освобождения зажатых деталей, элементов конструкций или механизмов используется их раскручивание (раскачивание) на небольшие углы для снижения трения и / или толкание (например, удары молотком или киянкой с торцевой части детали), которые приводят к высвобождению зажатой детали или конструкции (рис. 1).

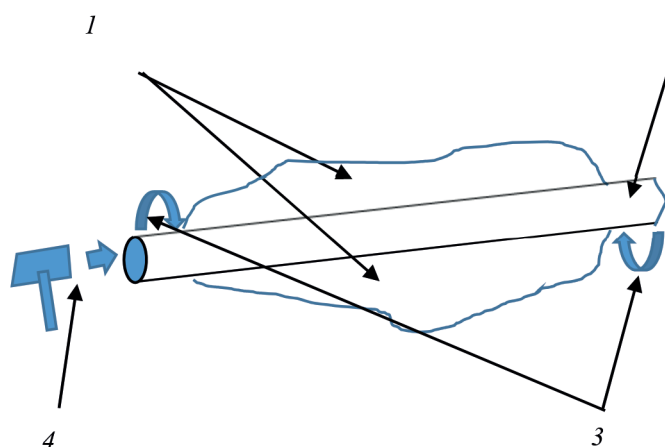


Рис. 1. Раскачивание и толкание зажатой в каркасе детали или конструкции для ее высвобождения:

- 1 — каркас, зажимающий деталь или конструкцию;
- 2 — деталь или конструкция, зажатая в каркасе;
- 3 — раскручивание (раскачивание) детали или конструкции для высвобождения из каркаса;
- 4 — толкание (выталкивание) детали или конструкции для высвобождения из каркаса

Если раскачивание и выталкивание зажатой детали не приводят к необходимой цели, то в различных областях техники используется разрушение каркаса, зажимающего деталь. Разрушение

зажимающего каркаса может происходить *жестким способом* — непосредственной рубкой удерживающей конструкции. Рубка с целью разрушения удерживающего каркаса *наиболее эффективна*, если происходит с использованием ударов, направленных перпендикулярно зажатой детали (рис. 2).

Может применяться также менее эффективный и надежный вариант — последовательное «срезание» и уменьшение толщины удерживающей конструкции, происходящее параллельно зажатой детали для уменьшения прочности зажимающего каркаса. В результате через определенный период времени зажимающий каркас должен разрушиться и освободить зажатую деталь.

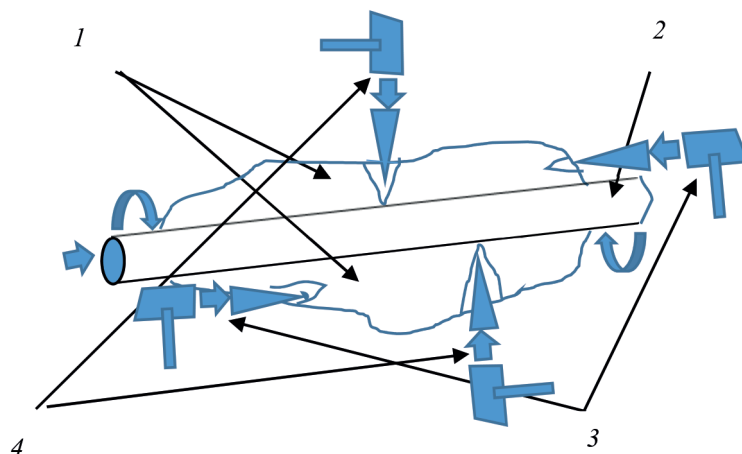


Рис. 2. Рубка или срезание зажимающего каркаса для его разрушения и высвобождения зажатой детали:

- 1 — зажимающий деталь или конструкцию каркас; 2 — зажатая в каркасе деталь или конструкция;
3 — срезание (уменьшение толщины) зажимающей деталь каркаса (менее эффективный вариант);
4 — рубка зажимающей деталь каркаса (более эффективный вариант)

Среди способов, используемых для освобождения судов, зажатых тяжелыми льдами, в настоящее время применяется тот, который является наименее эффективным: *окалывание (околка) судна при помощи ледокола* (рис. 3), аналогичный срезанию зажимающего каркаса (льда). Во избежание повреждений и сохранения целостности судов околка ледоколом чаще всего проводится вдоль корпуса окалываемого судна, что приводит к постепенному уменьшению слоя зажимающего льда и, соответственно, к его разрушению и высвобождению зажатого судна. Как отмечалось ранее, этот способ не является эффективным, но активно используется в судоходстве.

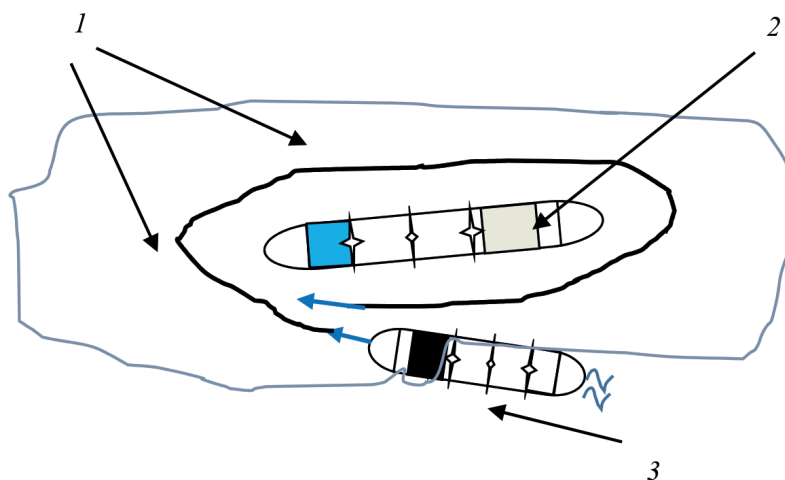


Рис. 3. Окалка (окалывание) судна, зажатого в тяжелых льдах с использованием ледокола:

- 1 — зажимающие судно тяжелые льды; 2 — судно, зажатое в тяжелых льдах;
3 — ледокол, окалывающий судно, зажатое в тяжелых льдах

Для освобождения судов, зажатыми тяжелыми льдами, в настоящее время в основном применяется окалывание (околка) корпуса зажатого судна с использованием ледокола (рис. 3). Раскачивание и толкание зажатого судна и рубка льда как способы, доказывающие свою эффективность в других областях техники при освобождении судов в тяжелых льдах, практически не используются. Это снижает эффективность высвобождения судов, зажатых в тяжелых ледовых условиях ввиду отсутствия теоретических обоснований и практических рекомендаций по использованию новых способов высвобождения судов из тяжелых льдов.

В 2017 г. вступил в действие «Международный полярный кодекс», имеющий обязательный статус для всех судов, осуществляющих плавание в полярных водах, который предусматривает наличие на судах обязательных рекомендаций в случае чрезвычайной ситуации [1]–[4]. Наличие подобных рекомендаций является обязательным условием эксплуатации судна в полярных водах. Для повышения эффективности высвобождения судна в условиях тяжелого ледового плавания используются системы пневмообмыва корпуса, устанавливаемые в основном на ледоколах и других специализированных судах, а также устанавливаются особые режимы работы двигательно-движительного комплекса, заведение ледовых якорей и другие мероприятия, к которым относятся: перекачка водяного балласта судна, выполнение различных видов маневрирования судна в ледовых условиях и др.

Особенности маневрирования судна в ледовых условиях рассматривались в работе [5]. Перекачка балласта для предотвращения застраивания судна при сжатии ледового канала используется судами, осуществляющими плавание в ледовых условиях [6]–[8]. Это мероприятие позволяет бороться с «зажимом» корпуса льдами для осуществления движения в условиях сжатия ледового канала. В указанных ранее работах отмечалось, что основным преимуществом применения перекачки балласта является независимость этих процедур от других мероприятий, связанных с движением судна и их высвобождением из ледового плена, т. е. она может осуществляться вместе с особыми режимами работы двигательно-движительного комплекса судна, заведением ледовых якорей и т. п. Также отмечалось, что перекачка балласта может быть эффективной для предотвращения повреждения корпусов судов любых типов, осуществляющих ледовое плавание как самостоятельно, так и в составе ледового каравана. Мероприятия по перекачке балласта имеют также и другие преимущества, которые могут предотвратить повреждение корпуса судна и способствовать высвобождению судна в условиях сжатия ледового канала [9], [10].

Существенным недостатком перекачки балласта для высвобождения судна из тяжелых льдов является длительность процедур, которые могут занимать часы, необходимые для их осуществления. Это явно не соответствует принципам раскачивания судна, которые доказали свою эффективность в других областях техники. Как отмечалось ранее, в настоящее время в качестве основного метода освобождения судна в тяжелых льдах используется околка ледоколом, что аналогично малоэффективному срезанию зажимающего каркаса, удерживающего судно. Более эффективные методы: раскачивание и толкание зажатого льдом судна и рубка льда, доказавшие свою эффективность в других областях техники, в ледовых условиях плавания практически не используются.

В настоящее время отсутствие единых теоретических подходов к высвобождению судов в тяжелых условиях ледового плавания не позволяет использовать достижения в других областях науки и техники. Отсутствие необходимой теоретической базы не позволяет развивать существующие методы эксплуатации судов в тяжелых льдах, что может отрицательно сказаться на выполнении поставленных Российской Федерацией задач по развитию и освоению арктических регионов. Настоящая статья посвящена теоретическим основам освобождения судов, зажатых в тяжелых льдах, направленным на обоснование использования новых способов, доказавших свою эффективность в других областях техники.

Методы и материалы (Methods and Materials)

Как отмечалось ранее, методы высвобождения судна в тяжелых ледовых условиях, доказавшие эффективность также в других областях науки и техники, являются раскачивание и толкание зажатого льдом судна, а также рубка льда, зажимающего судно. Кроме того, могут применяться

комбинации этих методов. В настоящее время на флоте эти методы практически не применяются в силу отсутствия теоретических положений их применения на судах в ледовых условиях и, как следствие, практических рекомендаций по их использованию. К менее эффективным относится окалывание (околка) зажатого судна, применяемая в настоящее время в ледовых условиях с использованием ледокола.

Теоретические основы обеспечения раскачивания судна, зажатого в тяжелых ледовых условиях, предполагают выполнение следующих мероприятий: обеспечение самостоятельного раскачивания судна, зажатого в тяжелых льдах, обеспечение раскачивания с использованием других судов и ледоколов.

1. Обеспечение самостоятельного раскачивания судна, зажатого в тяжелых льдах.

Перекачка балласта. Перекачка балласта как метод, предотвращающий разрушающее воздействие на корпус и способствующий его освобождению из тяжелых льдов, рассмотрен в работе [5].

К преимуществам данного метода относится одновременное кренящее воздействие массы перекачиваемого балласта и дополнительное появление свободных поверхностей при перекачке балласта, снижающее остойчивость зажатого судна, приводящее к увеличению его крена при самостоятельном раскачивании. В соответствии с положениями [5] уравнение моментов при перекачке балласта, зажатого льдом судна, будет иметь следующий вид:

$$\operatorname{tg} \theta = \frac{p_6(y_{62} - y_{61}) - p_{\text{л}}B}{Ph}, \quad (1)$$

где θ — угол крена судна, град;

B — ширина судна, м;

P — весовое водоизмещение судна, кН;

p_6 — вес перекачанного балласта, кН;

$p_{\text{л}}$ — сила давления корпуса на лед вследствие накренения судна после перекачки балласта, кН;

h — метацентрическая высота, м;

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

Согласно выражению (1), уменьшение метацентрической высоты судна при перекачке балласта за счет появления дополнительных свободных поверхностей увеличивает угол крена, способствует самостоятельному раскачиванию судна и высвобождению его из ледового плена. Перекачка балласта может рассматриваться как дополнительная сопутствующая процедура при выполнении других более эффективных мероприятий по раскачке судна.

Существенным недостатком раскачивания судна для высвобождения из ледового плена является длительность процедуры перекачки балласта.

Подъем – постановка груза на палубу. Раскачивание судна путем подъема и постановки груза может происходить при использовании судовых грузовых стрел или кранов. Преимуществом данного метода самостоятельного раскачивания, зажатого в тяжелых льдах судна, является то, что при раскачивании судна подъемом и опусканием грузов своими грузовыми кранами или стрелами начальный крен судна достигается быстро за счет изменения поперечной метацентрической высоты (h). Величина начального крена, возникающего при подъеме грузов с использованием судовых стрел или кранов, может быть определена в виде

$$\operatorname{tg} \theta = \frac{\sum_{i=1}^n p_{\text{г}i} y_{\text{г}i}}{Ph_1}, \quad (2)$$

где n — количество поднимаемых грузов, шт.;

$p_{\text{г}i}$ — вес поднимаемого i -го груза;

$y_{\text{г}i}$ — отстояние i -го груза от диаметральной плоскости судна (ДП), м;

h_1 — новое значение метацентрической высоты судна в момент подъема груза, м.

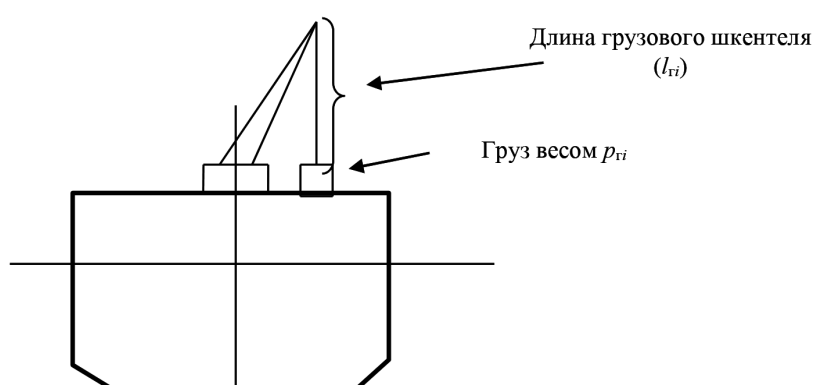
Величина h_1 в уравнении (2) определяется следующим образом:

$$h_1 = h - \frac{\sum_{i=1}^n p_{gi} l_{gi}}{P} \quad (3)$$

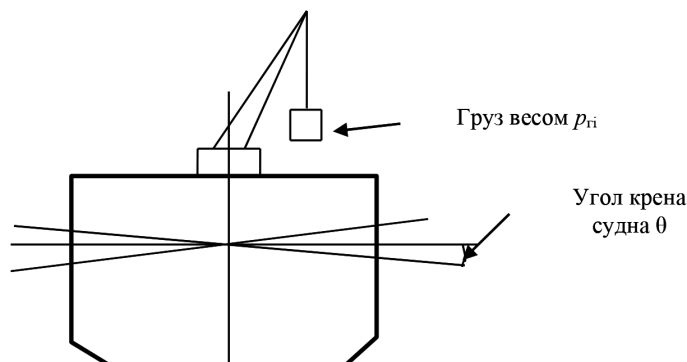
где h — начальная метацентрическая высота судна до подъема груза своими кранами или стрелами;
 l_{gi} — длина шкентеля i -го судового крана или судовой стрелы, на которой осуществляется подъем груза для создания колебаний судна (рис. 4).

Недостатками подъема – постановки груза на палубу как метода самостоятельного раскачивания, зажатого в тяжелых льдах судна, является то, что этот способ недоступен для судов, у которых конструктивно отсутствуют грузовые стрелы или краны для подъема и опускания груза. Проблема в данном случае может быть решена путем установки временных кранов или автомобилей с кранами.

а)



б)



в)

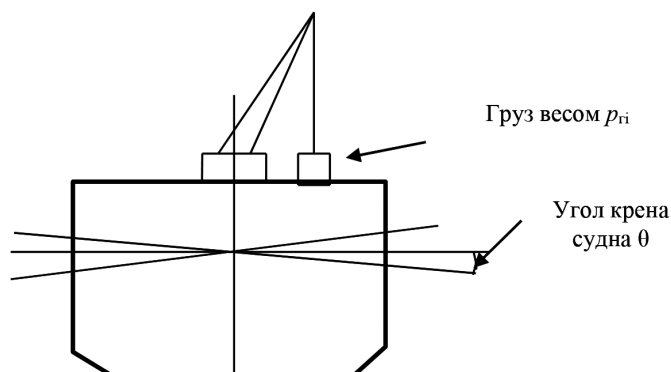


Рис. 4. Раскачивание судна подъемом и постановкой груза судовой грузовой стрелой (краном):

- a — выбор груза для подъема и постановки на палубу;
 $б$ — подъем груза своей грузовой стрелой (грузовым краном);
 $в$ — постановка груза своей грузовой стрелой (грузовым краном)

Подъем – перенос груза. Раскачивание судна путем подъема и переноса грузов может происходить при использовании судовых грузовых стрел или кранов (рис. 5).

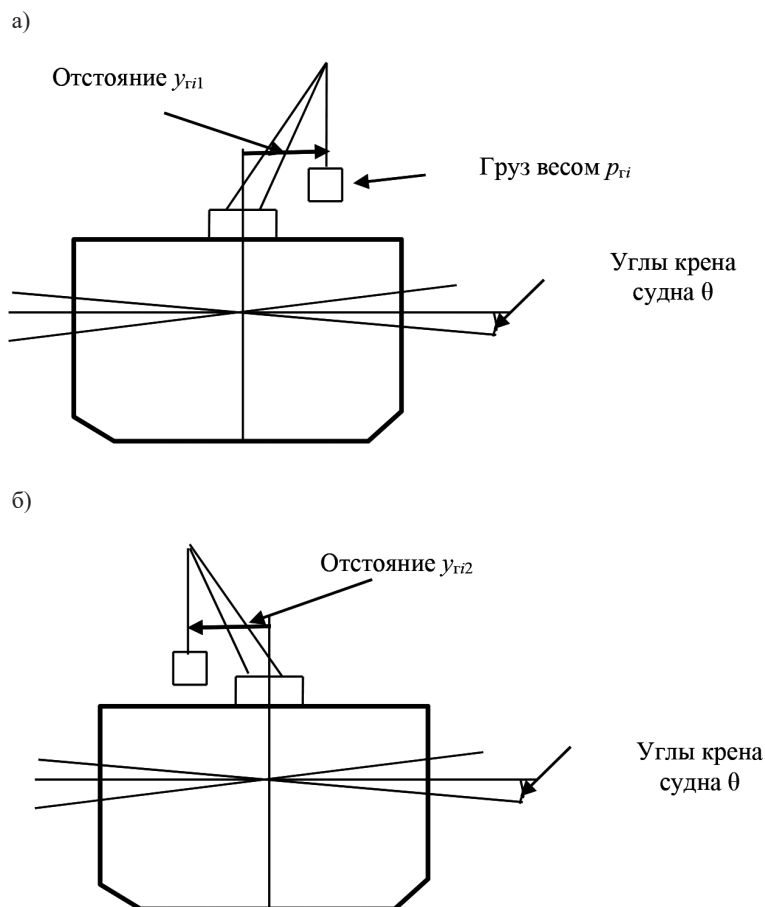


Рис. 5. Раскачивание судна подъемом и переносом груза судовой грузовой стрелой (краном):

- а* — подъем груза своей грузовой стрелой (грузовым краном);
б — перенос груза своей грузовой стрелой (грузовым краном)

Преимуществом подъема – переноса груза как метода самостоятельного раскачивания, зажатого в тяжелых льдах судна, является то, что при раскачивании судна подъемом и переносе грузов своими грузовыми кранами или стрелами начальный крен судна достигается быстро за счет изменения поперечной метацентрической высоты h и создания кренящего момента при переносе груза. Величина начального крена, возникающего при подъеме и переносе груза с использованием судовых кранов, может быть определена в виде

$$\operatorname{tg} \theta = \frac{\sum_{i=1}^n p_{Гi} (y_{Гi2} - y_{Гi1})}{Ph_1}, \quad (4)$$

где $y_{Гi1}$ — отстояние i -го груза от диаметральной плоскости судна (ДП) до переноса, м;
 $y_{Гi2}$ — отстояние i -го груза от диаметральной плоскости судна (ДП) после переноса, м;
 h_1 — новое значение метацентрической высоты судна в момент подъема грузов, м.

Примечание. Величина h_1 в уравнении (4), определяемая в соответствии с формулой (3).

Недостатком подъема — переноса груза как метода самостоятельного раскачивания, зажатого в тяжелых льдах судна, является то, что данный способ недоступен для судов, у которых конструктивно отсутствуют грузовые стрелы или краны для подъема и опускания груза. Эта проблема может быть решена путем установки на судах временных кранов или автомобилей с кранами и использования их для решения данной задачи.

Совместная перекачка балласта и подъем – перенос грузов. Преимуществом данного метода самостоятельного раскачивания, зажатого в тяжелых льдах судна, является создание дополнительных свободных поверхностей при перекачке балласта, приводящее к снижению остойчивости судна, выполняемое совместно с подъемом и переносом груза судовыми кранами или стрелами, и, соответственно, к уменьшению начальной метацентрической высоты (h_1), а также к увеличению крена при раскачивании зажатого льдами судна в соответствии с выражениями (1)–(4).

Недостаток совместной перекачки балласта и подъема — переноса грузов как метода самостоятельного раскачивания, зажатого в тяжелых льдах судна, состоит в том, что перекачка балласта и подъем — перенос грузов происходят с разной скоростью, что затрудняет выполнение процесса оптимизации данных процессов для создания максимального крена при раскачивании судна.

Перемещение части экипажа с борта на борт (по команде) совместно с перекачкой балласта и подъемом – переносом груза. В качестве оперативных мероприятий по высвобождению судна, зажатого тяжелыми льдами, может применяться перемещение части экипажа с борта на борт (одновременно по команде совместно с подъемом — переносом грузов). Эти мероприятия могут быть особенно эффективными для относительно узких судов с большими экипажами: военных кораблей, учебных судов, включая парусные учебные суда, при проходе Северного морского пути или в иных ледовых условиях. Угол крена судна в этом случае может быть рассчитан по формуле

$$\operatorname{tg} \theta = \frac{\sum_{j=1}^m p_{эj} (y_{эj2} - y_{эj1})}{Ph_2}, \quad (5)$$

где m — количество членов экипажа, принимающих участие в перемещении с борта на борт, чел.;

$y_{эj1}$ — отстояние j -го члена экипажа от ДП судна до перемещения, м;

$y_{эj2}$ — отстояние j -го члена экипажа от ДП судна после перемещения, м;

h_2 — новое значение метацентрической высоты судна в момент перемещения членов экипажа, м.

Величина h_2 в уравнении (5) определяется следующим образом:

$$h_2 = h_1 - \frac{\sum_{j=1}^m p_{эj} (z_{эj2} - z_{эj1})}{P}, \quad (6)$$

где $z_{эj2}$ — аппликата центра тяжести части экипажа в месте перемещения с борта на борт (палуба судна), м;

$z_{эj1}$ — аппликата центра тяжести части экипажа в месте проживания (кубрики, каюты членов команды судна), м.

Примечание. Начальная поперечная метацентрическая высота h_1 , определяемая в соответствии с формулой (3).

Преимуществом перемещения части экипажа с борта на борт (по команде) совместно с перекачкой балласта и подъемом–переносом груза является то, что при проведении эффективной координации действий экипажа с использованием учений и тренировок для раскачивания судна путем подъема — переноса груза и перемещения людей углы крена в выражениях (4) и (5) должны суммироваться, что повышает эффективность раскачивания судна.

Недостатки перемещения части экипажа с борта на борт (по команде) совместно с перекачкой балласта и подъемом — переносом груза состоят в том, что в ледовых условиях при подъеме–переносе грузов и перемещении части экипажа с борта на борт должны *соблюдаться особые меры техники безопасности*, что требует предварительной координации действий путем проведения учений и тренировок.

2. Обеспечение раскачивания с использованием других судов и ледоколов.

Плавное раскачивание судна давлением с использованием ледокола. В дополнение к окалыванию судна (см. рис. 3) ледокол может участвовать в раскачивании судна путем плавного давления на корпус зажатого судна за счет работы двигательно-движительного комплекса ледокола (рис. 6 и 7).

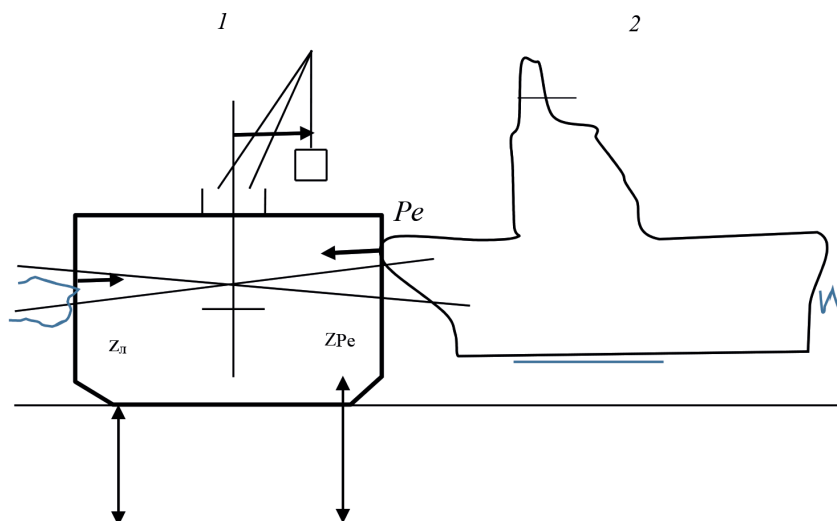


Рис. 6. Раскачивание судна плавным давлением ледокола с подъемом груза судовой грузовой стрелой (краном):

1 — подъем груза своей грузовой стрелой;
2 — плавное давление на борт судна во льду за счет работы движительно-рулевого комплекса ледокола

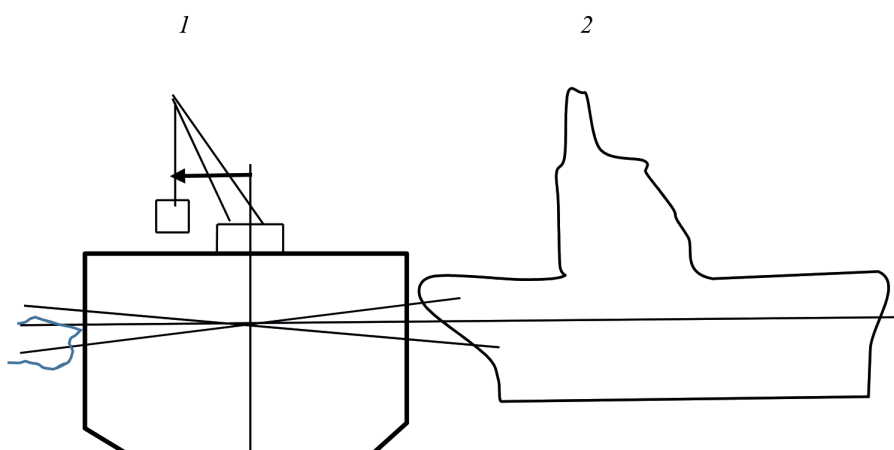


Рис. 7. Раскачивание судна плавным давлением ледокола и переносом груза судовой грузовой стрелой (краном):

1 — перенос груза своей грузовой стрелой (грузовым краном);
2 — прекращение плавного давления ледокола в борт судна во льду, отход ледокола от борта судна

Сущность плавного давления ледокола при раскачивании зажатого льдом судна заключается в следующем. Ледокол подходит носом к борту зажатого льдом судна и упирается в бортовой кранец или место расположения усиленного шпангоута, предназначенного для установки буксира при швартовке судна. Далее ледокол начинает работать своим движительно-рулевым комплексом (ДРК), плавно наращивая упор в сторону борта зажатого льдом судна. Под действием работы ДРК ледокола судно получает крен в сторону противоположного от установки ледокола борта. Затем ледокол прекращает работу ДРК и отходит от борта судна. Судно под действием восстанавливающего момента выравнивается и / или накрывается (раскачивается) в сторону ледокола. Происходит раскачивание зажатого льдом судна, которое способствует его освобождению от зажимающего льда (см. рис. 7). После этого процесс раскачивания может повторяться. Угол крена, зажатого льдом судна при плавном давлении ледокола при раскачивании может быть определен в виде

$$\operatorname{tg} \theta = \frac{Pe(z_{Pe} - z_{\text{л}})}{Ph_1}, \quad (7)$$

где Pe — тяга винтов ледоколов при плавном давлении на борт судна, кН;

z_{Pe} — аппликата точки приложения тяги винта ледокола на борту судна, м;

$z_{\text{л}}$ — аппликата точки приложения зажимающего льда на борту судна, м.

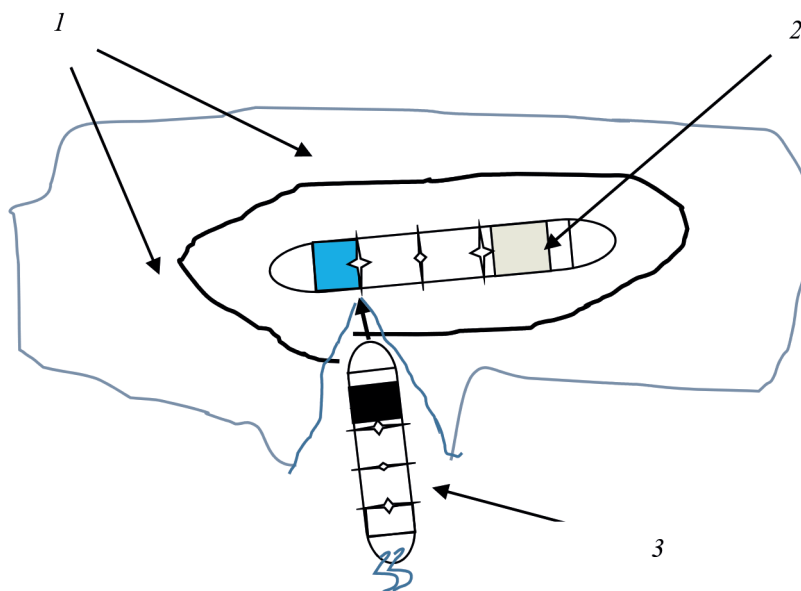


Рис. 8. Рубка льда, зажимающего судно, с использованием ледокола перед плавным и динамическим раскачиванием:

1 — зажимающие судно тяжелые льды; 2 — судно, зажатое в тяжелых льдах;
3 — ледокол рубящий лед перед плавным или динамическим раскачиванием

Преимуществом плавного раскачивания судна давлением с использованием ледокола является то, что раскачивание подразумевает предварительную рубку льда, зажимающего корпус судна, что способствует его эффективному разрушению и освобождению зажатого льдом судна (рис. 8). Раскачивание судна плавным давлением ледокола на борт судна может производиться вместе с созданием *дополнительных свободных поверхностей* при перекачке балласта и подъемом–переносом груза судовыми кранами или стрелами, что приводит к дополнительному увеличению крена при раскачивании зажатого льдами судна в соответствии с выражениями (1)–(4), (7).

Недостатком плавного раскачивания судна давлением с использованием ледокола является то, что эта процедура, во избежание повреждения борта раскачиваемого судна, должна проводиться в местах усиленных шпангоутов и / или с использованием специальной кранцевой защиты корпуса судна.

Ударное (динамическое) раскачивание судна давлением с использованием ледокола. Сущность работы ледокола при ударном (динамическом) раскачивании зажатого льдом судна заключается в следующем. Ледокол подходит носом к борту зажатого льдом судна и останавливается на определенном расстоянии от борта, напротив нахождения бортового кранца или места расположения усиленного шпангоута, предназначенного для установки буксира при швартовке судна. Далее ледокол начинает работать своим ДРК, плавно наращивая упор и скорость в сторону борта зажатого льдом судна. При подходе к борту зажатого льдом судна ледокол оказывает на него динамическое кренящее воздействие. Под воздействием ледокола судно получает динамический крен в сторону, противоположную расположению ледокола борта. Ледокол прекращает работу ДРК и отходит от борта судна. Судно под действием восстанавливающего момента выравнивается и / или накреняется в сторону ледокола. Происходит раскачивание зажатого льдом судна, способствующее

его освобождению от зажимающего льда. После этого процесс динамического раскачивания может повторяться. Ударное динамическое раскачивание имеет те же основные преимущества и недостатки, что и плавное давление ледокола на корпус зажимающего судна.

Преимущества при ударном (динамическом) раскачивании судна давлением с использованием ледокола заключаются в том, что при ударном раскачивании угол крена зажатого льдом судна, в соответствии с выражением (7), может увеличиваться до двух раз. Вибрация, передаваемая на корпус зажатого льдами судна, при динамических ударах ледокола способствует появлению вибрации на его корпусе и в конструкциях, что способствует освобождению зажатого судна, его движительно-рулевого комплекса и других конструкций от намерзшего льда. В результате динамического вибрационного воздействия ледокола появляется возможность эффективного использования ДРК зажатого судна для его скорейшего высвобождения из тяжелых ледовых условий.

Недостатком при ударном (динамическом) раскачивании судна давлением с использованием ледокола является то, что при динамическом раскачивании особую роль приобретает осторожность работы ледокола и предотвращение возможного повреждения корпуса зажатого судна. Это может быть достигнуто использованием специальных и дополнительных кранцев на носу ледокола и на борту судна, ограничения «разгона» и нацеливания ударов ледокола в определенные усиленные части корпуса судна при помощи заведения удерживающих тросов на носу ледокола.

Анализ, проведенный для других комбинаций взаимодействия судов при высвобождении судна из тяжелых ледовых условий, показывает эффективность совместного раскачивания ледоколами и другими судами, расположенными с одного и двух бортов, с кормы и борта, с носа, кормы и бортов судна, зажатого во льдах, а также совместного раскачивания другими судами совместно с подъемом и переносом груза, перекачкой балласта, а также создания дополнительных свободных поверхностей при статическом и динамическом воздействии раскачивающих судов.

Для обеспечения толкания судна, зажатого в тяжелых ледовых условиях, выполняется ударное (динамическое) давление с использованием ледокола, аналогичное так называемой проводке ледоколом транспортного судна «на усах». В этом случае транспортное судно становится носом в специальный кранцевый вырез на корме ледокола и крепится через якорные клюзы «за усы» таким образом, что ледокол и транспортное судно представляют собой практически единый сочлененный корпус из двух судов. При дальнейшем движении в случае зажатия в тяжелых льдах корпуса ледокола он получает динамическое воздействие — «толчок» со стороны закрепленного на корме («на усах») судна, что позволяет преодолеть застревание ледокола во льдах и продолжить движение сцепки ледокола и закрепленного «на усах» транспортного судна. Как показывает научный анализ и опыт движения судов «на усах» в ледовых условиях, статическое и динамическое толкание с использованием ледокола и / или других судов значительно увеличивает возможность вывода судна из тяжелых ледовых условий.

Преимуществом ударного (динамического) толкания вмерзшего в лед судна с использованием ледокола является вибрация, передаваемая на корпус зажатого льдами судна, которая при динамических толкающих ударах ледокола способствует появлению вибрации на его корпусе и судовых конструкциях. Это приводит к освобождению зажатого корпуса судна, его ДРК и других конструкций от намерзшего и зажимающего льда. В результате динамического вибрационного воздействия ледокола появляется возможность освобождения и эффективного использования ДРК зажатого судна для его скорейшего высвобождения судна из тяжелых ледовых условий.

Недостатком ударного (динамического) толкания вмерзшего в лед судна с использованием ледокола является то, что при осуществлении ударного (динамического) толкания необходима специальная кранцевая защита, предотвращающая повреждения корпусов судов. При неработающем и вмерзшем в лед ДРК транспортного судна толкающие динамические удары могут привести к поломке лопастей гребных винтов других конструкций, входящих в состав ДРК судна.

Преимущества совместного раскачивания и толкания судна, зажатого в тяжелых ледовых условиях, показывает анализ, проведенный для указанных ранее и других комбинаций статического

и динамического взаимодействия ледоколов и других судов при высвобождении судна из тяжелых ледовых условий, демонстрирующий значительную эффективность совместного раскачивания и толкания ледоколами и другими судами зажатого в тяжелых льдах судна. Наиболее эффективные схемы взаимодействия ледоколов и зажатого в тяжелых льдах судна приведены на рис. 9 и 10. Дополнительные, а также рассмотренные ранее мероприятия по самостоятельному раскачиванию зажатого во льдах судна способны значительно увеличить возможность высвобождения судна из тяжелых льдов.

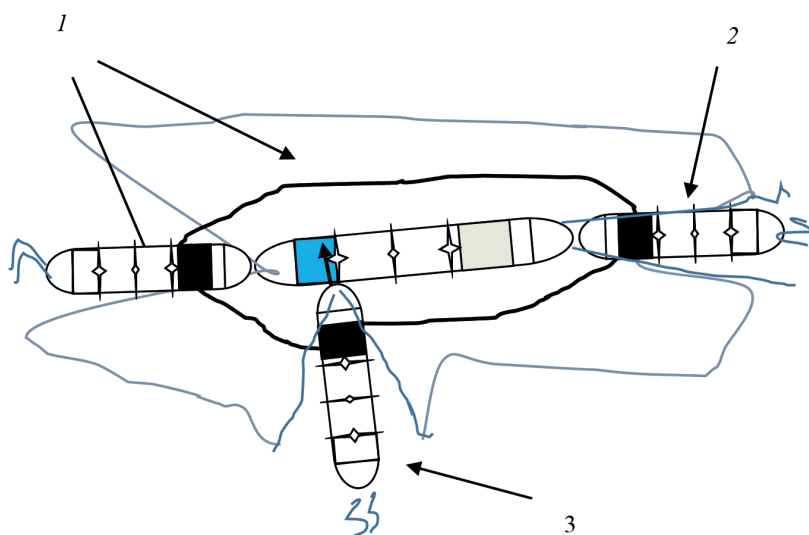


Рис. 9. Комбинация рубки льда, прокладывания канала, раскачивания и толкания зажатого во льдах судна, с использованием ледоколов и другого судна:

- 1 — судно, толкающее зажатое в тяжелых льдах судно на выход по проложенному каналу;
- 2 — ледокол, прокладывающий канал в тяжелых льдах для вывода застрявшего судна;
- 3 — ледокол, рубящий лед и раскачивающий зажатое судно

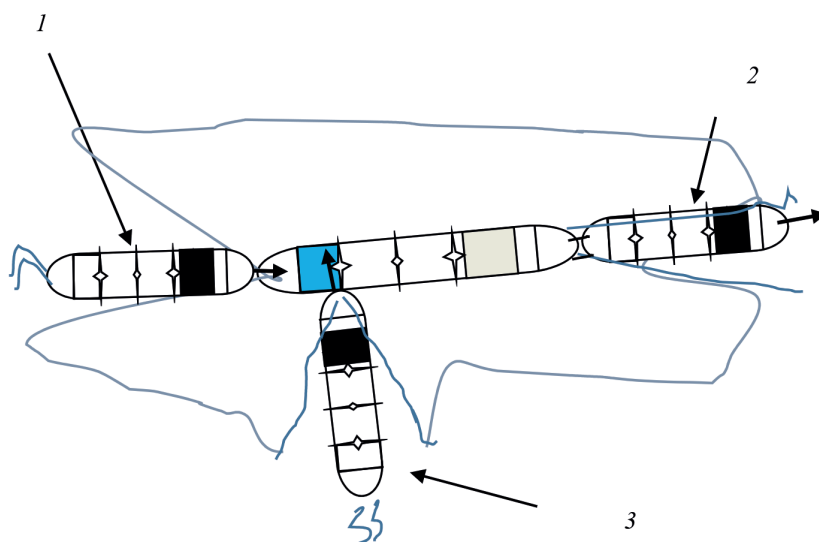


Рис. 10. Комбинация рубки льда, прокладывания канала, раскачивания, взятия «на усы» для вывода и толкания зажатого во льдах судна, с использованием ледоколов по проложенному каналу:

- 1 — судно, толкающее зажатое в тяжелых льдах судно на выход по проложенному каналу;
- 2 — ледокол, прокладывающий канал в тяжелых льдах, разворачивается и берет «на усы» для вывода застрявшего судна по проложенному каналу;
- 3 — ледокол, рубящий лед и раскачивающий зажатое судно

Недостатками методов раскачивания и толкания судов для высвобождения из тяжелых льдов является необходимость специальной кранцевой защиты, предотвращающей повреждения корпусов ледоколов и судов при данного рода воздействиях, что свидетельствует о том, что нужно совершенствовать методы и практические рекомендации для экипажей по высвобождению судов из тяжелых ледовых условий.

Результаты (Results)

В исследовании приведены теоретические основы, которые могут использоваться для создания новых и развития существующих методов высвобождения судов из тяжелых ледовых условий. Показана возможность использования для высвобождения судов из ледового плена методов рубки льда, раскачивания и толкания зажатого в тяжелых льдах судна, которые доказали свою эффективность в других областях науки и техники. Использование аппарата теории судна и опыта ледовых проводок позволило обосновать возможность эффективного применения методов раскачивания, толкания и рубки льда для высвобождения судов, оказавшихся в тяжелых ледовых условиях. Показана возможность использования комбинаций работы балластной системы, грузовых стрел и кранов, специальных действий экипажа, зажатого во льду судна, а также взаимодействия с ледоколами и другими судами для рубки зажимающего льда, раскачивания и толкания, увеличивающих эффективность высвобождения судна из тяжелых ледовых условий. Полученные результаты научного анализа позволили определить преимущества и недостатки различных методов раскачивания, толкания и рубки льда, что позволяет разработать практические мероприятия, которые могут быть использованы экипажами судов и ледоколов для высвобождения судов из тяжелых ледовых условий.

Материалы настоящей статьи могут быть использованы при разработке новых научно-обоснованных практических мероприятий по выводу оказавшихся в ледовых условиях судов, а также создании новых устройств и видов кранцевой защиты для совершенствования методов высвобождения судов из тяжелых льдов.

Обсуждение (Discussion)

Теоретическое обоснование возможности использования раскачивания, толкания и рубки льда, зажимающего судно как мероприятия, доказавшие свою эффективность в других областях техники, могут составлять основу мероприятий по высвобождению судов, зажатых в тяжелых ледовых условиях. В статье показана возможность использования комбинаций работы балластной системы, грузовых стрел и кранов, специальных действий экипажа, зажатого во льду судна, а также взаимодействия с ледоколами и другими судами для рубки зажимающего льда, раскачивания и толкания судов с целью высвобождения их из тяжелых ледовых условий. Показано, что использование процедуры раскачивания, толкания и рубки льда, зажимающего судно, статического и динамического воздействия ледоколов и другие мероприятия могут эффективно использоваться для освобождения судов в тяжелых ледовых условиях.

Преимуществом теоретически обоснованных методов рубки льда, его раскачивания и толкания является независимость этих действий от других мероприятий, связанных с высвобождением судна из ледового плена (перекачки балласта, подъема–переноса груза и т. п.) и возможность их осуществления совместно с работой двигательно-движительного комплекса судна, заведением ледовых якорей и др. Мероприятия по рубке льда, раскачиванию и толканию способны предотвратить повреждение корпуса судна в условиях сжатия ледового канала.

Выводы (Summary)

На основе проведенного исследования можно сделать следующие выводы:

1. Разработка теоретических основ высвобождения судна из тяжелых ледовых условий позволяет определять основные закономерности выхода судна из ледового плена, разрабатывать новые методы и практические мероприятия по освобождению судна, зажатого тяжелыми льдами.

2. Выявление основных закономерностей, связанных с рубкой зажимающего судно льда, раскачиванием и толканием зажатого льдами судна, позволило определить практические мероприятия, которые могут осуществляться непосредственно на зажатом во льду судне, а также в комбинации с воздействием на него ледоколов и других судов, оказывающих помощь по высвобождению судна из тяжелых ледовых условий, отметить их достоинства и недостатки.

3. Использование перекачки балласта для предотвращения повреждения корпуса при сжатии льда для высвобождения судна из ледового плена и предотвращения повреждения корпуса, а также другие теоретически обоснованные действия, связанные с раскачиванием и толканием зажатого судна, дают большие возможности для эффективного и безопасного высвобождения судов из тяжелых ледовых условий и совершенствования плавания судов в полярных водах.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Международный кодекс для судов, эксплуатирующихся в полярных водах (Полярный кодекс). — СПб.: АО «ЦНИИМФ», 2016. — 232 с.
2. Резолюция MSC.386(94) «Поправки к Международной конвенции по охране человеческой жизни на море 1974 года с поправками» [Электронный ресурс]. — Режим доступа: <https://docs.cntd.ru/document/420376047> (дата обращения: 01.12.2022).
3. Международная Конвенция по охране человеческой жизни на море 1974 года (МК СОЛАС-74). (Консолидированный текст, измененный Протоколом 1988 года к ней, с поправками). — СПб.: АО «ЦНИИМФ», 2021. — 1184 с.
4. Международная Конвенция по предотвращению загрязнения с судов 1973 г., измененная протоколом 1978 г. к ней (МАРПОЛ-73/78). Кн. I, II. — СПб.: АО «ЦНИИМФ», 2017. — 824 с.
5. Ершов А. А. Рекомендации по маневрированию судна в ледовых условиях / А. А. Ершов, С. Ю. Развозов, П. И. Петухов // Вестник Государственного университета морского и речного флота имени адмирала С. О. Макарова. — 2016. — № 5 (39). — С. 20–29. DOI: 10.21821/2309-5180-2016-8-5-20-29.
6. Ершов А. А. Оценка эффективности использования перекачки балласта для предотвращения повреждения корпуса судна в ледовых условиях / А. А. Ершов, П. И. Петухов // Вестник Государственного университета морского и речного флота имени адмирала С. О. Макарова. — 2021. — Т. 13. — № 3. — С. 316–324. DOI: 10.21821/2309-5180-2021-13-3-316-324.
7. Ершов А. А. Рекомендации по спрямлению судна при аварии в ледовых условиях / А. А. Ершов, П. И. Петухов // Вестник Государственного университета морского и речного флота имени адмирала С. О. Макарова. — 2016. — № 6 (40). — С. 34–42. DOI: 10.21821/2309-5180-2016-8-6-34-42.
8. Ершов А. А. Рекомендации по действиям в чрезвычайных ситуациях в ледовых условиях плавания / А. А. Ершов, П. И. Петухов // Вестник Государственного университета морского и речного флота имени адмирала С. О. Макарова. — 2017. — Т. 9. — № 1. — С. 17–26. DOI: 10.21821/2309-5180-2017-9-1-17-26.
9. Ершов А. А. Некоторые аварии и катастрофы отечественных и иностранных судов: монография / А. А. Ершов, В. И. Никольский. — СПб.: ГУМРФ им. адм. С. О. Макарова, 2013. — 196 с.
10. Gao G. X. Breaking the Ice: Navigation in the Arctic / G. X. Gao, L. Heng, T. Walter, P. Enge // Global Navigation Satellite Systems: Report of a Joint Workshop of the National Academy of Engineering and the Chinese Academy of Engineering. — National Academies Press, 2012. — Pp. 229–238.

REFERENCES

1. *International code for ships operating in polar waters (Polar code)*. London: International Maritime Organization, 2016.
2. Resolution MSC.386(94). Amendments to the international convention for the safety of life at sea, 1974, as amended. Web. 1 Dec. 2022. <<https://docs.cntd.ru/document/420376047>>.
3. *International Convention for the Safety of Life at Sea, 1974, (SOLAS-74). (Text modified by the Protocol of 1988 relating thereto, including Amendments)*. SPb.: AO «TsNIIMF», 2021.
4. *International Convention for Prevention of Pollution from Ships (MARPOL-73/78)*. SPb.: AO «TsNIIMF», 2017.
5. Ershov, Andrey Alexandrovich, Sergey Jrevich Razvozov, and Pavel Igorevich Petuhov. “Recommendation on maneuvering the vessel in ice conditions.” *Vestnik Gosudarstvennogo universiteta morskogo i rechnogo flota imeni admirala S. O. Makarova* 5(39) (2016): 20–29. DOI: 10.21821/2309-5180-2016-8-5-20-29.

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

7. Ershov, Andrey Alexandrovich, and Pavel Igorevich Petuhov. "Recommendations to straighten the ship in the accident in ice conditions." *Vestnik Gosudarstvennogo universiteta morskogo i rechnogo flota imeni admirala S. O. Makarova* 6(40) (2016): 34–42. DOI: 10.21821/2309-5180-2016-8-6-34-42.

8. Ershov, Andrey A., and Pavel I. Petuhov. "Recommendations for emergency response in ice conditions of navigation." *Vestnik Gosudarstvennogo universiteta morskogo i rechnogo flota imeni admirala S. O. Makarova* 9.1 (2017): 17–26. DOI: 10.21821/2309-5180-2017-9-1-17-26.

9. Ershov, A.A., and V. I. Nikol'skii. *Nekotorye avarii i katastrofy otechestvennykh i inostrannykh sudov: monografiya*. SPb.: GUMRF im. adm. S. O. Makarova, 2013.

10. Gao, G. X., L. Heng, T. Walter, and P. Enge. "Breaking the Ice: Navigation in the Arctic." *Global Navigation Satellite Systems: Report of a Joint Workshop of the National Academy of Engineering and the Chinese Academy of Engineering*. National Academies Press, 2012: 229–238.

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

Ершов Андрей Александрович —

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

Бояринов Александр Михайлович —

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

Гаккель Алексей Алексеевич —

старший преподаватель
ФГБОУ ВО «ГУМРФ имени адмирала
С. О. Макарова»
198035, Российская Федерация, Санкт-Петербург,
ул. Двинская, 5/7
e-mail: alienbaron@yandex.ru, kaf_mus@gumrf.ru

INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Ershov, Andrey A. —

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

Boiarinov, Aleksandr M. —

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

Gakkel, Alexey A. —

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

Статья поступила в редакцию 31 января 2023 г.

Received: January 31, 2023.

DOI: 10.21821/2309-5180-2023-15-2-215-225

CURRENT TRENDS OF DANGEROUS WINDS FREQUENCY VARIATION IN THE WESTERN SECTOR OF THE RUSSIAN ARCTIC IN WINTER-SPRING PERIOD

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

¹ — Sevastopol branch of FSBI “N. N. Zubov’s State Oceanographic Institute”,
Sevastopol, Russian Federation

² — Sevastopol State University, Sevastopol, Russian Federation

The current trends in interannual changes in the frequency of winds that pose a danger to navigation on shipping routes of the Barents and Kara Seas in the winter-spring months are identified in the paper. Winds are considered dangerous if their average hourly speed over the water surface exceeds 15 m/s. The factual material is based on information from the ERA5 global reanalysis. The research methodology involves the use of standard methods of mathematical statistics. Trends are assessed for the time periods of 2001–2021 and 2010–2021. The study has allowed us to identify the water areas of the Barents Sea, where in December, January, April and May, significant rising trends in the frequency of dangerous winds are presented. No similar trends during the months of the winter-spring navigation period are found in the water areas of the Kara Sea in the modern period. It has been established that in December storm risks exhibit rising trends on the waterways of the Barents Sea passing north of Cape Zhelaniya. At the same time, in the area of the Kara Strait and its approaches, the tendencies of changes in the frequency of dangerous winds are more favorable. In January, the wind regime in this strait, on the contrary, has a clear tendency to worsen. The persistence of the identified trends in the region under consideration in the future is not guaranteed. Therefore, further development of its observation network remains an urgent problem of hydrometeorological provision of navigation in the Barents and Kara seas.

Keywords: Barents Sea, Kara Sea, shipping, Northern Sea Route, navigational risk, wind, frequency, trend.

For citation:

Podporin, Sergey A., and Aleksandr V. Kholoptsev. “Current trends of dangerous winds frequency variation in the western sector of the Russian Arctic in winter-spring period.” *Vestnik Gosudarstvennogo universiteta morskogo i rechnogo flota imeni admirala S. O. Makarova* 15.2 (2023): 215–225. DOI: 10.21821/2309-5180-2023-15-2-215-225.

УДК 656.61.052: 551.583

СОВРЕМЕННЫЕ ТЕНДЕНЦИИ ИЗМЕНЕНИЯ ПОВТОРЯЕМОСТИ ОПАСНЫХ ВЕТРОВ В ЗАПАДНОМ СЕКТОРЕ РОССИЙСКОЙ АРКТИКИ В ЗИМНЕ-ВЕСЕННИЙ ПЕРИОД

С. А. Подпорин¹, А. В. Холопцев^{1,2}

¹ — Севастопольское отделение ФГБУ «Государственный океанографический институт имени Н. Н. Зубова», Севастополь, Российская Федерация

² — ФГАОУ ВО «Севастопольский государственный университет»,
Севастополь, Российская Федерация

Целью статьи является выявление современных тенденций межгодовых изменений повторяемости ветров, представляющих навигационные опасности для судоходства на Северном морском пути, включая маршруты на судоходных трассах Баренцева и Карского морей в зимне-весенние месяцы. В качестве опасных рассмотрены ветры, среднечасовая скорость которых над водной поверхностью превышает 15 м/с. Фактический материал основан на информации глобального реанализа ERA5. Методика исследования предполагала использование стандартных методов математической статистики. Тенденции оценивались за периоды времени 2001–2021 гг. и 2010–2021 гг. Исследование позволило выявить акватории Баренцева моря, на которых в декабре, январе, апреле и мае имели место значимые тенденции к увеличению повторяемости опасных ветров. Отмечается, что в акваториях Карского моря аналогичных тенденций в современном

периоде в месяцы зимне-весеннего навигационного периода выявлено не было. Установлено, что в декабре на водных путях Баренцева моря, проходящих севернее мыса Желания, в изменениях штормовых рисков наблюдаются возрастающие тенденции. При этом в районе пролива Карские ворота и на подходах к нему тенденции изменения повторяемости опасных ветров являются более благоприятными. В январе ветровой режим в указанном проливе, наоборот, имеет явные тенденции к ухудшению. Сохранение выявленных тенденций в рассматриваемом регионе в будущем не гарантировано. Поэтому развитие существующей в нем наблюдательной сети остается актуальной проблемой гидрометеорологического обеспечения осуществляемого здесь судоходства, так как выбор маршрута и варианта входа в акваторию Северного морского пути позволяет сократить время прохода во льдах и, соответственно, обеспечить более высокую скорость и интенсивность движения судов.

Ключевые слова: Баренцево море, Карское море, Северный морской путь, судоходство, навигационный риск, ветер, повторяемость, тенденция.

Для цитирования:

Подпорин С. А. Современные тенденции изменения повторяемости опасных ветров в западном секторе российской Арктики в зимне-весенний период / С. А. Подпорин, А. В. Холопцев // Вестник Государственного университета морского и речного флота имени адмирала С. О. Макарова. — 2023. — Т. 15. — № 2. — С. 215–225. DOI: 10.21821/2309-5180-2023-15-2-215-225.

Введение (Introduction)

Ветровой режим в районах плавания является одним из факторов, определяющих безопасность судоходства. Планирование морских переходов и оценка навигационных рисков требуют понимания и учета тенденций его изменения, своевременное выявление которых является актуальной проблемой гидрометеорологии, океанографии и эксплуатации морского транспорта.

Наибольший интерес решение данной проблемы представляет для тех водных путей, на которых судоходство играет определяющую роль в развитии экономики нашей страны и обеспечении безопасности жизнедеятельности ее населения. Важное место среди них занимают водные пути Баренцева и Карского морей, по которым осуществляется северный завоз и обеспечивается вывоз значительной части добываемых в регионе природных ресурсов: нефти, природного газа, газо-конденсата, угля и металлов. Активному развитию судоходства в этих морях способствует ввод в эксплуатацию новых портов и терминалов (Новый Порт, Сабетта, Приразломное, ВостокУголь и др.), расширение современного арктического флота, прежде всего танкерного и СПГ. Суда арктического ледового класса Arc4–Arc7 работают на маршрутах Карского и Баренцева морей на круглогодичной основе [1], [2].

Несмотря на то, что значительную опасность для надводных судов могут представлять порывы ветра, в которых его мгновенная скорость достигает пиковых значений, не менее опасными являются ветровые волны. Ввиду того, что средняя высота этих волн определяется энергией, которую они получают от порождающего их ветра, существенной характеристикой опасности ветра может служить значение модуля его среднечасовой скорости. От энергии, полученной при взаимодействии с ветром, существенно зависят также характеристики дрейфа морских льдов, способного значительно изменять условия навигации, создавая опасные для судов явления (в том числе ледовое сжатие) [3]. В условиях действия опасных ветров, когда автоматическое управление движением судна затруднено из-за падения скорости хода и ухудшения управляемости, судоводители вынуждены нести постоянную вахту на руле. При этом в период отрицательных значений температуры воздуха происходит быстрое обледенение судовых конструкций [4].

Минимальные значения среднечасовой скорости ветра, представляющие опасность для судов различного типа и класса, зависят не только от их конструктивных особенностей, но и от района и месяца плавания. Очевидно, что вероятность возникновения ветра, представляющего опасность для определенного типа судна в каком-либо районе, тем выше, чем больше в нем повторяемость ветров, среднечасовая скорость которых превышает определенный пороговый уровень. Поэтому оценка средних значений этой характеристики для различных месяцев и районов представляет не только теоретический, но и немалый практический интерес.

Повторяемость событий принято оценивать отношением продолжительности периода времени, в течение которого они происходят, к общей продолжительности периода наблюдений. При оценке этого показателя за тот или иной месяц необходимо учитывать различное количество суток в разных месяцах. В подобных случаях представляет интерес рассмотрение альтернативной характеристики повторяемости — продолжительности изучаемых событий, выраженной в часах.

Происходящее в настоящее время потепление климата Арктики приводит к сокращению ледяного покрова арктических акваторий, что в целом оказывает позитивное влияние на судоходство [5], [6]. При сохранении существующих тенденций климатических изменений площадь арктических льдов будет и далее сокращаться, вследствие чего все большее влияние на безопасность навигации будет оказывать ветровое волнение [7].

В отличие от ледовых условий Карского и Баренцева морей ветровой режим различных участков их акваторий недостаточно изучен. С практической точки зрения наиболее актуальным является выявление участков, на которых возрастает повторяемость ветров, представляющих опасность для судоходства. На существование таких участков указывается, в частности, в работах [8]–[11]. Отмечается, что на свободных ото льда участках акваторий чаще возникают штормы, которые особенно опасны в период отрицательных температур воздуха из-за обледенения судов. На полностью или частично покрытых льдом акваториях усиление ветра приводит к дрейфу и сжатию ледяного покрова, что также повышает навигационные риски [3].

В зимне-весенний период судоходство в регионе, как правило, ограничено вывозом природных ископаемых из портов и терминалов Карского моря. Транспортировка груза происходит в основном в западном направлении по двум маршрутам: через пролив Карские Ворота и вокруг мыса Желания, огибая архипелаг Новая Земля с севера. Баренцево море обычно свободно ото льда за исключением северной его части, при этом в Карском море по-прежнему могут возникать достаточно сложные ледовые условия [9].

Наблюдаемые и прогнозируемые тенденции усиления ветра в изучаемом регионе дают основания предполагать рост рисков для судоходства. Вместе с тем остается не выясненным, какие участки акваторий (особенно с интенсивным судоходством) подвержены наибольшему риску в зимне-весенний сезон. Требуется дополнительных исследований также вопрос и о наличии где-либо в регионе противоположных тенденций. Из-за быстрых климатических изменений информация о ветровом режиме, полученная на основе многолетних наблюдений и представленная в специализированных морских справочниках и морских лоциях [4], [12], становится недостаточно актуальной.

Целью настоящей работы является выявление современных тенденций изменения повторяемости опасных ветров на судоходных трассах Баренцева и Карского морей в зимне-весенний период. Достижение поставленной цели предполагает решение следующих задач:

- 1) оценка климатической нормы повторяемости опасных ветров на участках судоходных трасс Карского и Баренцева морей за последние 30 лет;
- 2) выявление участков, где повторяемость опасных ветров имеет явные тенденции как к росту, так и к снижению.

Методы и материалы (Methods and Materials)

В качестве опасных в настоящей работе рассмотрены ветры, средняя скорость которых превышает 15 м/с (по шкале Бофорта это значение соответствует силе ветра 7 баллов (крепкий ветер) и более, при этом средняя высота волн составляет не менее 4 м, максимальная — не менее 5,5 м¹). Повторяемость опасного ветра (далее — T) в выбранном месяце оценивалась количеством относящихся к нему часов, когда среднечасовая скорость ветра превышала 15 м/с. Для различных участков акваторий Баренцева и Карского морей и для месяцев с декабря по май, относящихся к современному климатическому периоду (1991–2020 гг.), определены климатические нормы (далее — $КН$) как средние значения T [13]. Затем определялись участки акваторий, на которых тенденции межгодовых изменений T ,

¹ Шкала Бофорта — сила ветра и состояние моря. [Электронный ресурс]. Режим доступа: https://www.vodkomotornik.ru/index.php?option=com_content&view=article&id=15&Itemid=15 (дата обращения: 01.12.2022).

соответствующие периодам 2001–2021 гг. и 2010–2021 гг., являлись значимыми с вероятностью не ниже 0,9. В качестве характерной тенденции рассматривалось значение углового коэффициента линейного тренда (далее — УКЛТ) соответствующего временного ряда. При оценке вероятности того, что тенденция межгодовых изменений T , выявленная для некоторого участка и месяца, является значимой, предполагалось, что математической моделью этих изменений является выражение:

$$Y_k = AT_k + G_k + C, \quad (1)$$

где A — оценка по методу наименьших квадратов значения УКЛТ процесса Y_k (k — номер члена отрезка временного ряда Y , учитываемого при вычислении A ; $k = 1, 2, \dots, k$);

T_k — продолжительность интервала времени, отделяющего от начала изучаемого отрезка член временного ряда с номером k (при $k = 1$ $T_k = 0$);

G_k — выборочное значение из реализации нормального случайного процесса с нулевым средним и среднеквадратическим отклонением S , соответствующее некоторому k ;

C — постоянная составляющая (действительная константа).

Решение о значимости A с вероятностью 0,9 принималось в случае, если выполнялось условие

$$|AT_k| > 1,3S, \quad (2)$$

где $|AT_k|$ — абсолютная величина.

При оценке тенденций изменений T за периоды 2001–2021 гг. и 2010–2021 гг. значения k принимались равными 21 и 12 соответственно. Существенной особенностью Западного сектора российской Арктики является малое количество стационарных пунктов, в которых осуществляется систематический мониторинг ветрового режима. В таких условиях наиболее информативным источником данных о ветре на всех участках акватории изучаемого региона является ретроспективный анализ (реанализ) [14]. Для решения поставленной задачи использовался глобальный реанализ ERA5, поддерживаемый европейской службой Copernicus Marine Service¹. Содержащиеся в нем данные по среднечасовым значениям меридиональной и зональной составляющих скорости ветра на высоте 10 м над земной поверхностью на момент исследования были доступны для каждого часа за период 1959–2021 гг. с разрешением по координатам $0,25^\circ \times 0,25^\circ$. Реанализ ERA5 основан на усовершенствованных климатических моделях, разработанных для условий ограниченности данных физических измерений. Подробное описание ERA5, а также его отличия от предыдущей версии ERA-Interim представлены в [15]. Полученные результаты по всем точкам координатной сетки для удобства восприятия наносились на контурную карту Карского и Баренцева морей. Там же схематично нанесены маршруты основных судоходных трасс.

Результаты исследования и их анализ (Research Results And Analysis)

В процессе решения *первой задачи* для месяцев с декабря по май была выполнена оценка значений КН повторяемости опасных ветров в регионе Карского и Баренцева морей за период 1991–2020 гг. Полученные результаты приведены на рис. 1. Заглавными буквами на картах обозначены основные узловые точки судоходных маршрутов: М — подходы к порту Мурманск; К — пролив Карские Ворота; Ж — мыс Желания; О — вход в Обскую губу; Е — вход в Енисейский залив; В — подходы к проливу Вилькицкого.

Как видно из рис. 1, районы с повышенной повторяемостью опасных ветров ($КН > 48$ ч) расположены в основном в Баренцевом море. Такие районы занимают центральную и западную части акватории моря. Наибольшая их площадь выявлена в декабре и январе (см. рис. 1, а, б). Районы Баренцева моря с $КН > 72$ ч в декабре и январе находятся к северу от мыса Нордкап и Кольского полуострова. Эти данные достаточно хорошо согласуются с описанием ветрового режима Баренцева моря, указанного в [4], [12].

¹ База данных реанализа ERA5 [Электронный ресурс]. Режим доступа: <https://cds.climate.copernicus.eu/cdsapp#!/dataset/reanalysis-era5-single-levels?tab=form> (дата обращения: 01.12.2022).

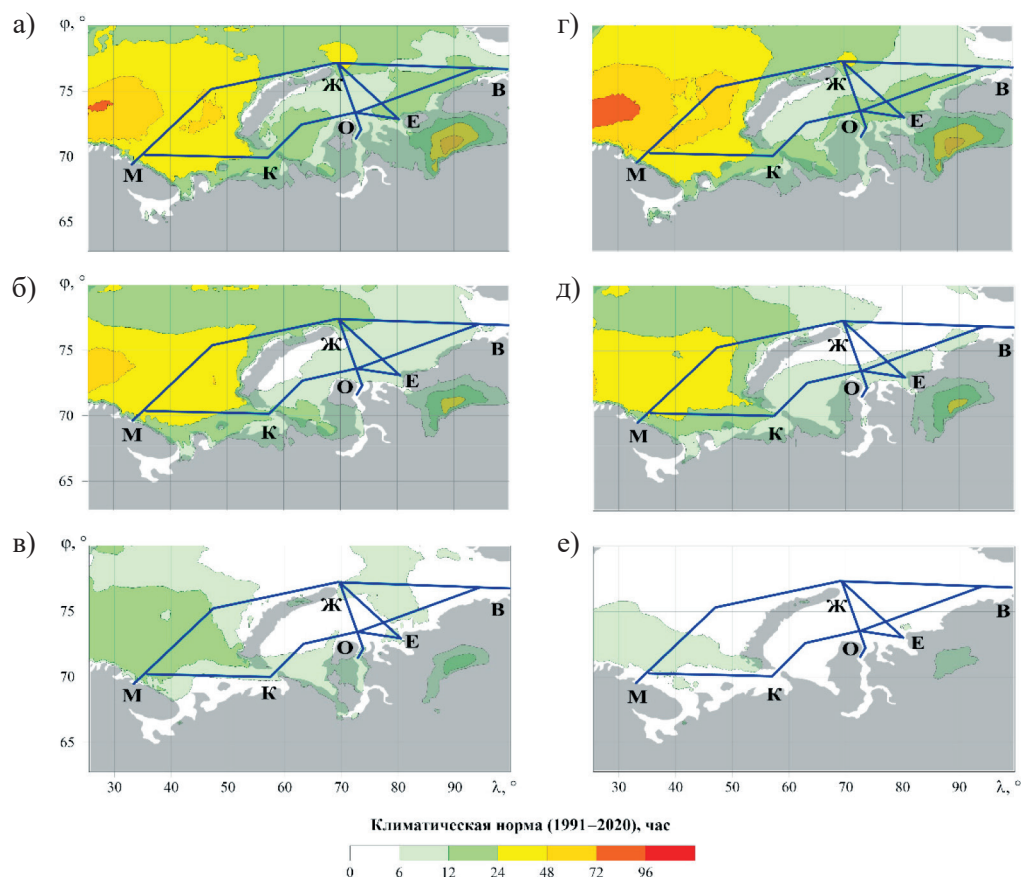


Рис. 1. Климатическая норма повторяемости опасных ветров за период 1991–2020 гг. по месяцам:

а — декабрь; *б* — январь; *в* — февраль; *г* — март; *д* — апрель; *е* — май

Ветровая обстановка в Карском море в течение последних 30 лет была достаточно спокойной, а опасные ветры в зимне-весенний сезон наблюдались сравнительно редко. Лишь в декабре и январе значения КН для участков акватории Карского моря находились в пределах 12–24 ч. Такие участки расположены в проливе Карские ворота, вдоль материкового побережья Карского моря, в том числе на прибрежной трассе Северного морского пути, а также в северной части его акватории. С декабря по май значения КН повторяемости опасных ветров на акваториях Баренцева и Карского морей в среднем снижаются, что в полной мере соответствует данным [4].

При решении *второй задачи* была выполнена оценка тенденций изменения повторяемости опасных ветров в изучаемом регионе, являющихся значимыми с вероятностью не ниже 0,9. На рис. 2 представлены участки акватории Баренцева и Карского морей, на которых выявлены значимые тенденции изменения температуры в зимне-весенний период 2001–2021 гг. Из этого рисунка видно, что в Баренцевом море с декабря по февраль существуют районы, где с вероятностью не ниже 0,9 в 2001–2021 гг. преобладали значимые тенденции к увеличению повторяемости опасных ветров.

В декабре и феврале такие районы расположены к западу и северу от архипелага Новая Земля. В январе они находятся у западной границы моря (к северу от мыса Нордкап). Из сравнения рис. 1 и 2 видно, что для декабря и января увеличение температуры происходило в тех же районах моря, где КН являлись повышенными (штормовые риски максимальные и наблюдается их повышение).

В Карском море значимые тенденции к увеличению температуры в тот же период выявлены лишь для января и февраля на прибрежных участках его акватории, расположенных к востоку от п. Диксон. Из сравнения рис. 1 и 2 видно, что в январе увеличение температуры в Карском море происходило в тех же районах, где КН превышали средний уровень (штормовые риски в них повышаются). Тенденции к снижению температуры выявлены в Баренцевом море у северного побережья Кольского полуострова

в декабре, в северо-восточной части моря в январе (в его юго-восточной части, включая пролив Карские Ворота, в марте), а также в центральной части моря в апреле.

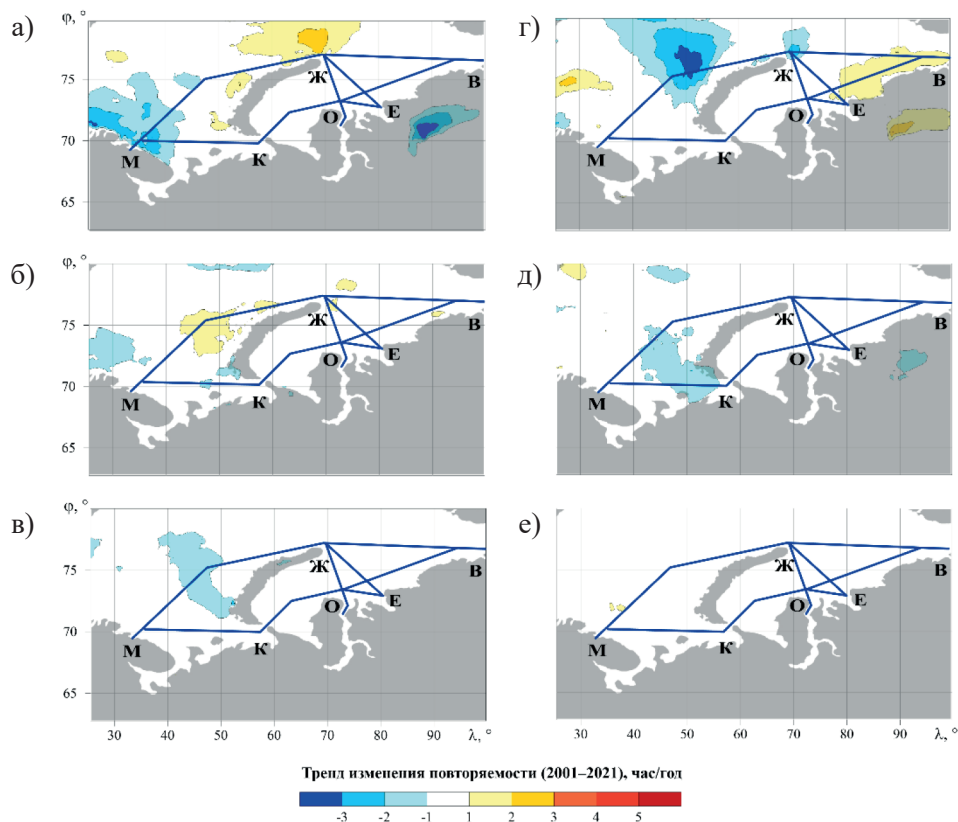


Рис. 2. Тенденции изменения повторяемости опасных ветров за период 2001–2021 гг. по месяцам:
а — декабрь; б — январь; в — февраль; г — март; д — апрель; е — май

Достаточно резкие тенденции межгодовых изменений температуры в Баренцевом и Карском морях выявлены в течение последних 12 лет. На рис. 3 приведены результаты за период 2010–2021 гг. Из рис. 3, а видно, что в декабре ветровая обстановка наблюдалось существенное усложнение в северо-восточной части Баренцева моря (к западу и северу от архипелага Новая Земля). При этом в центральной части моря к северу-востоку от Кольского полуострова тренд на уменьшение температуры, выявленный в течение 2001–2021 г., сохранился.

В Карском море в декабре в 2010–2021 гг. в целом наблюдалось улучшение ветровой обстановки (особенно явно в восточной части моря). Наличие значимых убывающих трендов T зафиксировано в большинстве прибрежных районов моря (см. рис. 1, а). На рис. 3, б видно, что в январе 2010–2021 гг. значительное увеличение температуры происходило во многих районах Баренцева моря, в частности в его юго-восточной части, в проливе Карские ворота, к северу от мыса Нордкап, а также вдоль северного побережья Кольского полуострова. В районе мыса Желания, в отличие от декабря, преобладали существенные тенденции к уменьшению температуры. На акватории Карского моря значимая тенденция к увеличению температуры наблюдалась в январе во всех его прибрежных районах, а также в западной части моря (Новоземельский ледовый массив). В феврале суммарная площадь районов рассматриваемых морей, где происходило увеличение температуры, значительно меньше, чем в предыдущие месяцы. При этом аналогичный показатель для районов, где температура уменьшалась, существенно увеличился. Поэтому в целом по региону можно отметить снижение штормовых рисков в этом месяце. В марте 2010–2021 гг. увеличение температуры было зафиксировано в районах Баренцева моря, расположенных у северного побережья Кольского полуострова, а также к западу от архипелага Новая Земля. В остальных районах Баренцева и Карского морей значимых температурных изменений либо не было выявлено, либо имела место незначительная тенденция к ослаблению ветра.

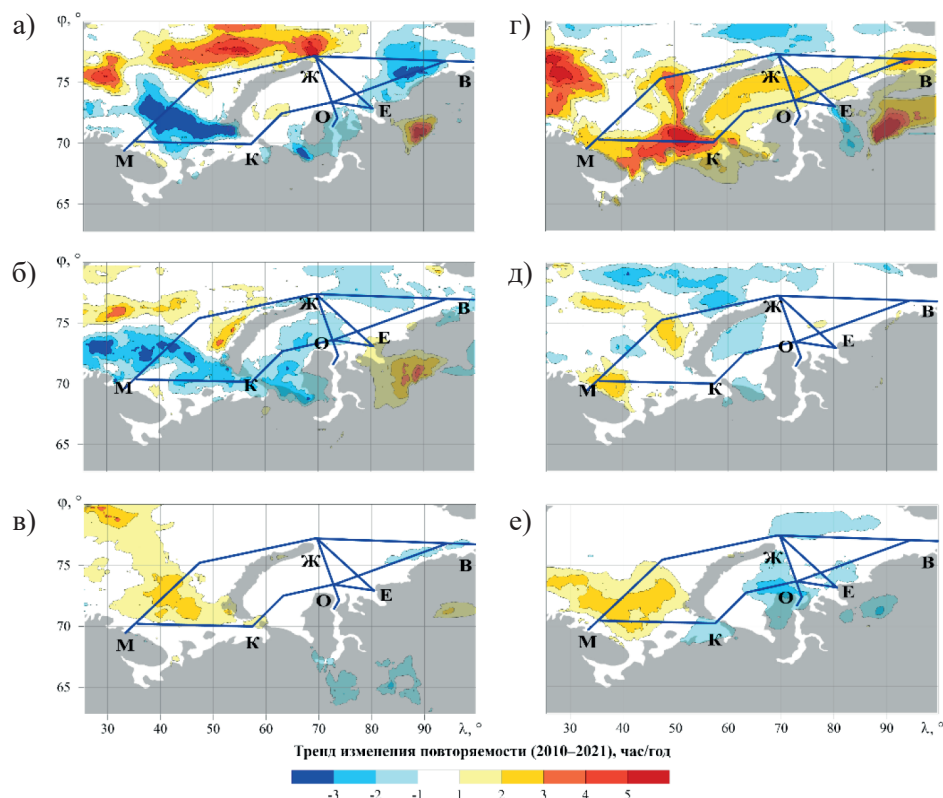


Рис. 3. Тенденции изменения повторяемости опасных ветров за период 2010–2021 гг. по месяцам:

а — декабрь; *б* — январь; *в* — февраль; *г* — март; *д* — апрель; *е* — май

Значимые тенденции к увеличению температуры в Баренцевом море наблюдались в апреле и мае. В эти месяцы средние температуры воздуха переходят в диапазон положительных значений, следовательно, существенно осложнять судоходство из-за обледенения судов участвовавшие ветры не могут. В Карском море тенденций к увеличению температуры не было, а в мае даже был выявлен тренд на снижение значений этого показателя. Полученные результаты свидетельствуют о том, что в первой четверти XXI в. тенденции изменений температуры во многих районах Баренцева и Карского морей для месяцев с декабря по май существенно изменились, при этом наиболее значительные с точки зрения навигационных рисков изменения выявлены в Баренцевом море в декабре и январе.

Исходя из полученных результатов, можно оценить безопасность судоходных маршрутов в регионе. Из рис. 1, *а*, 2, *а* и 3, *а* видно, что в декабре на маршруте, проходящем к северу и западу от архипелага Новая Земля вокруг мыса Желания (маршрут М–Ж на карте), штормовые риски в современном климатическом периоде максимальны, при этом в первой четверти XXI в. (особенно в 2010–2021 гг.) их рост продолжился. Из-за тенденции к увеличению температуры на участке, граничащем на севере с Карским морем, повышаются также риски возникновения ледового сжатия и выноса паковых льдов на судоходные трассы. Для судоходства этот водный путь становится более опасным. Следует отметить, что размеры участков акватории Баренцева моря, на которых выявлены возрастающие тренды T , выходят за границы области влияния Новоземельской боры (обычно до 30 км от берегов островов архипелага) [4] и, следовательно, с ней не связаны. Средние температуры воздуха в декабре в этом районе стабильно держатся ниже нуля, поэтому любое попадание судна в область действия крепкого (либо более сильного по шкале Бофорта) ветра приведет не только к усилению ветрового волнения, но и к обледенению. Из рис. 1, *а*, 2, *а* и 3, *а* видно, что в декабре в центральной части Баренцева моря и на подходах к проливу Карские ворота ветровой режим менее опасен, а изменения температуры имеют убывающий характер. В этой связи переход судов через данный пролив (маршрут М–К) в декабре является предпочтительным. В пользу этого маршрута свидетельствует также

благоприятная ледовая обстановка в юго-западной части Карского моря, наблюдающаяся в последнее десятилетие в декабре [16].

В январе в районах юго-восточной части Баренцева моря и на подходах к проливу Карские Ворота в межгодовых изменениях температуры выявлены значимые возрастающие тренды. Из этого следует, что ветровая обстановка на маршруте М–К в *современном периоде* усложняется. Ухудшению навигационной обстановки способствует также происходящее в этом месяце интенсивное ледообразование в проливе. При этом в районах, через которые проходит высокоширотный маршрут М–Ж, значимых тенденций к увеличению температуры не выявлено, а навигация по нему, очевидно, связана с меньшими рисками.

Ледяной покров Карского моря к началу января уже вполне сформирован. Во многих его районах, через которые проходят судоходные трассы, присутствуют сплоченные однолетние либо паковые дрейфующие льды. Увеличение температуры в этих районах повышает риски ледового сжатия, а также иных опасных ледовых явлений. Февральские тенденции на трассах как Баренцева, так и Карского морей в целом не дают оснований сделать вывод об увеличении рисков для судоходства в современном периоде (в том числе в 2010–2021 гг.), так как значения температуры на большей части маршрутов существенно снижаются. В весенние месяцы значимых тенденций к увеличению температуры в Карском море не выявлено, в связи с чем выбор маршрутов в нем будет определяться прежде всего актуальной ледовой обстановкой. На акватории свободного ото льда Баренцева моря риски, связанные с возникновением опасных ветров, в весеннем сезоне возрастают. Динамика изменения ветровых рисков (рост «↑»; снижение «↓»; отсутствие значимых изменений «—») на судоходных трассах региона сведена в таблицу.

**Динамика изменения ветровых рисков
на судоходных трассах Баренцева и Карского морей**

Маршрут	Зимний сезон			Весенний сезон		
	Декабрь	Январь	Февраль	Март	Апрель	Май
Баренцево море						
М – Ж	↑	↑	↓	—	↑	↑↑
М – К	↓↓	↑↑↑	↓↓	↑	↑	↑
Карское море						
Ж – О/Е	—	↑	↓	—	—	↓
К – О/Е	—	↑↑	↓↓	↓	—	↓
Ж – В	↓	↑	↓	—	—	—
О/Е – В	↓	↑	—	—	↓	↓

Примечание. Количество стрелок характеризует степень увеличения / ослабления рисков.

Обсуждение полученных результатов (Discussion of the Results Obtained)

Полученные результаты свидетельствуют о том, что сокращение ледяного покрова и быстрое потепление климата Арктики существенно изменяет характеристики атмосферной циркуляции и ветровой режим ее морей. Повторяемость опасных ветров в незамерзающем Баренцевом море в большинстве месяцев зимне-весеннего периода возрастает. Над акваториями Карского моря такая тенденция на сегодняшний день не проявляется.

Полученные в настоящей работе оценки в целом соответствуют существующим представлениям об изменениях ветрового режима Западного сектора российской Арктики, изложенным в [8], [11]. Разница между выявленными тенденциями на рис. 2 и 3 может быть объяснена тем, что наиболее заметно изменения повторяемости опасных ветров начали проявляться именно в последнем десятилетии.

В настоящем исследовании получены следующие результаты:

1. Выявлены участки акватории Баренцева моря, на которых в *современном периоде* (особенно в 2010–2021 гг.) значения климатических норм повторяемости опасных ветров для зимних месяцев близки к максимальным уровням, а в их изменениях проявляются значимые тенденции к дальнейшему росту. В Карском море таких участков не выявлено.

2. Выявленные значимые тенденции современных изменений ветрового режима повышают навигационные риски при следовании судов по маршруту вокруг мыса Желания в декабре. При этом на водном пути через пролив Карские ворота ветровые риски снижаются. В январе ситуация изменяется на противоположную.

3. Существуют участки акватории изучаемого региона, на которых тенденции изменений повторяемости опасных ветров, проявившиеся в 2010–2021 гг., совпали с их тенденциями в 2001–2021 гг. Последнее позволяет предположить наличие устойчивости этих тенденций, что дает возможность учитывать их в задачах прогнозирования штормовых рисков на водных путях региона.

Заключение (Conclusion)

Наличие значимой тенденции к увеличению повторяемости опасных ветров над свободными ото льда участками акваторий Баренцева моря подтверждается. Наиболее заметно эта тенденция проявилась в последнее десятилетие в декабре и январе, а также апреле и мае. В Карском море в период устойчивого ледяного покрова во второй половине зимы и в течение всей весны рост повторяемости опасных ветров не выявлен.

Риски при переходе судов по маршруту вокруг мыса Желания в декабре повышаются из-за тенденции к ухудшению ветрового режима в восточной и северной частях Баренцева моря. Помимо штормовых рисков возрастает опасность обледенения судов. Переход через пролив Карские Ворота в декабре является более благоприятным. В январе ситуация меняется на противоположную: переход вокруг мыса Желания становится более безопасным из-за ухудшающейся ветровой и ледовой обстановки в проливе.

Сохранение устойчивости выявленных тенденций межгодовых изменений ветрового режима в рассматриваемом регионе в будущем не гарантировано, поэтому развитие существующей в нем наблюдательной сети остается актуальной проблемой гидрометеорологического обеспечения осуществляемого здесь судоходства.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Тезиков А. Л. Исследование факторов, влияющих на продолжительность навигации в акватории Северного морского пути / А. Л. Тезиков, Е. О. Ольховик // Вестник Государственного университета морского и речного флота имени адмирала С. О. Макарова. — 2020. — Т. 12. — № 4. — С. 734–744. DOI: 10.21821/2309-5180-2020-12-4-734-744.
2. Ольховик Е. О. Исследование плотности транспортных потоков 2018 года в акватории Северного морского пути / Е. О. Ольховик // Вестник Государственного университета морского и речного флота имени адмирала С. О. Макарова. — 2018. — Т. 10. — № 5. — С. 975–982. DOI: 10.21821/2309-5180-2018-10-5-975-982.
3. Бузин И. В. Сжатия ледяного покрова в Печорском море: природное явление и его влияние на морские операции / И. В. Бузин [и др.] // Арктика: экология и экономика. — 2022. — Т. 12. — № 4. — С. 500–512. DOI: 10.25283/2223-4594-2022-4-500-512.
4. Гидрометеорология и гидрохимия морей СССР / Под ред. Г. В. Гирдюка, С. Л. Дженюка, Г. Г. Зыкова, Ф. С. Терзиева. — Л.: Гидрометеоиздат, 1990. — Т. 1: Баренцево море. — Вып. 1: Гидрометеорологические условия. — 280 с.
5. Chylek P. Annual Mean Arctic Amplification 1970–2020: Observed and Simulated by CMIP6 Climate Models / P. Chylek, C. Folland, J. D. Klett, M. Wang, N. Hengartner, G. Lesins, M. K. Dubey // Geophysical Research Letters. — 2022. — Vol. 49. — Is. 13. — Pp. e2022GL099371. DOI: 10.1029/2022GL099371.
6. Yadav J. Dramatic decline of Arctic sea ice linked to global warming / J. Yadav, A. Kumar, R. Mohan // Natural Hazards. — 2020. — Vol. 103. — Pp. 2617–2621. DOI: 10.1007/s11069-020-04064-y.
7. Aksenov Y. On the Future Navigability of Arctic Sea Routes: High-resolution Projections of the Arctic Ocean and Sea Ice / Y. Aksenov, E. E. Popova, A. Yool, A. G. Nurser, T. D. Williams, L. Bertino, J. Bergh // Marine Policy. — 2017. — Vol. 75. — Pp. 300–317. DOI: 10.1016/j.marpol.2015.12.027.
8. Суркова Г. В. Изменения средних и экстремальных скоростей ветра в Арктике в конце XXI века / Г. В. Суркова, А. А. Крылов // Арктика и Антарктика. — 2018. — № 3. — С. 26–36. DOI: 10.7256/2453-8922.2018.3.27395.

9. Рюмина Т. Н. Специализированное гидрометеорологическое обеспечение Северного Морского пути / Т. Н. Рюмина, И. О. Евдокимова // Глобальные проблемы Арктики и Антарктики: сборник науч. материалов Всерос. конф. с междунар. участием, посвящен. 90-летию со дня рождения акад. Н. П. Лавёрова. — Архангельск: Федеральный исследовательский центр комплексного изучения Арктики им. акад. Н. П. Лаверова РАН, 2020. — С. 820–824.
10. Sharmar V. Evaluation of interdecadal trends in sea ice, surface winds and ocean waves in the Arctic in 1980–2019 / V. Sharmar, M. Markina // Russian Journal of Earth Sciences. — 2021. — Vol. 21. — Pp. ES2002. DOI: 10.2205/2020ES000741.
11. Серых И. В. Изменения климата западной части Российской Арктики в 1980–2021 гг. Ч. 1 : Температура воздуха, осадки, ветер / И. В. Серых, А. В. Толстиков // Проблемы Арктики и Антарктики. — 2022. — Т. 68. — № 3. — С. 258–277. DOI:10.30758/0555-2648-2022-68-3-258-277.
12. Pub. 183 (Enroute). Sailing Directions. North Coast of Russia. — Springfield, Virginia: National Geospatial Intelligence Agency, 2021. — 188 p.
13. Руководящие указания ВМО по расчету климатических норм. — Женева: Всемирная Метеорологическая организация, 2017. — 21 с.
14. Пустовалов К. Н. Изменчивость ресурсов солнечной и ветровой энергии в российском секторе Арктики / К. Н. Пустовалов, Е. В. Харюткина, В. А. Корольков, П. М. Нагорский // Оптика атмосферы и океана. — 2019. — Т. 32. — № 11. — С. 908–914. DOI: 10.15372/AOO20191105.
15. Hoffmann L. From ERA-Interim to ERA5: the considerable impact of ECMWF's next-generation reanalysis on Lagrangian transport simulations / L. Hoffmann, G. Günther, D. Li, O. Stein, X. Wu, S. Griessbach, Y. Heng, P. Konopka, R. Müller, B. Vogel, J. S. Wright // Atmospheric Chemistry and Physics. — 2019. — Vol. 19. — Is. 5. — Pp. 3097–3124. DOI: 10.5194/acp-19-3097-2019.
16. Kholoptsev A. V. Current trends in the ice thickness and concentration on the waterways of the arctic / A. V. Kholoptsev, S. A. Podporin, V. V. Karetnikov // IOP Conference Series: Earth and Environmental Science. — IOP Publishing, 2021. — Vol. 867. — Is. 1. — Pp. 012013. DOI: 10.1088/1755-1315/867/1/012013.

REFERENCES

1. Tezikov, Aleksandr L., and Evgeniy O. Ol'khovik. "Studying the factors affecting the duration of navigation in the Northern Sea Route water area." *Vestnik Gosudarstvennogo universiteta morskogo i rechnogo flota imeni admirala S. O. Makarova* 12.4 (2020): 734–744. DOI: 10.21821/2309-5180-2020-12-4-734-744.
2. Ol'khovik, Evgeniy O. "Research of the density of transports flows on the Northern Sea Route in 2018 year." *Vestnik Gosudarstvennogo universiteta morskogo i rechnogo flota imeni admirala S. O. Makarova* 10.5 (2018): 975–982. DOI: 10.21821/2309-5180-2018-10-5-975-982.
3. Buzin, Igor Vladimirovich, Sergey Vladimirovich Klyachkin, Sergey Viktorovich Frolov, Konstantin Grigorievich Smirnov, Svetlana Vitalievna Mikhaltceva, Yulia Vadimovna Sokolova, Yuri Petrovich Gudoshnikov, Gennady Nikolaevich Voinov, and Mikhail Nikolaevich Grigoryev. "Compression of the ice cover in the Pechora Sea: a natural phenomenon and its impact on marine operations." *Arctic: Ecology and Economy* 12.4 (2022): 500–512. DOI: 10.25283/2223-4594-2022-4-500-512.
4. Girdyuk, G. V., S. L. Dzhenyuk, G. G. Zyкова, and F. S. Terziyeva, eds. *Gidrometeorologiya i gidrokimiya morey SSSR. Tom 1. Barentsevo more. Vypusk 1. Hidrometeorologicheskiye usloviya*. L.: Gidrometeoizdat, 1990.
5. Chylek, Petr, Chris Folland, James D. Klett, Muyin Wang, Nick Hengartner, Glen Lesins, and Manvendra K. Dubey. "Annual Mean Arctic Amplification 1970–2020: Observed and Simulated by CMIP6 Climate Models." *Geophysical Research Letters* 49.13 (2022): e2022GL099371. DOI: 10.1029/2022GL099371.
6. Yadav, Juhi, Avinash Kumar, and Rahul Mohan. "Dramatic decline of Arctic sea ice linked to global warming." *Natural Hazards* 103 (2020): 2617–2621. DOI: 10.1007/s11069-020-04064-y.
7. Aksenov, Yevgeny, E. E. Popova, A. Yool, A. J. G. Nurser, Timothy D. Williams, Laurent Bertino, and Jon Berg. "On the Future Navigability of Arctic Sea Routes: High-resolution Projections of the Arctic Ocean and Sea Ice." *Marine Policy* 75 (2017): 300–317. DOI: 10.1016/j.marpol.2015.12.027.
8. Surkova, Galina V., and Aleksei A. Krylov. "Changes in average and extreme wind speeds in the Arctic during the late XXI century." *Arctic and Antarctica* 3 (2018): 26–36. DOI: 10.7256/2453-8922.2018.3.27395.
9. Ryumina, T. N., and I. O. Evdokimova. "Spetsializirovannoe gidrometeorologicheskoe obespechenie Severnogo Morskogo puti." *Global'nye problemy Arktiki i Antarktiki: sbornik nauch. materialov Vseros. konf. s mezhdunar. uchastiem, posvyashchen. 90-letiyu so dnya rozhdeniya akad. Nikolaya Pavlovicha Laverova*.

Arkhangel'sk: Federal'nyi issledovatel'skii tsentr kompleksnogo izucheniya Arktiki imeni akademika N. P. Laverova Rossiiskoi akademii nauk, 2020. 820–824.

10. Sharmar, Vitali, and Margarita Markina. "Evaluation of interdecadal trends in sea ice, surface winds and ocean waves in the Arctic in 1980–2019." *Russian Journal of Earth Sciences* 21 (2021): ES2002. DOI: 10.2205/2020ES000741.

11. Serykh, Ilya V., and Alexei V. Tolstikov. "Climate change in the western part of the Russian arctic in 1980–2021. Part 1. Air temperature, precipitation, wind." *Arctic and Antarctic Research* 68.3 (2022): 258–277. DOI: 10.30758/0555-2648-2022-68-3-258-277.

12. *Pub. 183 (Enroute). Sailing Directions. North Coast of Russia*. Springfield, Virginia: National Geospatial-Intelligence Agency, 2021.

13. *Rukovodyashchiye ukazaniya VMO po raschetu klimaticheskikh norm*. Geneva: World Meteorological Organization (WMO), 2017.

14. Pustovalov, K.N., E. V. Kharyutkina, V. A. Korolkov, and P. M. Nagorskiy. "Variability in resources of solar and wind energy in the Russian sector of Arctic." *Atmospheric and Oceanic Optics* 32.11 (2019): 908–914. DOI: 10.15372/AOO20191105.

15. Hoffmann, Lars, Gebhard Günther, Dan Li, Olaf Stein, Xue Wu, Sabine Griessbach, Yi Heng, Paul Konopka, Rolf Müller, Bärbel Vogel, and Jonathon S. Wright. "From ERA-Interim to ERA5: the considerable impact of ECMWF's next-generation reanalysis on Lagrangian transport simulations." *Atmospheric Chemistry and Physics* 19.5 (2019): 3097–3124. DOI: 10.5194/acp-19-3097-2019.

16. Kholoptsev, A. V., S. A. Podporin, and V. V. Karetnikov. "Current trends in the ice thickness and concentration on the waterways of the arctic." *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*. Vol. 867. No. 1. IOP Publishing, 2021. DOI: 10.1088/1755-1315/867/1/012013.

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

Подпорин Сергей Анатольевич —
кандидат технических наук, доцент
Севастопольское отделение ФГБУ
«Государственный океанографический институт
имени Н. Н. Зубова»
299011, Российская Федерация,
г. Севастополь, ул. Советская, 61
e-mail: s.a.podporin@gmail.com

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

INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Podporin, Sergey A. —
PhD, associate professor
Sevastopol branch of FSBI "N. N. Zubov's State
Oceanographic Institute"
61 Sovetskaya Str.,
Sevastopol, 299011,
Russian Federation
e-mail: s.a.podporin@gmail.com

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

Статья поступила в редакцию 1 марта 2023 г.
Received: March 1, 2023.

CARTOGRAPHIC SUPPORT ISSUES IN THE ARCTIC OCEAN STUDYING AND BATHYMETRIC INVESTIGATION OBJECTIVES IN THE RUSSIAN ARCTIC

Yu. G. Firsov¹, A. G. Zinchenko²

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

² — FSBI “VNIIOkeangeologia”, St. Petersburg, Russian Federation

The current state and issues of the bathymetric investigations of the Arctic Ocean are examined in the study. The main sources of bathymetric data in the Central Arctic region and Arctic seas are characterized. The main possibilities to solve these issues in order to improve the efficiency of oncoming bathymetric investigation in the Russian Arctic sector for solving the urgent practical and scientific tasks of the Russian Federation in the Arctic region are discussed. The problem of hydrographic investigation and marine cartography of the new high latitude routes in the Northern Sea Route and bathymetric investigations of the South-Eastern part of Gakkel Ridge which are important for the Russian extended continental shelf submission is covered as one of the main issues. The importance of a new hydrographic investigation at the high latitude routes in the East Siberian Sea in order to provide the possibility of year-round navigation for the large-tonnage Arc7-class icebreaking liquefied natural gas carriers is especially emphasized. The questions of geoformation and ice satellite support for efficient navigation along the Northern Sea Route are considered. It is concluded that the poor hydrographic knowledge of the new high latitude route in the East Siberian Sea and the lack of electronic navigation charts will prevent the possibility of establishing the year-round navigation for Arc7-class icebreaking liquefied natural gas carriers during the coming several years. It is stated that hydrographic investigations carried out on the sections of the Northern Sea Route must adhere to the requirements of the International Hydrographic Organization. The urgency of developing the state integrated bathymetric database for the Arctic Ocean including the arctic seas data along with the necessity of providing all Russian bathymetric data acquired in the Arctic region to the assigned national center is discussed. The FKU 280 ZKP VMF is proposed as such national center. The importance of bathymetric maps of the Arctic Ocean is noted. The main role of creating the electronic bathymetric maps using modern technology and analytical geomorphological mapping on the basis of the system-oriented morphological approach in Earth science is emphasized.

Keywords: Arctic region, Arctic Ocean, East Siberian Sea, arctic shelf, Arctic Basin, Northern Sea Route, bottom relief, mapping, hydrographic investigations, bathymetric maps, geomorphological maps.

For citation:

Firsov, Yury G., and Anna G. Zinchenko. “Cartographic support issues in the Arctic Ocean studying and bathymetric investigation objectives in the Russian Arctic.” *Vestnik Gosudarstvennogo universiteta morskogo i rechnogo flota imeni admiral S. O. Makarova* 15.2 (2023): 226–246. DOI: 10.21821/2309-5180-2023-15-2-226-246.

УДК 551.462.33(268)

ПРОБЛЕМЫ КАРТОГРАФИЧЕСКОГО ОБЕСПЕЧЕНИЯ ПРИ ИЗУЧЕНИИ СЕВЕРНОГО ЛЕДОВИТОГО ОКЕАНА И ЗАДАЧИ БАТИМЕТРИЧЕСКИХ ИССЛЕДОВАНИЙ В РОССИЙСКОЙ АРКТИКЕ

Ю. Г. Фирсов, А. Г. Зинченко

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

² — ФГБУ «ВНИИОкеангеология», Санкт-Петербург, Российская Федерация

Дан обзор современного состояния и проблем батиметрических исследований Северного Ледовитого океана. Охарактеризованы основные источники батиметрических данных по Центральному Арктическому бассейну и окраинным арктическим морям. Предложены основные пути решения существующих проблем в целях повышения эффективности дальнейшего батиметрического изучения Арктической зоны Российской Федерации.

Федерации и обеспечения практических и научных задач в Арктическом регионе. В качестве первоочередных задач выделено гидрографическое и картографическое обеспечение высокоширотных трасс Северного морского пути и батиметрическая съемка юго-восточной части хребта Гаккеля для обеспечения российского представления на расширенный континентальный шельф в Арктике. Отмечается актуальность гидрографических исследований новых высокоширотных трасс в Восточно-Сибирском море для обеспечения круглогодичной навигации СПГ-танкеров ледового класса «Arc7». Рассмотрены вопросы современного информационного обеспечения Северного морского пути. Сформулирован вывод о том, что низкая гидрографическая изученность новой высокоширотной трассы в Восточно-Сибирском море и отсутствие навигационных карт по трассе будут в ближайшие годы препятствовать возможности осуществления круглогодичной навигации СПГ-танкеров. Подчеркивается, что гидрографические съемки на трассе Северного морского пути должны выполняться в соответствии с требованиями стандартов Международной гидрографической организации. Обоснована необходимость формирования современной единой государственной базы батиметрических данных Северного Ледовитого океана, включая арктические моря России и необходимость предоставления всех вновь полученных данных по рельефу дна в национальный центр, в качестве которого рекомендован ФКУ «280 ЦКП ВМФ». Указаны особенности и значение батиметрических карт Северного Ледовитого океана и создаваемых на их основе геоморфологических карт. Отмечается главенствующая роль электронных батиметрических карт, созданных на основе современных технологий с применением аналитического геоморфологического картографирования на основе использования методик системно-морфологического направления в науках о Земле.

Ключевые слова: Арктический регион, Северный Ледовитый океан, арктический шельф, Центральный Арктический бассейн, Северный морской путь, СПГ-танкер, Восточно-Сибирское море, рельеф морского дна, картографирование морского дна, гидрографические исследования, электронные батиметрические карты, цифровые геоморфологические карты.

Для цитирования:

Фирсов Ю. Г. Проблемы картографического обеспечения при изучении Северного Ледовитого океана и задачи батиметрических исследований в российской Арктике / Ю. Г. Фирсов, А. Г. Зинченко // Вестник Государственного университета морского и речного флота имени адмирала С. О. Макарова. — 2023. — Т. 15. — № 2. — С. 226–246. DOI: 10.21821/2309-5180-2023-15-2-226-246.

Введение (Introduction)

Круг научных и хозяйственных задач, реализуемых Российской Федерацией (РФ) в Арктическом регионе, постоянно расширяется. Изучение и освоение природных ресурсов, транспортная деятельность на трассе Северного морского пути (СМП), исследования климатических изменений и их последствий, анализ состояния природной среды, прогноз опасных процессов, подводные археологические исследования — все эти исследования невозможны без качественного картографического обеспечения, которое, в соответствии с современными требованиями, в первую очередь должно включать батиметрические и геоморфологические карты нового уровня, комплексирование которых открывает новые возможности для анализа и синтеза разнообразных данных, а также выработки подходов к решению существующих проблем. В конечном итоге наличие полных и достоверных цифровых моделей рельефа дна в геоинформационных системах (ГИС) необходимо для принятия правильных управленческих решений, в том числе в чрезвычайных ситуациях.

Вопросы батиметрической изученности приобрели особое значение в последние два десятилетия в связи с подготовкой и защитой частичного пересмотренного представления РФ на расширенный континентальный шельф в Северном Ледовитом океане (СЛО) [1]. В частности, важное место занимает обеспечение эффективной эксплуатации СМП. Для реализации поставленных задач необходим поиск новых подходов к картографическому обеспечению, которое должно включать создание батиметрических и геоморфологических карт современного уровня точности и детальности. Их комплексирование открывает новые возможности для анализа и синтеза разнообразных данных, а также выработки подходов к решению существующих проблем.

Исторически Россия всегда занимала передовые позиции в исследованиях Арктики, которые значительно укрепились после Второй мировой войны, когда батиметрическое изучение шельфов арктических морей России было выделено в отдельное направление по обеспечению СМП. Изучение Центрального Арктического бассейна (ЦАБ) имело в значительной степени

военно-оборонительный характер. В 70–80-е гг. XX в. в морях российской Арктики началось проведение геолого-геофизических исследований, однако в 90-е гг. XX в. объем российских исследований был существенно сокращен. В начале XXI в. интерес к батиметрии ЦАБ возобновился в связи с необходимостью обоснования пересмотренной внешней границы континентального шельфа (ВГКШ) России в СЛО. Постепенно батиметрические работы начали выполняться на новом технологическом уровне как для обеспечения СМП, так и для проведения геофизических работ. В последнее десятилетие наблюдается существенная интенсификация исследований Арктики, в том числе батиметрических. Однако для достижения необходимого уровня батиметрической изученности требуется решение ряда проблем.

Методы и материалы (Methods and Materials)

В СЛО, ввиду особенностей рельефа, выделяются две части: ЦАБ со значительными глубинами, достигающими 3800–4200 м и более, а также окружающий его относительно мелководный шельф с глубинами, редко превышающими 200 м [2] — рис. 1. Состояние изученности рельефа дна, способы его исследования и цели, преследуемые в этих двух частях океана, имеют свои особенности. Границей между шельфом и ЦАБ является бровка шельфа — выпуклый перегиб профиля дна, за которым начинается отчетливое нарастание глубин в направлении глубоководья.

История исследований рельефа дна СЛО рассмотрена в обзорах, содержащихся в многочисленных отечественных работах, опубликованных в 2017–2019 гг. [3]–[8].

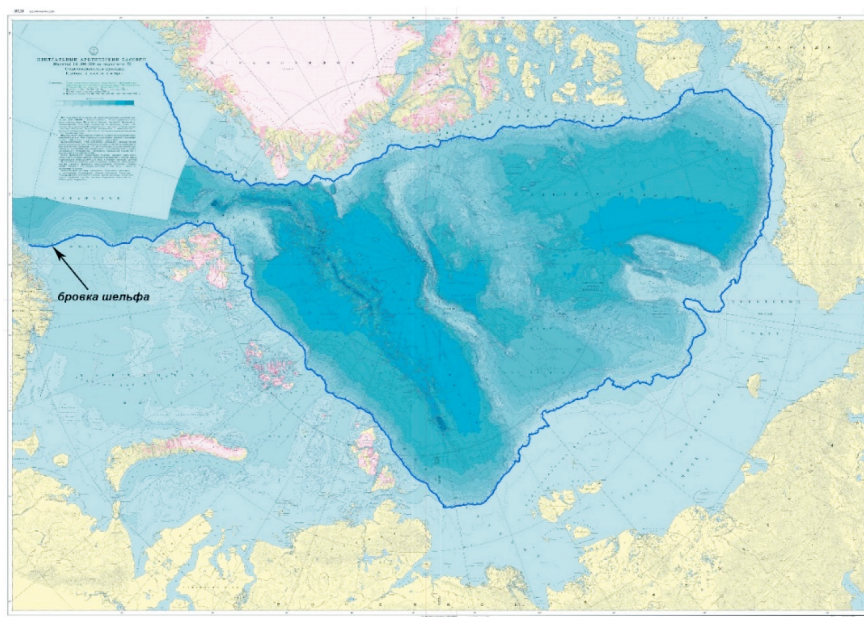


Рис. 1. Бровка шельфа Северного Ледовитого океана на батиметрической карте «Центральный Арктический бассейн» (адмиралтейский номер 91115)

Широкомасштабные отечественные гидрографические и геолого-геофизические работы, начавшиеся после Второй мировой войны, были ознаменованы открытием советскими исследователями в 1948 г. хребтов Ломоносова и Гаккеля, а в 1949 г. — поднятия Менделеева. В 1966 г. была издана «Геоморфологическая карта Северного Ледовитого океана и его побережий» масштаба 1:5000 000 [9], в максимальной степени учитывающая гидрографическую изученность СЛО на тот период. Основой для ее шельфовой части служил комплект батиметрических карт окраинных морей, подготовленный В. Т. Мартыновым по материалам работ Гидрографического предприятия (ГП) Министерства морского флота (ММФ) СССР. К сожалению, эта уникальная геоморфологическая карта малоизвестна даже в России. Важным суммирующим результатом работ в СЛО был изданный в 1980 г. Атлас океанов [9].

Изучение рельефа дна северных морей СССР, которое в послевоенное время проводилось силами ГП ММФ, было направлено главным образом на обеспечение безопасности мореплавания в первую очередь по трассам СМП. В 1950–70-е гг. для позиционирования гидрографических работ применялись отечественные фазовые радионавигационные системы и однолучевые эхолоты. Позже, в 1980-е гг., на специализированных гидрографических судах ГП использовались зарубежные РНС и однолучевые эхолоты типа Atlas DESO-20. Первоочередные работы в 1950-е гг. проводились в южной части арктических морей, вдоль всех побережий. Итогом первого этапа этих работ явилось создание комплекта навигационных морских карт (НМК) различного масштаба, обеспечивших навигационную безопасность плавания по трассе СМП для судов с осадкой 6–10 м. В настоящее время комплект навигационных морских карт (НМК) на трассу СМП, изданных Управлением навигации и океанографии (УНиО) МО РФ, включает более 680 единиц, из них на Карское море приходится более 440 НМК [10]. Коллекция электронных навигационных карт (ЭНК) по трассе СМП в настоящее время составляет более 387 единиц. На рис. 2 представлены НМК юго-западной части Карского моря.

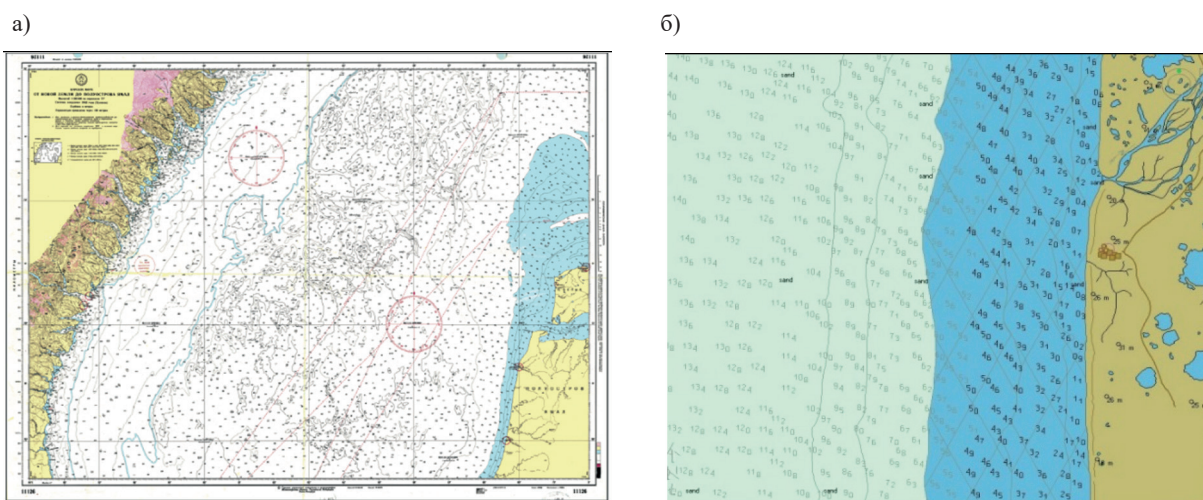


Рис. 2. Примеры навигационных морских карт:

- а — НМК юго-западная часть Карского моря (адмиралтейский номер 11126) масштаба 1: 500 000;
б — фрагмент ЭНК «Подходы к полярной станции Марресала» масштаба 1: 10 000

Основным видом НМК арктических морей являются путевые карты масштабов 1:150 000–1:200 000. Крупномасштабные НМК (планы) представлены в незначительном количестве и охватывают в основном рейды полярных станций. В гидрографическом отношении наименее изучена северная часть арктических морей РФ. Следует отметить, что в связи с увеличением осадки современных судов, которые планируется использовать на трассах СМП, его гидрографическая изученность является недостаточной. С 2011 г. ГП возобновило гидрографические исследования на существующей, а также и на альтернативной высокоширотной трассе СМП. Подготовлены цифровые справочно-информационные наборы [11], границы рамок которых по состоянию на 2022 г. представлены на рис. 3.

Выбор маршрутов и разведка высокоширотных трасс выполняется с использованием современных гидрографических технологий и рекомендаций, приведенных в работах [12]–[14], а также информационного обеспечения, включающего спутниковые ледовые карты. В связи с появлением крупнотоннажных судов ледового класса для перевозки сжиженного газа (СПГ-танкеры), которые имеют осадку 12 м и поэтому не могут следовать через пролив Санникова, актуальной является необходимость проведения гидрографических работ на высокоширотных трассах в Восточно-Сибирском море. Дополнительным обстоятельством в пользу этого является изменение ледовых условий плавания в связи с потеплением климата. С целью обеспечения возможности круглогодичной навигации по трассе СМП требуется развитие современных информационных технологий с применением различного вида спутниковых снимков.

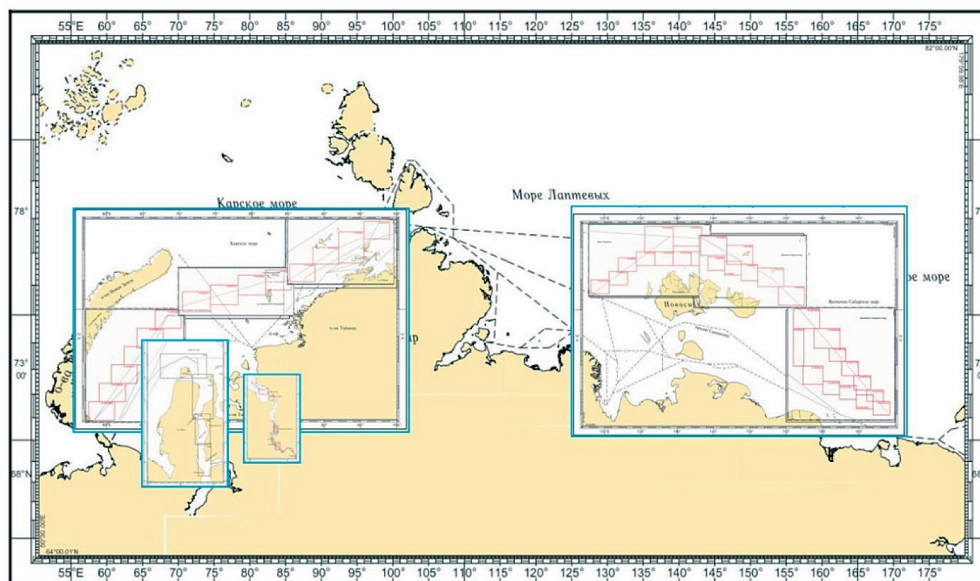


Рис. 3. Карта существующей и альтернативной перспективной высокоширотной трассы СМП с границами рамок цифровых справочно-информационных наборов

По мере расширения видов деятельности в арктических морях стало очевидно, что НМК не обеспечивают решения многих задач. В 80-е гг. XX в. подразделения Главного управления геодезии и картографии СССР (ГУГК) начали проведение съемок рельефа дна, направленных на создание морских топографических карт шельфа в интересах народного хозяйства, главным образом для обеспечения морских геолого-разведочных работ. Морские топографические карты (МТК), издаваемые в проекции Гаусса – Крюгера в стандартной разграфке в масштабах 1:25 000–1:50 000, показывали рельеф дна с максимально возможной детальностью и не предназначались для обеспечения безопасности мореплавания. Кроме того, МТК включали дополнительную нагрузку в виде, например, гранулометрических параметров донного осадка, донной растительности и др. [15]. В такой продукции и теперь крайне заинтересованы морские геологи, биологи, океанологи, морские инженеры, строители и проектировщики различных сооружений на морском дне. Образец морской топографической карты приведен на рис. 4.



Рис. 4. Образец морской топографической карты (масштаб 1:25 000)

Назначение НМК и МТК определяет существенные различия между ними. На НМК изобаты предназначены для общей характеристики рельефа или детализации опасностей, в то время как ведущим показателем являются реально измеренные отметки глубин. На МТК, напротив, ведущим изобразительным средством служат горизонталы, получаемые при интерполяции исходных данных. Их рисовка, участки разрежения и сгущения, степень извилистости и другие факторы отражают пластику рельефа на всей исследуемой площади во всех ее подробностях и особенностях. Отметки глубин при этом могут быть разрежены, являясь дополнительной характеристикой. Кроме того, применение равноугольной проекции позволяет выполнять измерение площадных параметров по МТК. Важно, что ТПК представляют единую систему с топографическими картами прилегающей суши. Морская топографическая съемка выборочно выполнялась практически на всех морях СССР, включая юго-западную часть Карского моря. К сожалению, такие работы не получили должного развития и в начале 90-х гг. XX в. были полностью прекращены. Учитывая содержание последней редакции закона «О геодезии, картографии и пространственных данных» (2015 г.), Росреестр, ныне отвечающий за картографическое обеспечение, по-видимому, не планирует выполнение топографических съемок на акваториях и издание МТК.

В 70–80-е гг. XX в. в арктических морях России практически все виды геолого-разведочных работ сопровождался промером глубин однолучевыми эхолотами. Научные организации, а также экспедиции Министерства геологии СССР и Министерства газовой промышленности СССР имели большие объемы батиметрической информации, главным образом по Западному сектору Арктики. Организации, заинтересованные в батиметрических картах для своих целей, начали их создавать своими силами на основе НМК, в ряде случаев с использованием данных собственного промера. Вначале такие карты создавались исключительно вручную. Большую помощь геологам и геофизикам оказали построения, выполненные по инициативе и под руководством Г. Г. Матишова (ПИНРО, ММБИ), Ю. Н. Кулакова и Г. П. Махотиной (ВНИИОкеангеология), А. Н. Ласточкина (ВНИГРИ), а также карты, составленные В. В. Назимовым (АМНГР), Н. В. Маркиной (МАГЭ), И. Г. Авенариус («Аэрогеология»), Ю. И. Гольдфарбом (ВНИИморгео) и др., став составной частью многочисленных работ по оценке перспектив разных районов шельфа для проведения поиска и разведки полезных ископаемых. В дальнейшем, уже с использованием компьютерных технологий, в Морской арктической геолого-разведочной экспедиции (МАГЭ) были созданы батиметрические основы для ряда листов Северо-Карско-Баренцевоморской и Лаптево-Сибироморской серий Государственной геологической карты Российской Федерации масштаба 1:1 000 000¹. Большой массив данных был задействован при создании батиметрических карт в ИО РАН С. Л. Никифоровым [16]. Обеспечивая выполнение конкретных научных и практических задач, такие построения не всегда отвечали строгим гидрографическим требованиям и не могли стать компонентами сводного проекта, связанного с необходимостью предоставления метаданных съемки.

Официальные батиметрические основы для листов Государственных геологических карт масштаба 1:1 000 000 выпускались Центральным картографическим производством ВМФ РФ. Всего в период 1997–2005 гг. этой организацией были подготовлены батиметрические основы для четырех сдвоенных и шести счетверенных номенклатурных листов международной разграфки главным образом на шельфы восточно-арктических морей России, а также прилегающих частей Арктического бассейна. Впоследствии эти батиметрические основы были использованы для пересчета геофизических данных и создания геофизических основ, а также построения тематических карт комплектов Госгеолкарты-1000, включая геоморфологические и орографические карты и схемы. Однако подобных материалов явно недостаточно, а имеющиеся нуждаются в актуализации.

Особая ситуация сложилась в связи необходимостью обеспечения работ по обоснованию внешней границы континентального шельфа (ВГКШ) России в Арктике. В 1990-х гг. был выполнен анализ имеющейся к этому времени базы батиметрических данных. Новым шагом построения карт является предварительное составление на основе анализа морфологии рельефа так называемой *орографической карты* [17], которая, по существу, ближе к аналитической геоморфологической

¹ https://vsegei.ru/ru/info/pub_ggk1000-3/index.php.

карте. Затем на ее базе в результате совместных усилий ГУНиО МО РФ, ВНИИ «Океангеология» и РАН была составлена батиметрическая карта «Рельеф дна Северного Ледовитого океана» масштаба 1:5 000 000 [18], а затем ГУНиО МО РФ в 2002 г. подготовило карту «Центральный Арктический бассейн» [1].

Результаты (Results)

В начала XXI в. с появлением современных технологических возможностей начался новый этап изучения рельефа дна СЛО с использованием многолучевых эхолотов (МЛЭ), установленных на научно-исследовательских судах (НИС). Отображение рельефа дна стало выполняться на основе формирования баз батиметрических данных (ББД) в форме цифровых моделей с применением геоинформационных технологий. Интенсификация съемок была во многом связана с проблемой определения ВГКШ арктических государств: Дании, Канады, России и США [3]. Получили развитие международные проекты GEBCO и IBCAO. На основе всей имеющейся доступной информации в 2012 г. была уточнена цифровая батиметрическая карта рельефа СЛО в виде регулярной сетки глубин с размерностью грида 500 м (IBCAO v.3), а в 2019 г. появилась новая — четвертая версия IBCAO¹. Подробное описание IBCAO v.4 дано в работе [20]. За период 2001–2020 гг. в СЛО были выполнены многочисленные современные батиметрические съемки с МЛЭ. Данные для IBCAO v.4 были предоставлены Данией, Канадой и США, а из России для IBCAO v.4 были переданы только батиметрические материалы совместной шведско-российской экспедиции SWERUS на научно-исследовательском ледоколе Oden. По сравнению с v. 3 в новой версии IBCAO более 16 % глубин получены с использованием МЛЭ [19].

Россия располагает огромным фактическим материалом батиметрических съемок, выполненных в 60–90-х гг. XX в. (ретроспективные данные), на основе которых карта «Центральный Арктический бассейн» (адмиралтейский номер 91115) в аналоговом варианте была издана в масштабе 1:2 500 000 [2] (см. рис. 1). Впоследствии эти ретроспективные данные были оцифрованы. К 2017 г. Федеральное казенное учреждение (ФКУ) «280 Центральное картографическое производство ВМФ» (далее — ЦКП ВМФ) провело ревизии ретроспективных данных на районы российской зоны СЛО, сформировав обновленную ББД с целью создания цифрового варианта карты «Центральный Арктический бассейн» в формате S-57 [21] и новой ББД российского сектора СЛО с учетом новых российских данных [20], [21].

В период 2010–2014 гг. РФ выполнила большой объем многолучевой батиметрической съемки в российском секторе Арктического бассейна в целях обоснования «Пересмотренного частичного представления РФ на расширенный континентальный шельф в СЛО» [1]. В августе 2015 г. «Частичное представление РФ на расширенный континентальный шельф в Арктике» было передано для рассмотрения в Комиссию по границам континентального шельфа ООН. Описание выполненных работ до 2019 г. дано в работе [22]. Экспедиции проводилась на научно-экспедиционном судне (НЭС) «Академик Фёдоров», оснащенный многолучевым и однолучевым эхолотами под проводкой атомного ледокола. В 2019 г. в ходе экспедиции «Шельф-2019» была выполнена съемка рельефа дна в восточной части котловины Нансена, примыкающей к хребту Гаккеля. Батиметрическая съемка многолучевым и однолучевым эхолотами выполнена на галсах 4378 лин. км и 1192 лин. км на межгалсовых переходах [23]. Начиная с 2020 г. в связи с изменением концепции российской «Заявки на расширенный континентальный шельф в Арктике» батиметрические исследования в СЛО были продолжены.

В период с 18 августа по 12 ноября 2020 г. по заказу Министерства обороны Российской Федерации и Министерства природных ресурсов и экологии Российской Федерации головной роли Акционерного общества (АО) «ГНИНГИ» с участием Федерального Государственного унитарного предприятия (ФГУП) «Атомфлот», ФГБУ «ААНИИ», ФГБУ «ВНИИОкеангеология», Открытого акционерного общества (ООО) «Гидро-Си» и ООО «Моргеонац» были успешно проведены комплексные батиметрические исследования в СЛО. Экспедиция проводилась по заранее спланированной системе галсов в четырех районах: на хребте Гаккеля, в западной части хребта Ломоносова,

¹ https://www.gebco.net/data_and_products/gridded_bathymetry_data/arctic_ocean/.

в Канадской котловине и на Чукотском поднятии [24]. Галсы комплексных батиметрических исследований 2020 г. представлены на рис. 5. В течение восьмидесяти семи суток рейса были выполнены многолучевая съемка рельефа дна, морская гравиметрическая съемка, акустическое профилирование объемом 14 979 лин. км, а также проведены измерения вертикального распределения скорости звука (ВРСЗ) на 38 гидрологических станциях. В составе гидрографического отряда принимали участие студенты, обучающиеся по магистерской программе на Арктическом факультете Института «Морская академия» ГУМРФ имени адмирала С. О. Макарова.

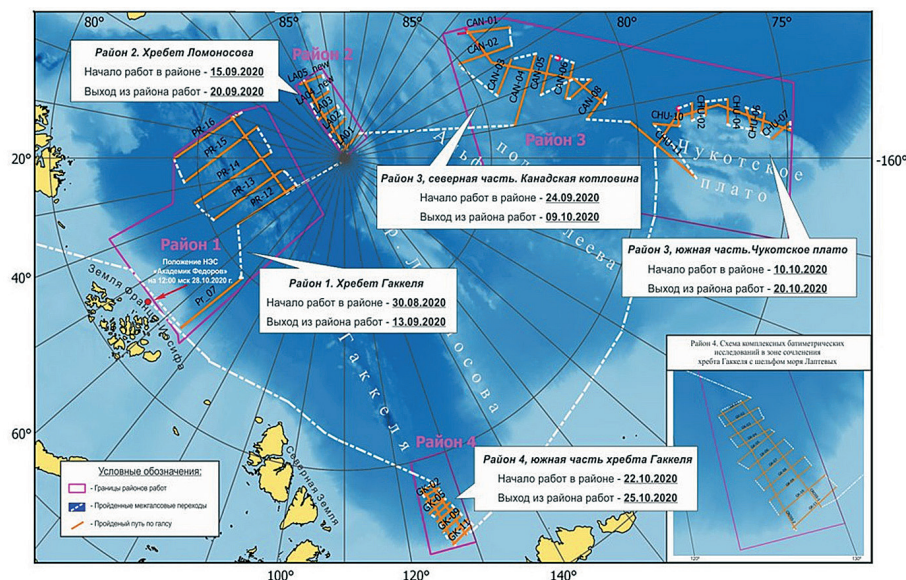


Рис. 5. Галсы комплексных батиметрических исследований 2020 г.

В 2022 г. была продолжена съемка дна в районе юго-восточной части хребта Гаккеля. Детальная площадная батиметрическая съемка выполнена на локальном участке к югу от долины Садко в полосе шириной 70 км до изобаты 1500 м в качестве продолжения съемки в районе 4 (см. рис. 5). При этом были получены новые данные для геоморфологического анализа непрерывности хребта Гаккеля при его сопряжении с континентальным склоном в море Лаптевых. Общая протяженность галсов многолучевой съемки рельефа в СЛО на 2022 г. составила более 59 200 лин. км. Российская гидрографическая изученность восточной части хребта Гаккеля превосходит сведения, содержащиеся в батиметрической модели IBCAO v.4.

Несмотря на увеличивающиеся объемы изученности рельефа СЛО, еще остаются районы, требующие уточнения данных [6], а для ряда форм рельефа требуется редактирование их классификации и наименований. Эти вопросы детально рассмотрены в работе [6]. Актуальной задачей на современном этапе является популяризация результатов российских исследований в СЛО и принятие мер для защиты национального приоритета в обнаружении ранее неизвестных форм рельефа дна с присвоением им имен отечественных ученых и исследователей.

Источники батиметрии СЛО в Российской Федерации:

1. ББД арктических морей западного сектора Арктики, подготовленная 280 ЦКП ВМФ МО РФ на основе ЭНК Баренцева, Карского морей и моря Лаптевых [21], [22].
2. ББД ГП корпорации «Росатом» [11], реализованная в виде цифровых справочно-информационных наборов и ячеек ЭНК, созданных на основе НМК.
3. Батиметрическая модель IBCAO v. 4, доступная в сети Интернет. В этой модели использованы цифровые данные по арктическим морям, представленные Международной гидрографической организацией (МГО), батиметрической базой данных рыбопромысловых карт OLEX, норвежской ББД MAREANO¹, EMODnet Bathymetry [25] и оцифрованные данные с российских ЭНК.

¹ <https://www.hydro-international.com/content/news/fugro-maps-arctic-ocean-for-norway-s-mareano-seabed-mappingprogramme>.

4. Ведомственные ББД геологических организаций, включая АО «Росгео», МАГЭ, а также научных институтов РАН.

5. Ведомственные ББД других морских организаций, включая рыбохозяйственные: НИИ Всероссийского научно-исследовательского института рыбного хозяйства и океанографии» (ВНИРО) и его филиалов в первую очередь ПИНРО.

6. ББД ресурсодобывающих организаций, как частных, так и с участием государственных компаний (например, ПАО РК «Роснефть», ПАО «Газпром» и др.).

В настоящее время суда некоторых научно-исследовательских организаций, осуществляющих морскую деятельность в Арктике, и арендуемые суда оборудованы МЛЭ. В процессе исследований часто выполняются батиметрические съемки при отсутствии их координации. Результаты съемок часто остаются недоступными российскому научному сообществу.

Международный опыт показывает, что детальные батиметрические исследования в настоящее время являются одним из ведущих направлений изучения Мирового океана. Ведутся международные батиметрические программы: GEBCO Seabed 2030 [26], EMODnet Bathymetry [25] и ряд региональных проектов по детальному изучению топографии дна. В частности, батиметрический проект EMODnet Bathymetry, выполняемый под эгидой Европейского союза, предусматривает свободный доступ к детальным батиметрическим данным по европейским водам. В этом проекте акватории побережий северной Европы, а также западной части Баренцева моря до меридиана 42° восточной долготы покрыты батиметрической съемкой, на основе которой создана регулярная сетка глубин с размерностью ячейки 115 м. Таким образом, значительная часть Баренцева моря представлена батиметрической моделью, доступной в сети Интернет, полностью совпадающей с IBCAO v. 4 [19], но в ряде районов заметно отличающейся от имеющихся российских данных. Данный вопрос требует дальнейшего изучения и анализа на основе сравнения с отечественной ББД по Баренцеву морю. Подробную информацию по изученности рельефа дна Мирового океана и доступным источникам информации можно найти в работе [26].

Последние три десятилетия отмечены беспрецедентным развитием геоинформационных технологий и в том числе технологий съемки рельефа дна. Современная морская деятельность ставит задачи получения карт рельефа дна с точностями, сопоставимыми с таковыми для рельефа суши. Имеющиеся гидрографические технологии позволяют это обеспечить. Основу их составляют: высокоточное спутниковое позиционирование, гидроакустические средства площадной съемки рельефа и верхней части разреза осадочной толщи, а также реализуемое в электронных гидрографических информационных системах (ЭГИС) специализированное гидрографическое программное обеспечение [10], [27], без которого невозможно проведение гидрографических исследований. По сути, современные гидроакустические и информационные технологии позволяют открыть новое направление в изучении морского дна, способное формировать и представлять ценную информацию для морских геологов, геофизиков и экологов. Например, одним из актуальных направлений морских исследований является поиск донных газовых эманаций, включая выходы газогидратов с применением МЛЭ, что приобретает особую актуальность в связи с потеплением в Арктике [10], [28]–[30]. Большинство российских НИС уже оснащены МЛЭ, но технологические и информационные возможности гидроакустических средств используются в недостаточной мере, — сказывается отсутствие координации и комплексирования проводимых работ. Так, в Госкорпорации «Росатом» выполняется только батиметрическая съемка без сопутствующих геофизических работ и изучения объектов в водной толще (газовых эманаций).

НИС государственных геолого-разведочных предприятий, входящих в АО «Росгео», регулярно выполняют морские сейсмические съемки в арктических морях с попутным измерением глубин, используя однолучевые эхолоты (ОЛЭ). Однако промер не входит в перечень выполняемых работ и, как правило, не сопровождается необходимыми измерениями ВРСЗ. Отчеты по рейсам не содержат информации о качестве промера и контрольных галсах, а также скорости звука, установленной в ОЛЭ. В результате полученные глубины не могут быть надлежащим образом обработаны и использованы для составления карт в ЦКП ВМФ МО РФ. Подразделения ПАО «НК «Роснефть»,

планирующие в настоящее время масштабные геофизические работы в восточных морях Арктики на специализированных НИС, оборудованных МЛЭ, не предусматривают в своих программах работ комплексную гидроакустическую съемку дна [31]. Положительным примером являются морские научные исследования Геологического института (ГИН) РАН на НИС «Академик Николай Страхов», регулярно выполняемые в арктических морях с использованием МЛЭ [32].

Одним из препятствий для выполнения эффективной батиметрической съемки является также отсутствие современного национального стандарта. Технологическая «революция» в гидрографии, связанная с переходом от аналоговых к цифровым и компьютерным технологиям, вызвала необходимость создания новых норм и правил выполнения съемки рельефа, которые были выдвинуты в трех последних стандартах Международной гидрографической организации (МГО). Текущей является шестая (2020 г.) редакция Стандарта МГО [33]. Проект новых Правил гидрографической съемки (ПГС) разработан в ГНИНГИ, однако все еще не утвержден УНиО. Навигационно-гидрографическое и геодезическое обеспечение морских геолого-разведочных работ включало решение ряда специальных задач, нормированных в устаревшей Инструкции ИНГГО-86 [34]. В новом варианте Инструкции по топографо-геодезическому и навигационному обеспечению геолого-разведочных работ [35] раздел по нормированию батиметрической съемки отсутствует.

Следует отметить, что в конце XX в. инженерно-гидрографические работы неправомерно были включены в состав инженерно-геодезических работ. Необходимость детальной съемки подводного рельефа для эффективной эксплуатации морских ресурсов углеводородов уделяется недостаточное внимание. Эти вопросы подробно рассмотрены в работе [36]. Зарубежные опыт свидетельствует об актуальности площадной съемки рельефа для эксплуатации морских ресурсов. Это отражено в Руководстве Международной организации морских подрядчиков [37], используемом российскими организациями, работающими в данной сфере морской деятельности.

Обсуждение (Discussion)

Выполненный обзор современного состояния батиметрических исследований Северного Ледовитого океана показывает, что несмотря на большой объем проведенных работ, в том числе с применением современных средств и методик, имеющиеся данные и карты обеспечивают решение лишь части задач и на ограниченных площадях. Для обеспечения крупных региональных проектов необходимо создание картографической основы, охватывающей с единых позиций всю зону интересов Российской Федерации в Северном Ледовитом океане как на шельфе, так и в Арктическом бассейне. Решение задач Арктического региона требует создания *единого массива батиметрических данных* с включением в него ББД различных организаций. Отсутствие должной координации морских исследований между различными ведомствами сдерживает создание единого источника современных батиметрических данных.

Организацией, ответственной за картографирование рельефа морского дна в России, является ФКУ ЦКП ВМФ МО РФ. Однако не существует положения, согласно которому все собранные батиметрические материалы должны передаваться в ФКУ 280 ЦКП. Разрешение на проведение научно-исследовательских работ в исключительной экономической зоне РФ выдает Министерство науки высшего образования. При этом в таком разрешении не всегда учитывается необходимость предоставления батиметрической информации, получаемой на основе результатов работ в исключительной экономической зоне РФ в едином центре, которым, несомненно, должно являться ЦКП ВМФ РФ.

Батиметрические исследования в ЦАБ, проводимые в интересах определения ВГКШ в Арктике, являются наглядным подтверждением необходимости введения данного положения. Материалы батиметрических съемок, полученные на НЭС «Академик Федоров» (2010, 2011, 2014, 2019, 2020 гг.), переданы в ФКУ 280 ЦКП ВМФ РФ и приняты для дополнения ББД, корректуры НМК и составления электронных батиметрических карт (ЭБК) масштаба 1:500 000 районов сопряжения хребта Ломоносова и поднятия Менделеева с шельфом моря Лаптевых и Восточно-Сибирского моря [20], [21]. Наличие этих ЭБК во многом способствовало успешной защите «Пересмотренного частичного представления РФ на расширенный континентальный шельф в СЛО» [1] и получению положитель-

ного решения комиссий по границам континентального шельфа в феврале 2023 г. [38]. На основе материалов съемок 2019–2020 гг. составлены ЭБК масштаба 1: 500 000 восточных районов хребта Гаккеля. Следует отметить, что юго-восточная часть хребта Гаккеля, включая район долины Садко и склон шельфа моря Лаптевых, до сих пор изучены недостаточно, несмотря на результаты батиметрической съемки, выполненные в этом районе в 2022 г. Подготовка ЭБК масштаба 1:500 000 в ЦАП является новым направлением в работе ЦКП ВМФ, которое теперь выполняется с применением российского программного обеспечения и особой методикой анализа батиметрических данных с их геоморфологической интерпретацией.

Батиметрические карты, являясь связными моделями поверхности дна, представляют лишь первый слой информации о рельефе. На современном уровне недостаточно знать географические координаты и глубину, на которой расположен тот или иной объект, необходимо иметь представление об элементе поверхности дна, где находится объект, о свойствах этого элемента, его границах и положении как относительно других элементов, так и относительно всей системы, в которую он входит. Для получения подобной информации требуется дополняющая батиметрическую карту и основанная на ней *дискретная модель* с вычленением отдельных элементов. Такой моделью является *геоморфологическая карта*, составленная по аналитическому системно-морфологическому принципу [39]. На этой карте представлена вся совокупность элементов, составляющих поверхность дна в их естественных границах. Тип исходных материалов и используемая методика делают выполненные геоморфологические построения базового уровня независимыми от субъективных представлений составителей карт. Данное обстоятельство представляется крайне важным ввиду заинтересованности многих специалистов в карте, основанной на объективных морфологических критериях. В частности, такая карта необходима для убедительной интерполяции и экстраполяции разрозненных геолого-геофизических данных, которые прямо или опосредованно связаны с особенностями рельефа.

Выявленное в ходе морфологического анализа строение поверхности дна позволяет обоснованно *оконтуривать* орографические формы и характеризовать их границы. Имеющийся опыт геологических и геоэкологических исследований в СЛО и его морях свидетельствует о том, что комплексирование батиметрической и геоморфологической карт раскрывает новые возможности для интерпретации данных. Обсуждение морских геоморфологических карт выходит за рамки данной статьи. Для решения указанных задач на первом этапе достаточно геоморфологических карт, составленных по аналитическому системно-морфологическому принципу, характеризующих только морфологию рельефа.

Рассматривая картографическое обеспечение современных задач, решаемых в арктических морях, необходимо особо остановиться на батиметрических исследованиях для обеспечения высокоширотной трассы СМП в Восточно-Сибирском море, актуальной в связи с появлением СПГ-танкеров типа Yamalmax. Такие суда имеют ледовый класс «Arc7». СПГ-танкер «Кристоф де Маржери» — первое в истории крупнотоннажное грузовое судно, преодолевшее в мае 2020 г. новую высокоширотную трассу СМП в восточном направлении. Рамки НМК масштаба 1:500 000 [40] и приблизительная линия использованной высокоширотной трассы (жирная линия) от острова Жохова показаны на рис. 6.

В январе 2021 г. группа компаний (ГК) «СКАНЭКС» приняла участие в информационном обеспечении СПГ-танкера «Кристоф де Маржери» ПАО «Современный коммерческий флот» («ПАО «Совкомфлот») при выполнении им транзитного перехода по трассе СМП в период зимней ледовой навигации. Важной отличительной особенностью этого перехода было отсутствие ледокольного сопровождения на всем пути следования. Маршрут перехода, использованный в период зимней навигации, показан на карте-схеме (рис. 7), размещенной на морском портале Scanex Maritime [41].

Программное обеспечение в рамках общей платформы Scanex Maritime предлагает своим пользователям сервисы мониторинга движения судов и условий ледовой обстановки. За зимний навигационный сезон 2019–2020 гг. при обновлении морских сервисов был внедрен новый функ-

ционал. В части новых источников данных для мониторинга ледовой обстановки подключены карты *ре-анализа* спутниковых данных CryoSat-2 для мониторинга толщины ледового покрова, внедрены результаты прогноза толщины льда по материалам модели ESRL NOAA на десять суток вперед. Для мониторинга судов создан новый сервис с целью формирования маршрута движения и выгрузки в Электронную картографическую навигационно-информационную систему (ЭКНИС) судов. Это позволяет использовать архивный маршрут любого другого судна в качестве основного при планировании движения. Обновлено сервисы мониторинга движения судов по данным АИС и экспорта дополнительных форматов космических снимков для непосредственного просмотра в ЭКНИС «ТРАНЗАС» [41].

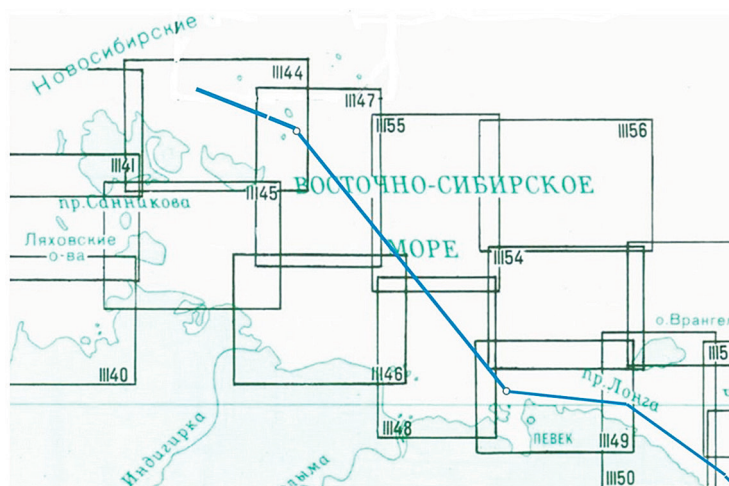


Рис. 6. Новая высокоширотная трасса СМП в Восточно-Сибирском море и рамки НМК

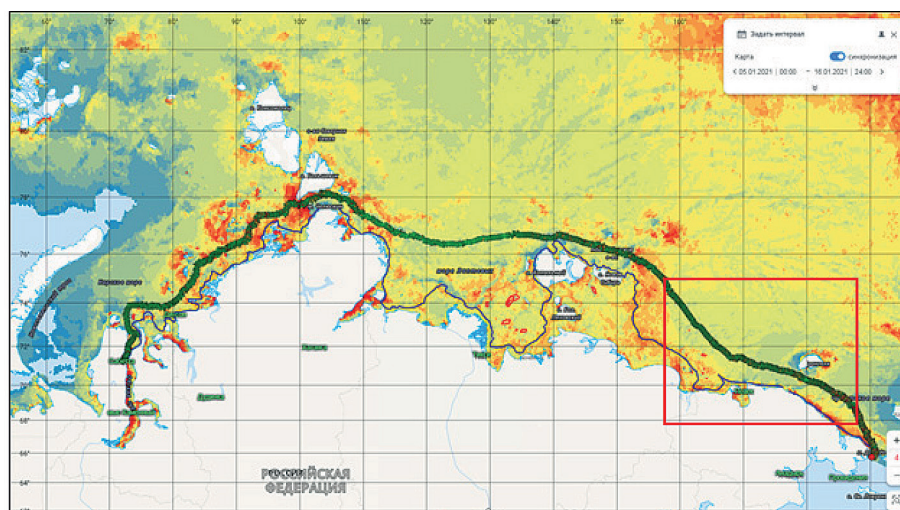


Рис. 7. Маршрут СПГ-газовоза «Кристоф де Маржери», проложенный в январе 2021 г.

Информационное обеспечение высокоширотной трассы СМП в Восточно-Сибирском море успешно развивается, однако гидрографическое и картографическое обеспечение существенно отстает. Остановимся на этом вопросе более подробно. Предлагаемая высокоширотная трасса СМП в Восточно-Сибирском море проходит по НМК с адмиралтейскими номерами 11147, 11155, и 11148. Анализ гидрографической изученности, представленной на НМК 11147 (изд. 1996), 11155 (изд. 1993) и 11148 (изд. 1994 г.), показывает, что существенная часть высокоширотной трассы СМП в Восточно-Сибирском море проходит по районам с недопустимо низкой гидрографической изученностью,

полученной по результатам маршрутного промера. На НМК 11155 основную площадь занимает «белое пятно» с несколькими галсами маршрутного промера, а НМК более крупных масштабов для этой высокоширотной трассы отсутствуют [40]. На указанных НМК высокоширотная трасса СМП в Восточно-Сибирском море не нанесена, и использование этих карт для навигации затруднено.

В последнее десятилетие ГП Государственной корпорации по атомной энергии «Росатом» проводило гидрографические работы в районах к северу и востоку от Новосибирских островов (см. рис. 3). Результаты работ, начиная с 2020 г., представляются в ЦКП ВМФ. На основе этих данных ГП «Росатом» подготовлены цифровые справочно-информационные наборы [11], положение рамок крупномасштабных планшетов которых показано на рис. 3. Однако официальные ЭНК РФ масштаба 1 : 200 000 пока не подготовлены и отсутствуют в Каталоге МГО [42]. Рамки официальных ЭНК масштабов 1 : 180 000 и 1 : 700 000 Восточно-Сибирского моря для района от Новосибирских островов до острова Врангеля, представленные в каталоге ЭНК МГО [42], и линия высокоширотной трассы от острова Жохова показаны на рис. 8.

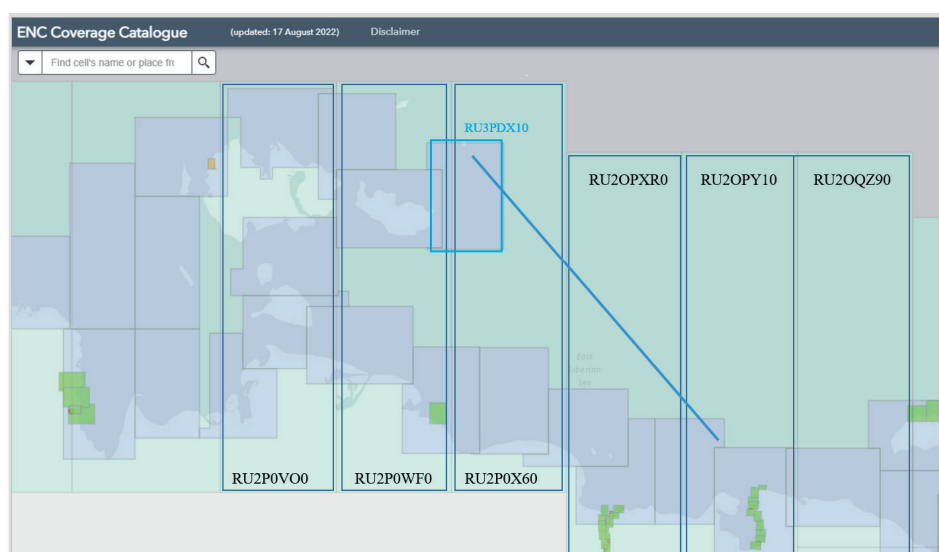


Рис. 8. Рамки официальных ЭНК РФ для района к северу и востоку от Новосибирских островов

На рис. 8 выделены номера и рамки официальных ЭНК масштабов 1 : 700 000 и только одна ЭНК масштаба 1 : 180 000. Высокоширотная трасса в Восточно-Сибирском море проходит по глубинами 25–35 м и имеет ширину 2 км. Необходимо отметить, что в 2021 г. СПГ-газовоз «Кристоф де Маржери» выбрал для перехода в Восточно-Сибирском море более северную трассу с глубинами 35–45 м (см. рис. 7).

Вопросы выбора оптимального положения новых высокоширотных трасс требуют дополнительного изучения и обоснования. Задачу выполнения гидрографических работ усложняет наличие по трассе практически круглогодичного ледового покрытия (край «айонского ледового массива»). Последние сведения по состоянию «айонского ледового массива» свидетельствуют о возможности проведения работ в его западной части в летне-осенний период [43]. В работах [14], [44] и ряде других публикаций обсуждаются варианты положения трассы СМП в Восточно-Сибирском море для навигации СПГ-танкеров. Для эффективной круглогодичной навигации СПГ-танкеров типа Yamalmax в ближайшие годы предстоит продолжить гидрографические работы по новой высокоширотной трассе СМП в Восточно-Сибирском море, а также выполнить издание официальных путевых ЭНК по обследованной высокоширотной трассе шириной 2 км.

Учитывая предполагаемый в будущем международный статус СМП, гидрографическая съемка по вновь выбранной трассе должна выполняться с учетом требований МГО для особой «0» либо «1А» категории [33], но этот вопрос требует дополнительного изучения. Ценные рекомендации

повышения эффективности съемки рельефа дна в районах слабой гидрографической изученности с использованием МЛЭ даны в работе [45]. Другим источником информации о рельефе дна новой высокоширотной трассы СМП в Восточно-Сибирском море могут служить результаты морских геофизических работ, которые были выполнены здесь в последние годы, например [46].

Начиная с 2023 г. АО «Росгео» планирует проведение ежегодных геофизических работ в Восточно-Сибирском море с использованием ОЛЭ. Батиметрические съемки, выполняемые в процессе геофизических работ, необходимо проводить по единой методике, а данные использовать для пополнения отечественной ББД на арктические моря. Возможность использования таких данных лишней раз подчеркивает необходимость повышения статуса ЦКП ВМФ как единого национального центра, в который должны поступать результаты всех батиметрических съемок, выполняемых самыми различными организациями вне зависимости от их ведомственной принадлежности. На сегодняшний день от гидрографического и картографического обеспечения высокоширотной трассы СМП в Восточно-Сибирском море во многом зависят сроки осуществления круглогодичной навигации СПГ-газовозов, которые ранее были отложены до 2023–2024 гг.

Актуальной задачей является подготовка новых редакций Руководства для сквозного плавания судов по Северному морскому пути [47], а также Правил плавания по трассе СМП [48]. В этих документах следует учесть современные условия навигации на СМП, связанные с появлением СПГ-газовозов, а также гидрографическое и картографическое обеспечение высокоширотных трасс в море Лаптевых и Восточно-Сибирском море. В последней редакции Правил [48] вопросы картографического обеспечения не упоминаются. В соответствии с Постановлением Правительства № 1599 от 29.12.2014 [49] картографическое обеспечение трасс СМП поручалось Министерству транспорта (Агентство морского и речного флота), однако затем Постановлением Правительства № 1418 от 21.12.2016 [50] оно было возвращено Министерству обороны (УНиО). В ближайшие годы предстоит большая работа для преобразования СМП в круглогодичную транспортную магистраль, обеспечивающую связи России с дальневосточным и тихоокеанским регионом. Преобразование СМП в международную круглогодичную транспортную магистраль потребует не одно десятилетие. Для скорейшего решения проблем СМП Правительство РФ в августе 2022 г. создано Главное управления Северного морского пути в составе корпорации «Росатом». Задачи гидрографического и картографического обеспечения высокоширотных трасс должны явиться одним из приоритетных направлений деятельности главного управления СМП.

Выводы (Summary)

Изучение состояния батиметрического и картографического обеспечения для решения актуальных задач Российской Федерации в Арктике позволяет сформулировать следующие выводы:

1. Существующий уровень батиметрической изученности и картографического обеспечения зоны интересов России в Северном Ледовитом океане не в полной мере отвечает уровню решаемых задач.
2. Достигнут значительный прогресс батиметрического изучения ЦАБ для решения проблемы ВГКШ РФ. За последние 15 лет РФ выполнил большой объем маршрутной батиметрической съемки в Арктическом бассейне, позволивший подготовить, представить и успешно защитить Пересмотренное частичное представление Российской Федерации на расширенный континентальный шельф в СЛО.
3. На основе результатов новых батиметрических съемок и оцифрованных ретроспективных данных по СЛО в ФКП ЦКП ВМФ создаются цифровая ББД и ЭБК масштаба 1 : 500000. При этом используется методика геоморфологического анализа рельефа и технология с применением отечественного программного обеспечения. На этой основе во ВНИИОкеангеология выполняется геоморфологический анализ рельефа и создаются геоморфологические карты, поддерживавшие частичные пересмотренные представления РФ на ВГКШ в СЛО.
4. Гидрографическое изучение окраинных морей СЛО по всей трассе СМП, приостановленное в 90-е гг. XX в., возобновлено с 2011 г. на новой технологической основе и успешно продолжается. Одной из главных задач гидрографического изучения трассы СМП на ближайшие годы следует

полагать съемку новых высокоширотных маршрутов от острова Жохова до пролива Лонга. Методику такой съемки предстоит разработать с использованием всей доступной информации по батиметрии юго-западной части Восточно-Сибирского моря с применением геоморфологического анализа рельефа.

5. На основе подготовленных в ГП цифровых справочно-информационных наборов в ЦКП ВМФ необходимо подготовить официальные ЭНК РФ по высокоширотной трассе в Восточно-Сибирском море, что может быть реализовано в ближайшие два-три года.

6. В соответствии с Законом «О геодезии, картографии и пространственных данных» (2015 г.) Росреестр Минэкономразвития РФ прекратил работы на акваториях. Созданные ранее МТК шельфа и внутренних водных путей, собранные в фондах Росреестра, не используются и их целесообразно ввести в оборот, передав заинтересованным ведомствам РФ.

7. В Российской Федерации нет стандартов для выполнения гидрографической съемки, основанной на рекомендациях МГО, учитывающих современные критерии качества и создания цифровых моделей рельефа дна. Это приводит к необходимости составления детального технического задания для выполнения каждой гидрографической съемки, что затрудняет получение качественных результатов.

8. Обеспечение современной картографической базы для деятельности РФ в Арктике требует преодоления ведомственных барьеров и воссоздания государственной структуры с соответствующими задачами, средствами и полномочиями. Задачей такой структуры должно быть формирование современной единой отечественной картографической основы, охватывающей российский шельф и ЦАБ, базирующейся на точных и полных данных о рельефе дна. Такой структурой в современных условиях может быть ЦКП ВМФ МО.

9. Превращение трассы СМП в международный транспортный коридор во многом будет зависеть от реализации современного гидрографического и картографического обеспечения высокоширотных трасс в морях Лаптевых и Восточно-Сибирском и займет, по-видимому, ближайшее десятилетие.

10. Возможности современных гидроакустических и гидрографических информационных технологий на основе данных МЛЭ позволяют по-новому решать вопрос комплексного изучения морского дна. Такие технологии следует использовать на всех НИС и ГС, выполняющих гидрографические работы в Арктике.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Частичное пересмотренное представление Российской Федерации в Комиссию по границам континентального шельфа в отношении континентального шельфа в Северном Ледовитом океане. Резюме. — 2015. — 37 с.
2. Центральный Арктический бассейн. Масштаб 1:2 500 000, по параллели 75 °. Проекция стереографическая. — СПб.: Изд-во ГУНиО МО РФ, 2002. — № 91115.
3. *Фирсов Ю. Г.* Современная батиметрическая съемка северного ледовитого океана в контексте определения внешних границ континентального шельфа в Арктике / Ю. Г. Фирсов // Вестник Государственного университета морского и речного флота имени адмирала С. О. Макарова. — 2016. — № 6 (40). — С. 81–95. DOI: 10.21821/2309-5180-2016-8-6-81-95.
4. Арктический бассейн (геология и морфология) / Ред. В. Д. Каминский. — СПб.: ВНИИОкеангеология, 2017. — 291 с.
5. *Зинченко А. Г.* Геоморфология дна Северного Ледовитого океана в контексте конвенции ООН по морскому праву 1982 г / А. Г. Зинченко, Ю. Г. Фирсов // Вестник Государственного университета морского и речного флота имени адмирала С. О. Макарова. — 2018. — Т. 10. — № 4. — С. 734–751. DOI: 10.21821/2309-5180-2018-10-4-734-751.
6. *Дубинин Е. П.* Рельеф дна Северного Ледовитого океана / Е. П. Дубинин, А. В. Кохан, А. Н. Филаретова // Жизнь Земли. — 2018. — Т. 40. — № 3. — С. 262–282.
7. *Фирсов Ю. Г.* Проблемы наименования равнин и котловин центрально-арктической области подлентий Северного Ледовитого океана / Ю. Г. Фирсов, А. Г. Зинченко // Вестник Государственного университета морского и речного флота имени адмирала С. О. Макарова. — 2019. — Т. 11. — № 2. — С. 315–331. DOI: 10.21821/2309-5180-2019-11-2-315-331.

8. *Фирсов Ю. Г.* Проблемы отображения рельефа дна в российских батиметрических картах Северного Ледовитого океана / Ю. Г. Фирсов // Вестник Государственного университета морского и речного флота имени адмирала С. О. Макарова. — 2019. — Т. 11. — № 5. — С. 880–892. DOI: 10.21821/2309-5180-2019-11-5-880-892.
9. Атлас океанов. Северный Ледовитый океан. — ГУНиО МО СССР, 1980. — 190 с.
10. *Фирсов Ю. Г.* Новый этап батиметрических исследований северных акваторий России на примере Карского моря / Ю. Г. Фирсов, М. В. Иванов, Е. Н. Колосков // Вестник государственного университета морского и речного флота имени адмирала С. О. Макарова. — 2014. — № 6 (28). — С. 115–124.
11. Цифровые справочно-информационные наборы. Сайт Гидрографического предприятия. [Электронный ресурс]. — Режим доступа: https://rosatomport.ru/digital_reference_and_information_sets (дата обращения: 01.12.2022).
12. *Афонин А. Б.* Концепция развития судоходных трасс акватории Северного морского пути / А. Б. Афонин, А. Л. Тезиков // Вестник Государственного университета морского и речного флота имени адмирала С. О. Макарова. — 2017. — Т. 9. — № 1. — С. 81–87. DOI: 10.21821/2309-5180-2017-9-1-81-87.
13. *Ольховик Е. О.* Обоснование плана проведения площадного обследования высокоширотных маршрутов / Е. О. Ольховик, А. Б. Афонин, А. Л. Тезиков // Вестник Государственного университета морского и речного флота имени адмирала С. О. Макарова. — 2019. — Т. 11. — № 2. — С. 296–304. DOI: 10.21821/2309-5180-2019-11-2-296-304.
14. *Андреева Е. В.* Учет влияния гидрографической изученности на безопасность плавания крупнотоннажных судов в акватории Северного морского пути / Е. В. Андреева, К. Я. Исаулова, А. Л. Тезиков // Вестник Государственного университета морского и речного флота имени адмирала С. О. Макарова. — 2019. — Т. 11. — № 5. DOI: 10.21821/2309-5180-2019-11-5-856-866.
15. ГКИНП –11–152–83. Инструкция по созданию топографических карт шельфа и внутренних водоемов. — М.: ЦНИИГАиК, 1985. — 158 с.
16. *Никифоров С. Л.* Цифровые модели рельефа дна и некоторые возможности их морфометрического анализа / С. Л. Никифоров, С. М. Кошель, Н. О. Сорохтин, Н. Е. Козлов // Вестник МГТУ. Труды Мурманского государственного технического университета. — 2015. — Т. 18. — № 2. — С. 287–294.
17. Объяснительная записка к картам Арктического бассейна: Ортографическая карта Арктического бассейна, Рельеф Северного Ледовитого океана. — СПб.: Изд-во ВНИИОкеангеология, 1999. — 38 с.
18. Рельеф дна Северного Ледовитого океана. Масштаб 1:5 000 000, проекция стереографическая. — СПб.: ГУНиО МО, ВНИИОкеангеология, РАН, 1998.
19. *Jakobsson M.* The international bathymetric chart of the Arctic Ocean version 4.0 / M. Jakobsson, L. A. Mayer, C. Bringensparr, C. F. Castro, R. Mohammad, P. Johnson, T. Ketter, D. Accettella, D. Amblas, L. An, J. E. Arndt, M. Canals, J. L. Casamor, N. Chauché, B. Coakley, S. Danielson, M. Demarte, M.-L. Dickson, B. Dorschel, J. A. Dowdeswell, S. Dreutter, A. C. Fremand, D. Gallant, J. K. Hall, L. Hehemann, H. Hodnesdal, J. Hong, R. Ivaldi, E. Kane, I. Klaucke, D. W. Krawczyk, Y. Kristoffersen, B. R. Kuipers, R. Millan, G. Masetti, M. Morlighem, R. Noormets, M. M. Prescott, M. Rebesco, E. Rignot, I. Semiletov, A. J. Tate, P. Travaglini, I. Velicogna, P. Weatherall, W. Weinrebe, J. K. Willis, M. Wood, Yu. Zarayskaya, T. Zhang, M. Zimmermann, and K. B. Zinglersen // Scientific data. — 2020. — Vol. 7. — Is. 1. — Pp. 176. DOI: 10.1038/s41597-020-0520-9.
20. *Фирсов Ю. Г.* Новая батиметрическая база данных российского сектора Арктики в контексте заявки российской федерации на расширенный континентальный шельф в Северном Ледовитом океане / Ю. Г. Фирсов, С. В. Егоров // Геодезия, картография, геоинформатика и кадастры. От идеи до внедрения: сб. материалов II междунар. науч.-практ. конф. — СПб.: Изд-во «Политехника», 2017. — С. 489–492.
21. *Фирсов Ю. Г.* Анализ батиметрической изученности российского сектора Арктического бассейна с использованием геоинформационных технологий / Ю. Г. Фирсов // Геодезия, картография, геоинформатика и кадастр. Наука и образование: сб. материалов Всеросс. науч.-практ. конф. — СПб.: Издательство РГПУ им. А. И. Герцена, 2019. — С. 426–431.
22. *Поселов В. А.* Обоснование юридического шельфа Российской Федерации в Северном Ледовитом океане / В. А. Поселов, В. Д. Каминский, С. М. Жолондз, В. В. Буценко, О. Е. Смирнов, Ю. Г. Фирсов, Ф. Г. Зинченко // Минеральные ресурсы России. Экономика и управление. — 2019. — № 3 (166). — С. 48–54.
23. Экспедиция «Шельф-2019». Сайт ГНИНГИ [Электронный ресурс]. — Режим доступа: <https://www.gningi.ru/index.php/8-novosti/136-news55> (дата обращения: 01.12.2022).
24. Успешное завершение экспедиции «Шельф-2020». Сайт ГНИНГИ [Электронный ресурс]. — Режим доступа: <https://www.gningi.ru/index.php/8-novosti> (дата обращения: 01.12.2022).

25. EMODnet DTM for European sea regions [Электронный ресурс]. — Режим доступа: <https://www.emodnet-bathymetry.eu/data-products> (дата обращения 06.08.2022).
26. Wölfl A. C. Seafloor Mapping—the challenge of a truly global ocean bathymetry / A.-C. Wölfl, H. Snaith, S. Amirebrahimi, C. W. Devey, B. Dorschel, V. Ferrini, V.A.I. Huvenne, M. Jakobsson, J. Jencks, G. Johnston, G. Lamarche, L. Mayer, D. Millar, T. H. Pedersen, K. Picard, A. Reitz, T. Schmitt, M. Visbeck, P. Weatherall, R. Wigley // *Frontiers in Marine Science*. — 2019. — Vol. 6. — Article 283. DOI: 10.3389/fmars.2019.00283.
27. Фирсов Ю. Г. Основные требования к обеспечению качества современной батиметрической (топографической) съемки / Ю. Г. Фирсов // *Вестник государственного университета морского и речного флота имени адмирала С. О. Макарова*. — 2014 — № 3 (25) — С. 171–179.
28. Фирсов Ю. Г. Новые методы пространственной визуализации результатов инженерной батиметрической съемки / Ю. Г. Фирсов, И. В. Кожухов // *Вестник Государственного университета морского и речного флота имени адмирала С. О. Макарова*. — 2014. — № 2 (24). — С. 17–23.
29. Кожухов И. В. Электронная инженерная гидрография и перспективы получения новых данных по морфологии и геоэкологии арктических морей / И. В. Кожухов, Е. Н. Колосков, Ю. Г. Фирсов // *Вестник государственного университета морского и речного флота им. адмирала С. О. Макарова*. — 2015. — № 4 (32). — С. 95–103. DOI: 10.21821/2309-5180-2015-7-1-123-129.
30. Колосков Е. Н. Применение современных гидрографических технологий для изучения рельефа и донного газопроявления в северных морях России / Е. Н. Колосков, Ю. Г. Фирсов // *Вестник государственного университета морского и речного флота имени адмирала С. О. Макарова*. — 2015. — № 3 (31). — С. 54–62. DOI: 10.21821/2309-5180-2015-7-3-54-62.
31. Программа морских геофизических, геохимических и геотехнических работ на лицензионных участках «Северо-Врангелевский-1», «Северо-Врангелевский-2» и «Южно-Чукотский» на 2019–2022 гг. [Электронный ресурс]. — Режим доступа: http://storage.inovaco.ru/media/project_mo_560/34/65/8f/2c/6f/0b/tom-1-tehnicheskaya-chast.pdf (дата обращения: 01.12.2022).
32. Мороз Е. А. Неотектоника и рельеф дна северо-западной окраины Баренцевоморского шельфа и его обрамления: дис... канд. геогр. наук / Евгений Андреевич Мороз; Геол. ин-т РАН. — М., 2017. — 128 с.
33. IHO Standards for Hydrographic Surveys (6th Edition). S-44. — Monaco: International Hydrographic Bureau, 2020. — 43 p.
34. Инструкция по навигационно-гидрографическому и геодезическому обеспечению морских геологоразведочных работ (ИНГГО-86). Министерство Геологии СССР. — М., 1986. — 104 с.
35. Инструкция по топографо-геодезическому и навигационному обеспечению геологоразведочных работ (утв. Министерством природных ресурсов РФ 3 декабря 1996 г.) [Электронный ресурс]. — Режим доступа: <https://meganorm.ru/Data2/1/4293763/4293763666.htm> (дата обращения: 01.12.2022).
36. Горбунов О. Н. Инженерно-гидрографические работы как основа маркшейдерского обеспечения при освоении морских ресурсов / О. Н. Горбунов // *Маркшейдерский вестник*. — 2011. — № 5 (85). — С. 25–28.
37. Guidelines for the use of Multibeam Echosounders for offshore survey. IMCA S-003. — London, UK: International Marine Contractors Association, 2015. — 77 p.
38. Recommendations of the commission on the limits of the continental shelf in regard to the partial revised submission made by the Russian Federation in respect of the arctic ocean on 3 august 2015 with addenda [Электронный ресурс]. — Режим доступа: https://www.un.org/Depts/los/clcs_new/submissions_files/rus01_rev15/2023RusRev1RecSum.pdf (дата обращения: 01.03.2023).
39. Ласточкин А. Н. Системно-морфологическое основание наук о Земле (геотопология, структурная география и общая теория геосистем) / А. Н. Ласточкин. — СПб.: Изд-во НИИХИ, 2002. — 762 с.
40. Каталог карт и книг Северный Ледовитый океан. УНиО МО РФ. Адмиралтейский № 7107. — СПб.: УНиО, 2020. — 79 с.
41. Группа компаний «СКАНЭКС». Морской портал [Электронный ресурс]. — Режим доступа: <https://www.scanex.ru/cloud/maritime/> (дата обращения: 01.12.2022).
42. IHO Online Catalogues [Электронный ресурс]. — Режим доступа: <https://iho.maps.arcgis.com/apps/webappviewer/index.html?id=06d967702c7f4094bbc5b4f8e485b712&mobileBreakPoint=300> (дата обращения: 01.12.2022).
43. Юлин А. В. Сезонная и межгодовая изменчивость ледяных массивов Восточно-Сибирского моря / А. В. Юлин, М. В. Шаратунова, Е. А. Павлова, В. В. Иванов // *Проблемы Арктики и Антарктики*. — 2018. — Т. 64. — № 3 (117). — Рр. 229–240. DOI: 10.30758/0555-2648-2018-64-3-229-240.

44. Исаулова К. Я. Исследование маршрутов движения крупнотоннажных судов в Восточном секторе акватории Северного морского пути / К. Я. Исаулова // Вестник Государственного университета морского и речного флота имени адмирала С. О. Макарова. — 2020. — Т. 12. — № 4. — С. 726–733. DOI: 10.21821/2309-5180-2020-12-4-726-733.

45. Афонин А. Б. Повышения эффективности съемки рельефа дна в акватории Северного морского пути / А. Б. Афонин // Вестник Государственного университета морского и речного флота имени адмирала С. О. Макарова. — 2020. — Т. 12. — № 2. — С. 302–309. DOI: 10.21821/2309-5180-2020-12-2-302-309.

46. Богоявленский В. И. Опасные газонасыщенные объекты на акваториях Мирового Океана: Восточно-Сибирское море / И. И. Богоявленский, А. В. Кишанков, А. Г. Казанин, Г. А. Казанин // Арктика: экология и экономика. — 2022. — Т. 12. — № 2 (46). — С. 158–171. DOI: 10.25283/2223-4594-2022-2-158-171.

47. Руководство для сквозного плавания судов по Северному морскому пути. — СПб.: ГУНИО МО РФ, 1995. — 415 с.

48. Правила плавания в акватории Северного морского пути [Электронный ресурс]. — Режим доступа: http://www.nsra.ru/ru/ofitsialnaya_informatsiya/pravila_plavaniya.html (дата обращения: 01.12.2022).

49. Постановление Правительства Российской Федерации от 29.12.2014 № 1599 «Об осуществлении федеральными органами исполнительной власти отдельных полномочий в целях реализации Федерального закона «О навигационной деятельности» и о внесении изменений в Положение о полномочиях федеральных органов исполнительной власти по поддержанию, развитию и использованию глобальной навигационной спутниковой системы ГЛОНАСС в интересах обеспечения обороны и безопасности государства, социально-экономического развития Российской Федерации и расширения международного сотрудничества, а также в научных целях» [Электронный ресурс]. — Режим доступа: <http://publication.pravo.gov.ru/Document/View/0001201501040025> (дата обращения: 01.12.2022).

50. Постановление Правительства Российской Федерации от 21.12.2016 № 1418 «О внесении изменений в некоторые акты Правительства Российской Федерации» [Электронный ресурс]. — Режим доступа: <http://publication.pravo.gov.ru/Document/View/0001201612260028> (дата обращения: 01.12.2022).

REFERENCES

1. *Chastichnoe peresmotrennoe predstavlenie Rossiiskoi Federatsii v Komissiyu po granitsam kontinental'nogo shel'fa v otnoshenii kontinental'nogo shel'fa Rossiiskoi Federatsii v Severnom Ledovitom okeane*. 2015.

2. *Centralnyy Arkticheskij bassejn. Masshtab 1:2 500 000, po paralleli 75°. Proekcija stereograficheskaja*. SPb.: GUNiO MO RF, 2002. № 91115.

3. Firsov, Yury Georgievich. “Modern bathymetric survey in the Arctic ocean in the context of the extended continental shelf determination in Arctic.” *Vestnik Gosudarstvennogo universiteta morskogo i rechnogo flota imeni admirala S. O. Makarova* 6(40) (2016): 81–95. DOI: 10.21821/2309-5180-2016-8-6-81-95.

4. Kaminskij, V. D., ed. *Arkticheskij bassejn (geologiya i morfologiya)*. SPb.: VNIIOkeangeologiya, 2017.

5. Zinchenko, Anna G., and Yury G. Firsov. “Geomorphology of the Arctic ocean in the context of The United Nations Convension on the law of the sea 1982.” *Vestnik Gosudarstvennogo universiteta morskogo i rechnogo flota imeni admirala S. O. Makarova* 10.4 (2018): 734–751. DOI: 10.21821/2309-5180-2018-10-4-734-751.

6. Dubinin, E. P., A. V. Kokhan, and A. N. Filaretova. “Bottom relief of the arctic ocean.” *The Life of the Earth* 40.3 (2018): 262–282.

7. Firsov, Yury G., and Anna G. Zinchenko. “The problems of naming the plains and basins of the Central Arctic area of rises of the Arctic Ocean.” *Vestnik Gosudarstvennogo universiteta morskogo i rechnogo flota imeni admirala S. O. Makarova* 11.2 (2019): 315–331. DOI: 10.21821/2309-5180-2019-11-2-315-331.

8. Firsov, Yury G. “Seabed relief mapping problems on the Russian bathymetric chart of the Arctic Ocean.” *Vestnik Gosudarstvennogo universiteta morskogo i rechnogo flota imeni admirala S. O. Makarova* 11.5 (2019): 880–892. DOI: 10.21821/2309-5180-2019-11-5-880-892.

9. *Atlas okeanov. Severnyi Ledovityi okean*. GUNiO MO SSSR, 1980.

10. Firsov, Yu. G., M. V. Ivanov, and E. N. Koloskov. “The new stage of the Russian northern basins bathymetric investigations — Kara sea example.” *Vestnik Gosudarstvennogo universiteta morskogo i rechnogo flota imeni admirala S. O. Makarova* 6(28) (2014): 115–124.

11. Sifrovie spravочно-informacionnie nabori. Web. 1 Dec. 2022 <https://rosatomport.ru/digital_reference_and_information_sets>.

12. Afonin, Andrej B., and Aleksandr L. Tezikov. "The concept of development of shipping routes along the northern sea route." *Vestnik Gosudarstvennogo universiteta morskogo i rechnogo flota imeni admirala S. O. Makarova* 9.1 (2017): 81–87. DOI: 10.21821/2309-5180-2017-9-1-81-87.
13. Olhovik, Evgeniy O., Andrej B. Afonin, and Aleksandr L. Tezikov. "A planning rationale for conducting the areal surveys of high-latitude routes." *Vestnik Gosudarstvennogo universiteta morskogo i rechnogo flota imeni admirala S. O. Makarova* 11.2 (2019): 296–304. DOI: 10.21821/2309-5180-2019-11-2-296-304.
14. Andreeva, Ekaterina V., Kristina Y. Esaulova, and Aleksandr L. Tezikov. "Accounting the impact of hydrographic studies on the safety of navigation of large-tonnage vessels in the Northern Sea Route water area." *Vestnik Gosudarstvennogo universiteta morskogo i rechnogo flota imeni admirala S. O. Makarova* 11.5 (2019): DOI: 10.21821/2309-5180-2019-11-5-856-866.
15. GKNP–11–152–83. Instruksiya po sozdaniyu topograficheskikh kart shel'fa i vnutrennikh vodoemov. M.: TsNIIGAiK, 1985.
16. Nikiforov, S. L., S. M. Koshel, N. O. Sorokhtin, and N. E. Kozlov. "Seabed digital elevation models and some possibilities of their morphometric analysis." *Vestnik of MSTU* 18.2 (2015): 287–294.
17. Ob'yasnitel'naya zapiska k kartam Arkticheskogo bassejna: Orograficheskaya karta Arkticheskogo bassejna, Rel'ef Severnogo Ledovitogo okeana. SPb.: Izd-vo VNIIOkeangeologiya, 1999.
18. Rel'ef dna Severnogo Ledovitogo okeana. Masshtab 1:5 000 000, proekciya stereograficheskaya. SPb.: GUNiO MO, VNIIOkeangeologiya, RAN, 1998.
19. Jakobsson, Martin, Larry A. Mayer, Caroline Bringensparr, Carlos F. Castro, Rezwan Mohammad, Paul Johnson, Tomer Ketter, Daniela Accettella, David Amblas, Lu An, Jan Erik Arndt, Miquel Canals, José Luis Casamor, Nolwenn Chauché, Bernard Coakley, Seth Danielson, Maurizio Demarte, Mary-Lynn Dickson, Boris Dorschel, Julian A. Dowdeswell, Simon Dreutter, Alice C. Fremand, Dana Gallant, John K. Hall, Laura Hehemann, Hanne Hodnesdal, Jongkuk Hong, Roberta Ivaldi, Emily Kane, Ingo Klaucke, Diana W. Krawczyk, Yngve Kristoffersen, Boele R. Kuipers, Romain Millan, Giuseppe Masetti, Mathieu Morlighem, Riko Noormets, Megan M. Prescott, Michele Rebesco, Eric Rignot, Igor Semiletov, Alex J. Tate, Paola Travaglini, Isabella Velicogna, Pauline Weatherall, Wilhelm Weinrebe, Joshua K. Willis, Michael Wood, Yulia Zarayskaya, Tao Zhang, Mark Zimmermann, and Karl B. Zinglersen. "The international bathymetric chart of the Arctic Ocean version 4.0." *Scientific data* 7.1 (2020): 176. DOI: 10.1038/s41597-020-0520-9.
20. Firsov, Y., and S. Egorov. "The new bathymetric data base of the Russian arctic sector in the context of the Russian Federation revised submission in respect of the extended continental shelf in the Arctic ocean." *Geodeziya, kartografiya, geoinformatika i kadastry. Ot idei do vnedreniya: sbornik materialov II mezhdunarodnoi nauchno-prakticheskoi konferentsii*. SPb.: Izdatel'stvo "Politekhnik", 2017. 489–492.
21. Firsov, Yu.G. "Analysis of the arctic basin bathymetry inside the russian sector, using the information technologies." *Geodeziya, kartografiya, geoinformatika i kadastr. Nauka i obrazovanie. Sbornik materialov Vserossiiskoi nauchno-prakticheskoi konferentsii*. SPb.: Izdatel'stvo RGPU im. A. I. Gertsena, 2019. 426–431.
22. Poselov, V. A., V. D. Kaminsky, S. M. Zholondz, V. V. Butsenko, O. E. Smirnov, Yu. G. Firsov, and A. G. Zinchenko. "Proof of the legal shelf of the Russian Federation in the Arctic Ocean." *Mineral resources of Russia. Economics and management* 3(166) (2019): 48–54.
23. Ikspedisia "Shelf-2019". Web. 1 Dec. 2022 <<https://www.gningi.ru/index.php/8-novosti/136-news55>>.
24. Uspeshnoe zavershenie Ikspedisia "Shelf-2019". Web. 1 Dec. 2022 <<https://www.gningi.ru/index.php/8-novosti>>.
25. EMODnet DTM for European sea regions. Web. 6 Aug. 2022 <<https://www.emodnet-bathymetry.eu/data-products>>.
26. Wölfl, Anne-Cathrin, Helen Snaith, Sam Amirebrahimi, Colin W. Devey, Boris Dorschel, Vicki Ferrini, Veerle A. I. Huvenne, Martin Jakobsson, Jennifer Jencks, Gordon Johnston, Geoffroy Lamarche, Larry Mayer, David Millar, Terje Haga Pedersen, Kim Picard, Anja Reitz, Thierry Schmitt, Martin Visbeck, Pauline Weatherall, and Rochelle Wigley. "Seafloor Mapping—the challenge of a truly global ocean bathymetry." *Frontiers in Marine Science* 6 (2019). Article 283. DOI: 10.3389/fmars.2019.00283.
27. Firsov, Yu. G. "The main requirements for the bathymetric (topographic) surveying quality control." *Vestnik Gosudarstvennogo universiteta morskogo i rechnogo flota imeni admirala S. O. Makarova* 3(25) (2014): 171–179.
28. Firsov, Yu. G., and I. V. Kozhukhov. "The new three dimensional visualization techniques for bathymetric engineering survey." *Vestnik Gosudarstvennogo universiteta morskogo i rechnogo flota imeni admirala S. O. Makarova* 2(24) (2014): 17–23. DOI: 10.21821/2309-5180-2014-6-2-17-23.

50. Postanovlenie Pravitelstva Rossiskoi Federazii ot 21.12.2014 № 11418 “O vnesenii izmenenii v nekotorii akti Pravitelstva Rossiskoi Federazii”. Web. 1 Dec. 2022 <<http://publication.pravo.gov.ru/Document/View/0001201612260028>>.

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

Фирсов Юрий Георгиевич —
кандидат технических наук, доцент
ФГБОУ ВО «ГУМРФ имени адмирала
С. О. Макарова»
198035, Российская Федерация, Санкт-Петербург,
ул. Двинская, 5/7
e-mail: gidrograph@mail.ru, kaf_gm@gumrf.ru
Зинченко Анна Георгиевна —
старший научный сотрудник
ФГБУ «ВНИИОкеангеология»
190121, Российская Федерация, Санкт-Петербург,
Английский пр., 1
e-mail: anna_zinchenko@mail.ru

INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Firsov, Yury G. —
PhD, associate professor
Admiral Makarov State University of Maritime
and Inland Shipping
5/7 Dvinskaya Str., St. Petersburg 198035,
Russian Federation
e-mail: gidrograph@mail.ru, kaf_gm@gumrf.ru
Zinchenko, Anna G. —
Senior Researcher
FSBI “VNIIOkeangeologia”
1 Anglisky Ave., St. Petersburg, 190121,
Russian Federation
e-mail: anna_zinchenko@mail.ru

*Статья поступила в редакцию 18 января 2023 г.
Received: January 18, 2023.*

DOI: 10.21821/2309-5180-2023-15-2-247-261

THE CURRENT STATE AND POSSIBLE PROSPECTS FOR USING LIQUEFIED NATURAL GAS TANK CONTAINERS

N. V. Kuptsov¹, A. V. Lill²

¹ — Gazpromneft Science & Technology Center, St. Petersburg, Russian Federation

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

One of the ways to reduce emissions of harmful substances into the environment is considered in the paper. This way is connected with the transition from liquid and solid hydrocarbon fuels to liquefied natural gas, which is one of the reasons for the increase in gas fuel consumption with the observed growth in the last decade for its transportation in liquefied form in tank containers. The main countries owning tank containers are the USA, Germany and the UK. It is noted that tank containers are used for transportation and storage of liquefied gas in small volumes for end users; this method of transportation is mobile, since sea, rail and automobile transport can be used for this; storage of liquefied gas in tank containers does not require the construction of additional infrastructure. Further prospects of tank containers for liquefied natural gas are considered. The possibility of supplying gas by tank containers, especially for autonomous remote settlements and regions of the Russian Federation with a low population density, while in these regions the population needs gas for heating residential buildings, is discussed. The use of tank containers, due to its advantages, may have the potential for use in the Russian Federation. Thus, within the framework of the review study, the issues of the current state and prospects for the use of tank containers for LNG transportation are considered in detail. It is noted that the mobility and flexibility of transportation ensures storage without additional refrigeration systems for about three months, including that LNG tank containers are used for gas supply to sparsely populated and hard-to-reach points without connection to main gas pipelines, satisfaction of short-term peak gas consumption in winter, and use of gas as motor fuel for the various types of transport.

Keywords: LNG container tank, sea transport, containerization, LNG, gas supply, gas supplies.

For citation:

Kuptsov, Nikolay V., and Artem V. Lill. "The current state and possible prospects for using liquefied natural gas tank containers." *Vestnik Gosudarstvennogo universiteta morskogo i rechnogo flota imeni admirala S. O. Makarova* 15.2 (2023): 247–261. DOI: 10.21821/2309-5180-2023-15-2-247-261.

СОВРЕМЕННОЕ СОСТОЯНИЕ И ВОЗМОЖНЫЕ ПЕРСПЕКТИВЫ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ ТАНК-КОНТЕЙНЕРОВ СЖИЖЕННОГО ПРИРОДНОГО ГАЗА

Н. В. Купцов¹, А. В. Лилль²

¹ — ООО "Газпромнефть НТЦ", Санкт-Петербург, Российская Федерация

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

Рассмотрен один из способов сокращения выбросов вредных веществ в окружающую среду: переход с жидких и твердых видов углеводородного топлива на сжиженный природный газ, являющийся одной из причин увеличения потребления газового топлива при наблюдающемся увеличении в последнее десятилетие темпов его перевозки в сжиженном виде в танк-контейнерах. Основными странами — владельцами танк-контейнеров являются США, Германия и Великобритания. В работе отмечается, что танк-контейнеры используются для перевозки и хранения сжиженного газа в малых объемах для конечных потребителей; данный способ перевозки является мобильным, так как для этого может использоваться морской, железнодорожный и автомобильный транспорт; хранение сжиженного газа в танк-контейнерах не требует строительства дополнительной инфраструктуры. Рассмотрены дальнейшие перспективы танк-контейнеров для сжиженного природного газа. Обсуждается возможность поставки газа танк-контейнерами в особенности для автономных отдаленных населенных пунктов и регионов Российской Федерации с малой плотностью населения, при этом в данных регионах требуется проведение газа населению для отопления жилых домов. Использование

танк-контейнеров в силу своих преимуществ имеет потенциал для развития в Российской Федерации. Таким образом, в рамках обзорного исследования подробно рассмотрены вопросы современного состояния и перспектив использования танк-контейнеров для перевозки СПГ. Отмечается, что мобильность и гибкость перевозок обеспечивает хранение без дополнительных рефрижераторных систем порядка трех месяцев, в том числе поэтому танк-контейнеры СПГ используют для газоснабжения малонаселенных и труднодоступных пунктов без подключения к магистральным газопроводам, удовлетворения краткосрочного пикового потребления газа в зимний период, использования газа в качестве моторного топлива для различных видов транспорта.

Ключевые слова: танк-контейнер СПГ, морской транспорт, контейнеризация, СПГ, газоснабжение, поставки газа

Для цитирования:

Купцов Н. В. Современное состояние и возможные перспективы использования танк-контейнеров сжиженного природного газа / Н. В. Купцов, А. В. Лилль // Вестник Государственного университета морского и речного флота имени адмирала С. О. Макарова. — 2023. — Т. 15. — № 2. — С. 247–261. DOI: 10.21821/2309-5180-2023-15-2-247-261.

Введение (Introduction)

Начиная с 2000 г. газ является одним из основных источников энергии, занимая в мире третье место по потреблению. По данным BP Statistical review of World Energy 2022 [1], объемы потребления энергоносителей в 2021 г. (возобновляемая энергия, атом, вода, газ, уголь, нефть) составили (рис. 1, а): нефть 184 эксаДж¹, уголь 160 эксаДж, газа 145 эксаДж. При этом среди ископаемых видов топлива природный газ имеет наибольший коэффициент полезного использования топлива 99,7–99,8 % [2], оказывая минимальное воздействие на экологию при энергогенерации (антропогенные выбросы при сжигании природного газа в 1,7 раза меньше угля и в 1,4 раза меньше нефти) [3]. Эти факты, а также возможность транспортировки газа на дальние расстояния по трубопроводам в сжатом виде подтверждают возрастающий на него спрос. Являясь одним из основных энергоносителей — по прогнозам компании BP [4], к 2035 г. газ имеет потенциал опережения угольной генерации по объемам потребления (рис. 1, б).

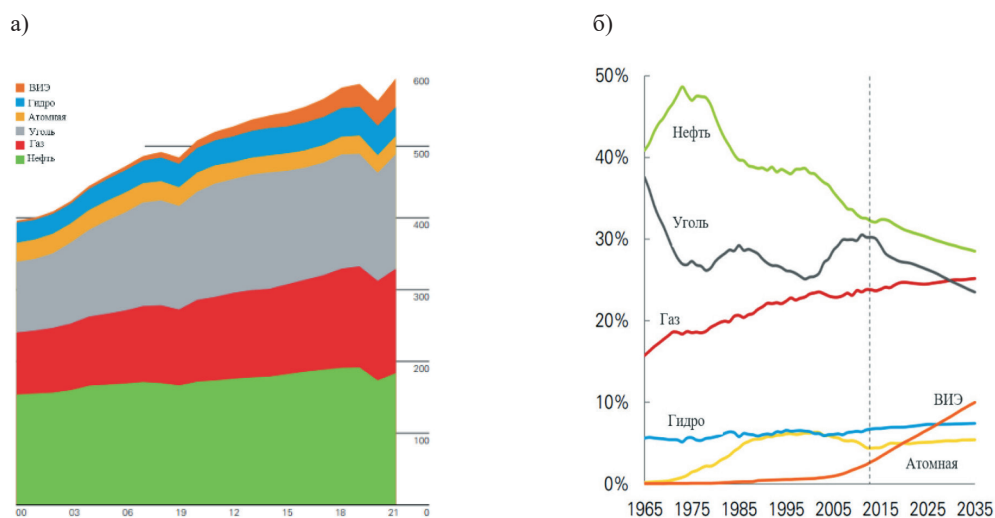


Рис. 1. Современное состояние и прогноз использования энергоресурсов в мире:
а — мировое потребление в 2000–2021 гг., эксаДж; б — прогноз потребления к 2035 г., %

Существуют различные варианты транспортировки газа. Магистральный трубопроводный транспорт, используемый для крупных объемов газа 10–30 млрд м³/год, является приоритетным при транспортировке на расстояния до 2000 км [5]. Помимо этого сжиженный природный газ (далее — СПГ) перевозят с использованием морского и внутреннего водного транспорта. СПГ транспортируется охлажденным при температуре –162 °С и менее, при этом происходит его сжатие в объемах до в 600 раз,

¹ экса = 10¹⁸.

что является одним из основных преимуществ этой технологии [6], [7]. Судовая партия СПГ составляет 170–260 тыс. м³. СПГ не имеет цвета, он нетоксичен, не имеет запаха и не подвержен коррозии, что обеспечивает его широкое применение [8]. В течение последних 10 лет импорт крупнотоннажного СПГ увеличивается ежегодно примерно на 5 % и в 2021 г. достиг 516,2 млрд м³, при этом в 2011 г. импорт составлял 328 млрд м³ (рис. 2).

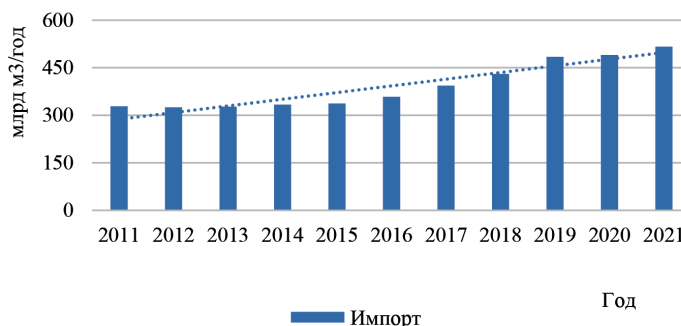


Рис. 2. Импорт сжиженного природного газа, млрд м³/год

Транспортировка малотоннажного СПГ (объемом менее 20 тыс. м³) осуществляется железнодорожным транспортом, автомобильным, внутренним водным, а также морским с использованием танк-контейнеров ISO [6] при мультимодальных перевозках с перевалкой груза с одного вида транспорта на другой, при этом погрузочно-разгрузочные операции выполняются с контейнером, а не с его содержимым. При этом контейнер является одновременно средством транспортировки и хранения.

Контейнеризация была впервые коммерчески внедрена в США в середине 1950-х гг. Американский предприниматель Малком Маклин является основоположником современных контейнерных перевозок. В 1956 г. судно «Идеал-Х» с 58 контейнерами на борту отправилось из Нью-Йорка в Хьюстон. Контейнеризация способствовала значительному снижению транспортных расходов. Так, в 1956 г. стоимость перевозки грузов составляла 5,8 долл./т, а с использованием контейнеров на «Идеал-Х» составила 0,2 долл./т. Стоимость перевозки груза в 40-футовом контейнере до глобального логистического кризиса 2020 г. составляла порядка 50 долл./т при стоимости перевозки контейнера порядка 1200–1500 долл.) [9].

Контейнерные перевозки оказали влияние не только на судоходство, но и в целом на международную экономику. Контейнеризация позволила увеличить доступность доставки грузов в различные точки мира. Производители, имеющие ограниченный доступ к мировому рынку из-за удаленности и отсутствия транспортной инфраструктуры, получили новые возможности в связи с распространением контейнеров как глобальной транспортной единицы. Благодаря контейнеризации участники перевозок теоретически имеют одинаковый уровень доступа к глобальной системе распределения грузов [10], [11]. Согласно данным 2019 г., в течение последнего десятилетия суммарная пропускная способность контейнерных терминалов в мире увеличилась с 540 млн TEU/год (2010 г.) до 810 млн TEU/год [12] — рис. 3.

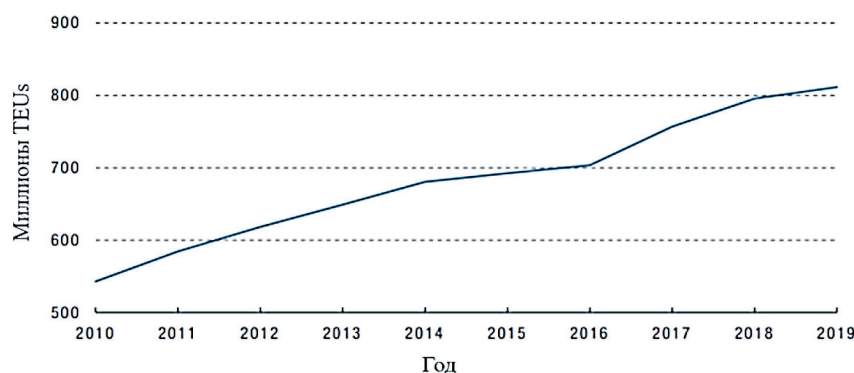


Рис. 3. Пропускная способность контейнерных терминалов в мире

Развитие технологий транспортировки газообразной продукции в сжатом виде и контейнеризации привело к синергетическому эффекту с возникновением танк-контейнеров СПГ для малотоннажной транспортировки и хранения. В научных исследованиях тематика танк-контейнеров получила развитие в течение последних 10–20 лет. В ходе изучения научных источников было выявлено, что исследователи в основном обращают внимание на нагрузки и конструктивные особенности танк-контейнера СПГ.

В исследованиях E. Lisowski и W. Czyzycki [13] приведены основные требования к танк-контейнерам СПГ, выполнение которых может свести к минимуму вероятность поломки. Танк-контейнер в течение расчетного срока службы должен выдерживать количество циклов наполнения и опорожнения (операций охлаждения и нагрева) и быть изготовлен из рекомендованных для этой цели материалов. В исследованиях J. Peng [14], Z. Wang и C. Qian [14] проанализированы нагрузки и давление в танк-контейнере СПГ при транспортировке водным и железнодорожным транспортом, выполнен анализ напряжений и оценка прочности танк-контейнера при перевозке СПГ, сформулированы предложения по обеспечению безопасности транспортировки СПГ в танк-контейнерах для обеспечения контроля транспортных рисков. Z. Wang [15] приводит рекомендации по конструкции танк-контейнеров. В статье F. Meng, L. Ma и X. Wang [16] рассмотрены факторы, влияющие на безопасность морской транспортировки танк-контейнеров СПГ, а также создана модель *рекуррентной нейронной сети* (англ. Recurrent neural network, RNN), на основе которой создана *индексная система* (данная модель создана для оценки безопасности). В статье J. Wang и Y. Sang [17] представлена модель оптимизации мультимодальной транспортировки танк-контейнеров СПГ с наименьшими транспортными расходами и рисками, а также выполнена оценка транспортных рисков.

В исследованиях Y. Peng, Y. Yin, Q. Yue и S. Wu [18] было экспериментально рассмотрено влияние движения судна на давление и время выдержки танк-контейнеров во время морской транспортировки с помощью трех экспериментов, а именно с опытными образцами, полевыми испытаниями и экспериментами по самонапряжению. Установлено, что движение судна облегчает испарение СПГ за счет усиления теплообмена при динамических условиях. Более сильное движение судна вызывает повышенное образование парных газов. Тем не менее установлено, что скорость испарения является стабильной даже в самых жестких динамических условиях. В полевых условиях прогнозируемое время выдержки составило 92 дня. На основании данных исследований было установлено, что транспортировка СПГ в танк-контейнерах является наиболее безопасным и доступным способом.

В исследованиях российских ученых Л. Мамедовой и М. Гоголухиной [19] была проведена оценка транспортировки СПГ в мембранных танк-контейнерах, изготовленных из алюминийско-скандиевого сплава 1580 нового поколения с низким содержанием скандия (не более 0,1 %). Использование такой технологии по сравнению с традиционными стальными конструкциями позволяет обеспечить высокий уровень адаптации к резким изменениям температуры, повышение ударопрочности, так как мембрана может удлиняться и равномерно распределять динамические нагрузки, обеспечение высокого уровня безопасности и снижение вероятности утечки СПГ, а также снижение веса танк-контейнера СПГ за счет использования

Целью работы является изучение устройства и характеристик танк-контейнеров основных производителей, создание логистической цепочки с их использованием, а также поиск решений возможности использования танк-контейнеров для транспортировки сжиженного природного газа в целях последующего изучения и применения в проектах в РФ.

Методы и материалы (Methods and Materials)

В статье выполнен обзор международного опыта, научных достижений и имеющихся технологий перевозки СПГ в танк-контейнерах с использованием методов системного анализа и систематизации научных исследований.

Результаты (Results)

Танк-контейнеры СПГ обеспечивают транспортировку (автомобильный, железнодорожный, водный виды транспорта или их комбинация) в малых объемах до конечных потребителей. Преимуществом их является непосредственное использование в качестве резервуара для хранения без создания дорогостоящей дополнительной инфраструктуры [20]. При общей мобильности и гибкости также обеспечивается хранение без дополнительных рефрижераторных систем порядка трех месяцев, в том числе поэтому танк-контейнеры СПГ используют следующим образом: для газоснабжения малонаселенных и труднодоступных пунктов, которые не подключены к магистральным газопроводам; для удовлетворения краткосрочного пикового потребления газа в зимний период; для подачи потребителям, временно отключенным от магистральных газопроводов (например, в связи с ремонтом или техническим обслуживанием); для использования газа в качестве моторного топлива для различных видов транспорта. На основе проведенного исследования были получены сведения об устройстве и характеристиках танк-контейнеров, мировом парке танк-контейнеров (в том числе по производителям и владельцам), функциональной сущности логистической цепочки поставки СПГ в танк-контейнерах, выполнен анализ и обзор логистических цепочек в мире и РФ.

Устройство и характеристики танк-контейнеров. В большинстве случаев танк-контейнеры предназначены для перевозки грузов в жидком агрегатном состоянии. В них перевозят пищевые и промышленные продукты [21]:

- пищевые: спиртосодержащие жидкости (алкогольные напитки), пищевые масла, пищевые добавки, концентрированные фруктовые соки, минеральные воды, молоко и др.;
- промышленные: нефть, нефтепродукты, масла, смазки, сжиженные газы, химические вещества, краски, солевые растворы, жирные кислоты, гранулированные и сыпучие вещества и др.

Танк-контейнер является транспортной единицей. Он состоит из рамы (защищает резервуар от повреждений при перевозках, обеспечивает штабелирование для складирования) и цистерны (со сливной арматурой и устройствами для безопасного заполнения и разгрузки СПГ, отвода отпарных газов). Перевозки СПГ в танк-контейнерах осуществляют при температуре не менее $-162\text{ }^{\circ}\text{C}$, плотности $0,43\text{--}0,47\text{ т/м}^3$. Резервуар является криогенным, он обеспечивает уменьшение расхода тепла в соответствии с эксплуатационными требованиями с предотвращением образования наледи. Танк-контейнеры по типоразмерам стандартизированы в соответствии с нормативами ISO (International Organization for Standardization) для унификации при мультимодальных перевозках. Танк-контейнеры обеспечивают изоляцию СПГ, что снижает скорость статического испарения газа [22], они оснащены системами безопасности и устройствами аварийного отключения, что гарантирует безопасность при транспортировке СПГ [23]. На рис. 4 приведена конструкция танк-контейнера.

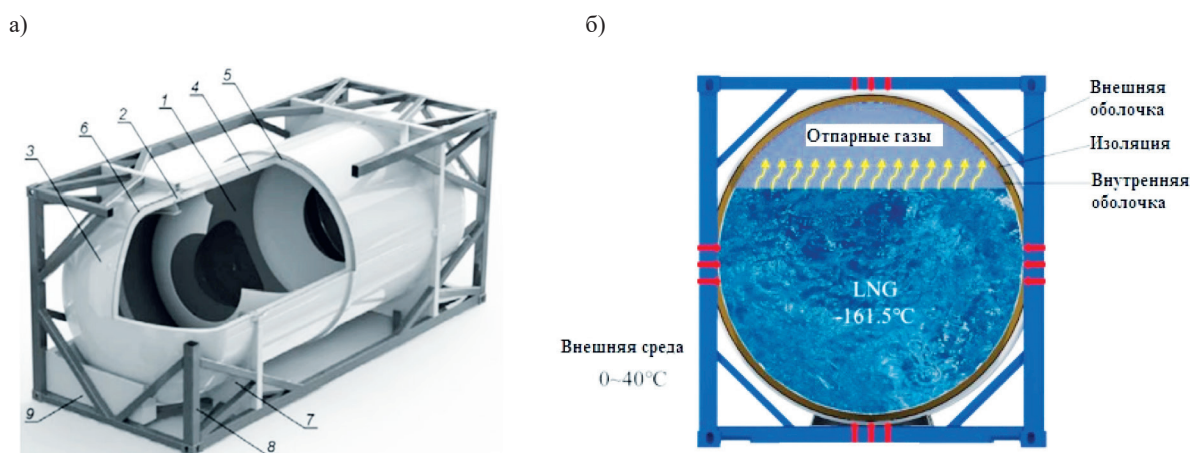


Рис. 4. Устройство танк-контейнера для перевозки и хранения СПГ:

- 1 — внутренний резервуар; 2 — внутренние опоры из полимерных материалов;
3 — наружный резервуар; 4 — изоляция;
5 — радиационные экраны; 6 — вакуум; 7 — наружные опоры;
8 — каркас контейнера; 9 — фиттинги

Танк-контейнеры изготавливают стандартных 20- и 40-футового размеров, характеристики которых приведены в табл. 1 [24]. Для перевозок СПГ в основном используют 40-футовые криогенные танк-контейнеры объемом 43,5 м³, стоимость которых составляет 50–120 тыс. долл.

Таблица 1

Размеры танк-контейнеров

Тип танк-контейнера	Объем, м ³	Длина, м	Ширина, м	Высота, м	Грузы для перевозок	Время хранения без рефрижераторных систем
20-футовый	20,7	6,058	2,438	2,591	Метан (СПГ), этан, этилен, азот, аргон, кислород, углекислый газ	109 дней
40-футовый	43,5	12,192	2,438	2,591	Метан (СПГ), этан, этилен, азот	109 дней

Мировой парк танк-контейнеров. По данным ITCO (International Tank Container Organization) [25], в 2021 г. в мире насчитывается 737 тыс. танк-контейнеров, при этом из открытых источников невозможно определить долю танк-контейнеров под СПГ. По сравнению со стандартными контейнерами, которых в мире насчитывается порядка 100 млн танк-контейнеры занимают малую долю, обладая при этом высокими темпами роста — их ежегодный выпуск составляет 53 тыс. шт./год, что позволяет наращивать количество мирового парка контейнеров на 6–10 % ежегодно. На рис. 5 показана статистика ежегодного производства и накопленного количества танк-контейнеров в мире.

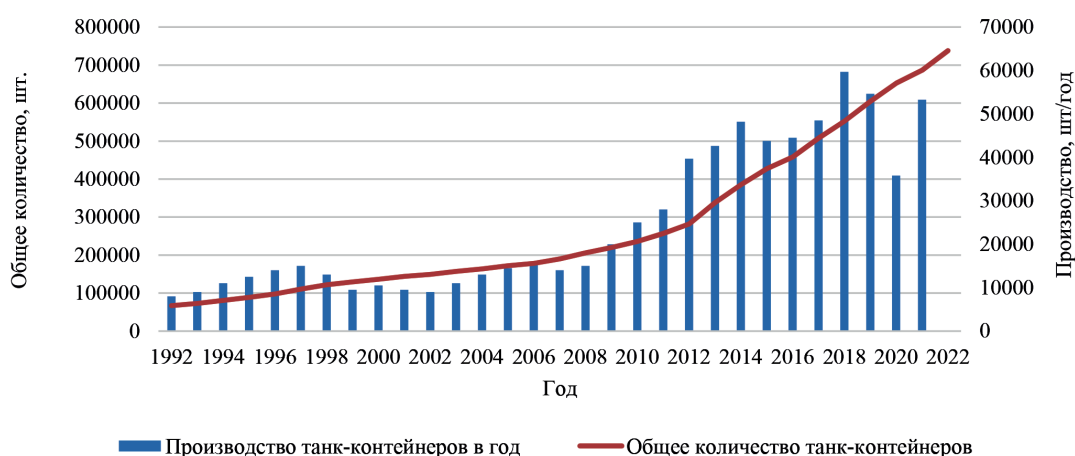


Рис. 5. Производство и накопление танк-контейнеров в 1992–2022 гг.

Производители и владельцы (операторство, лизинг). Производство танк-контейнеров на 90 % сосредоточено в Китае. Крупнейшими компаниями являются: CIMC (29,5 тыс. шт./год; Китай), NT Tank (9 тыс. шт./год; Китай), JJAP (5,6 тыс. шт./год; Китай), Welfit Oddy (4 тыс. шт./год; ЮАР). Необходимо отметить, что шесть крупнейших компаний производят 97 % танк-контейнеров от общего мирового объема 53 тыс. шт./год.

Виды владения танк-контейнерами: *операторство* (полное владение) и *лизинг* (передача пользования на длительный срок за вознаграждение). В большей степени распространено операторство с мировым парком 490 тыс. шт. (крупнейшие компании имеют в распоряжении 20–43 тыс. шт.). В лизинг предоставляется меньшее количество — 323 тыс. шт. (крупнейшие компании владеют 40–71 тыс. шт.). При этом среди стран-владельцев преобладают США, Германия, Великобритания, Нидерланды, Франция и Швейцария, в то время как в Азиатско-Тихоокеанском регионе (АТР) существует несколько компаний в Китае и Сингапуре (владение 20–30 тыс. шт.).

Логистическая цепочка поставки СПГ с использованием танк-контейнеров. СПГ с морскими поставками в крупнотоннажных судах-газовозах (дедвейт 80–130 тыс. т) в основном предназначен

для энергогенерирующих предприятий, готовых использовать данный энергоноситель в больших объемах. Поставки СПГ в танк-контейнерах на данном этапе являются малотоннажными, так как потребителями являются *индивидуальными* (суда, автотранспорт, коммунально-бытовые пользователи).

Идентифицирована общая функциональная сущность логистической цепочки поставки СПГ в танк-контейнерах (рис. 6). В любом случае добыча и подготовка природного газа происходят на крупных месторождениях. Возникновение танк-контейнера в логистической цепочке возможно в двух ситуациях, при которых в танк-контейнеры происходит налив части объема крупнотоннажного СПГ: в порту приемки (регазификация) или в порту отправки (экспорт). В первом случае при отправке СПГ крупнотоннажными судами-газовозами импортеру потребуются вместительные резервуары СПГ, чтобы осуществить частичный налив объемов в танк-контейнеры. На современных терминалах регазификации СПГ вводятся дополнительные функции и услуги: перевалка на малые суда-газовозы, бункеровка судов, заправка автомобильных и железнодорожных цистерн, заправка танк-контейнеров ISO. Во втором случае при нахождении танк-контейнеров в экспортном порту требуется применение судов-контейнеровозов, при этом у импортера не возникает необходимости в крупнотоннажных резервуарах, так как фактически происходит мультимодальная перевозка и распределение контейнеров до конечного потребителя.



Рис. 6. Логистическая цепочка поставки СПГ с использованием танк-контейнеров

Танк-контейнеры СПГ от портового терминала поступают к потребителю напрямую через мультимодальную транспортировку контейнера (железнодорожный, автомобильный, водный) или требуют дополнительного хранения (склад регазификации, штабелирование контейнеров, крио-заправка). Унифицированные танк-контейнеры крановыми средствами монтируются на борт автомобиля, палубу судна контейнеровоза или на железнодорожную платформу для перевозок. На рис. 7 показана цепочка распределения танк контейнеров СПГ от портового терминала до конечных потребителей.

Анализ логистических цепочек с морским транспортом СПГ в танк-контейнерах. СПГ активно развивается в Азиатско-Тихоокеанском регионе (АТР). Во многом связано с тем, что развивающиеся страны являются крупнейшими импортерами. В 2021 г. основными странами мира по приемке СПГ были: Китай — 110 млрд м³, Япония — 101 млрд м³, Южная Корея — 64 млрд м³, Индия — 34 млрд м³, Тайвань — 27 млрд м³. На рис. 8 [1] приведена динамика увеличения ежегодных объемов импорта СПГ в Китае, Японии и Южной Корее. Ежегодный прирост в 2011–2021 гг. при относительно стабильной стоимости СПГ составил 5–10 %, при этом наибольшее увеличение объемов импорта СПГ за указанный период отмечалось в Китае (16,9 млрд м³ в 2011 г., 110 млрд м³ в 2021 г.). В течение ближайших 10–15 лет потребление газа и его доля в энергобалансе этих стран будет увеличиваться несмотря на краткосрочные ценовые всплески и кризисы (пандемия Covid-19, энергетический кризис 2022 г. В частности, в 2022 г. текущая стоимость на рынке на СПГ достигла 1,1 долл./м³, что почти в 4 раза превышает средние показатели за последние десять лет.



Рис. 7. Распределение танк-контейнеров от портового терминала до потребителя

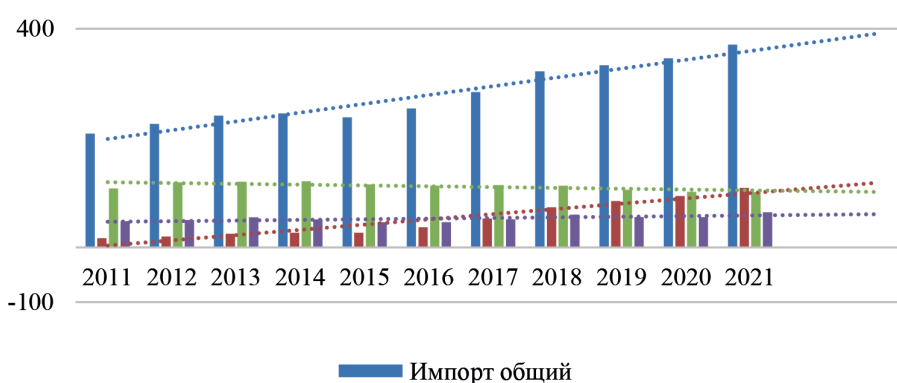


Рис. 8. Объемы ежегодного импорта СПГ в Азиатско-Тихоокеанском регионе, млрд м³

Широкое применение судов-контейнеровозов для морской транспортировки танк-контейнеров СПГ наблюдается в течение последних пяти лет в особенности в Азиатско-Тихоокеанском регионе (АТР). Несмотря на растущее потребление СПГ в энергобалансе этих стран сеть магистральных газопроводов в них развита неравномерно или отсутствует в отдельных локациях. Первые тестовые морские поставки СПГ в танк-контейнерах в АТР выполнены в 2007 г. через три китайских порта: Weizhou Island — Guangzhou — Haining и в 2014 г. (44 контейнера за тринадцать кругорейсов между китайскими портами Dongguan и Haikou). В табл. 2 приведены данные, полученные из открытых источников интернета, о проектах морской транспортировки СПГ судами-контейнеровозами. На рис. 9 приведены логистические цепочки в АТР с нумерацией в соответствии с табл. 2.

Таблица 2

Поставки СПГ в танк-контейнерах

№ п/п.	Оператор (компания)	Статус	Количество танк-контейнеров	Регион (страны)	Год
1	Tiger Gas	Тестовая поставка	200	Малайзия – Китай	2021
2	Tiger Gas	Тестовая поставка	205	Малайзия – Китай	2021
3	COSCO	Тестовая поставка	130	Китай (юг – север)	2018
4	FortisBC	Подписано соглашение	60 ед. в неделю	Канада – Китай (Шанхай)	2019–2021
5	Gaslink	На регулярной основе	Оборот из 55 танк-контейнеров	Португалия (Лиссабон – Мадейра)	С 2017 г.
6	CNOOC	Тестовая поставка	5	Китай – Камбоджа	2020
7	Novatek&Power Asia, Saibu Gas и Tiger Gas	Тестовая поставка	Нет данных	Япония – Китай	2020



Рис. 9. Карта логистических цепочек с морским транспортом СПГ в танк-контейнерах в Азиатско-Тихоокеанском регионе

В настоящее время в АТР не существует постоянных линий для перевозки танк-контейнеров СПГ, однако тестовые перевозки уже были успешно осуществлены. Основными заинтересованными в этом судоходными компаниями являются китайские Tiger Gas и Cosco, которые занимаются тестовым пилотированием подобных перевозок на обычных судах-контейнеровозах. Компанией Cosco в 2018 г. была выполнена перевозка 130 танк-контейнеров СПГ (рис. 10, а) — танк-контейнеры перевезены из порта Янпу (провинция Хайнань на юге Китая) в порт Цзиньчжоу (провинция Ляонин на севере Китая). Данная поставка выполнена для тестирования схемы обеспечения севера страны энергоресурсами для сглаживания пиков потребления в осенне-зимний период [26]. Компания Tiger Gas выполнила в 2020 г. несколько тестовых поставок, сконцентрировав свои усилия в 2021 г. на создании танк-контейнерной линии Малайзия – Китай совместно с нефтегазовой компанией Petronas: в январе 2021 г. было перевезено из Бинтулу (Малайзия) в Китай 200 танк-контейнеров СПГ, в апреле 2021 г. — 205 танк-контейнеров [27]. Для обеспечения долгосрочных поставок малайзийской нефтегазовой компании Petronas компания Tiger Gas создала собственный флот, в состав которого в ближайшее время войдут четыре специализированных СПГ-контейнеровоза (первое судно было спущено на воду китайской верфью Yangzijiang Shipbuilding в ноябре 2021 г., остальные три — в течение 2022 г.). Суда-контейнеровозы имеют идентичные характеристики (рис. 10, б): дедвейт 25 000 т, вместимость 690 танк-контейнеров (40-футовые), эквивалент 15 000 т СПГ, скорость 16 уз. Стоимость строительства судна составляет 115 млн долл. США.

а)



б)



Рис. 10. Контейнеровозы китайских судовладельцев для транспортировки танк-контейнеров СПГ:
а — Cosco; б — Tiger Gas

В Европе первая цепочка по морской перевозке танк-контейнеров СПГ появились в 2017 г. в Португалии [28] для газификации автономного отдаленного о-ва Мадейра. Логистическая цепочка является замкнутой, она обеспечивает кругооборот 55 танк-контейнеров и двух судов-контейнеровозов. Этого вполне достаточно для того, чтобы обеспечить потребность в объемах СПГ с необходимым количеством грузовой и порожней тары. Действие логистической цепочки приведено на рис. 11. СПГ поступает на крупнотоннажных судах на морской терминал регазификации в порту Синиш 1, на котором одной из операций предусмотрен налив СПГ в танк-контейнеры СПГ, автотранспортом танк-контейнеры доставляют по маршруту Синиш – Лиссабон (150 км) 2, на контейнерном терминале в порту Лиссабон происходит погрузка на контейнеровоз 3, затем морская транспортировка в порт Канисад на о-ве Мадейра (960 км) 4, перевалка танк-контейнеров с морского транспорта на автомобильный в порту Канисал 5, автотранспортом танк-контейнеры доставляют по маршруту порт Канисал – накапливающая станция регазификации (40 км), с которой осуществляются поставки СПГ местным потребителям 6, затем происходит дальнейший возврат порожней тары танк-контейнеров, заполнение и транспорт по кольцевому маршруту 7.

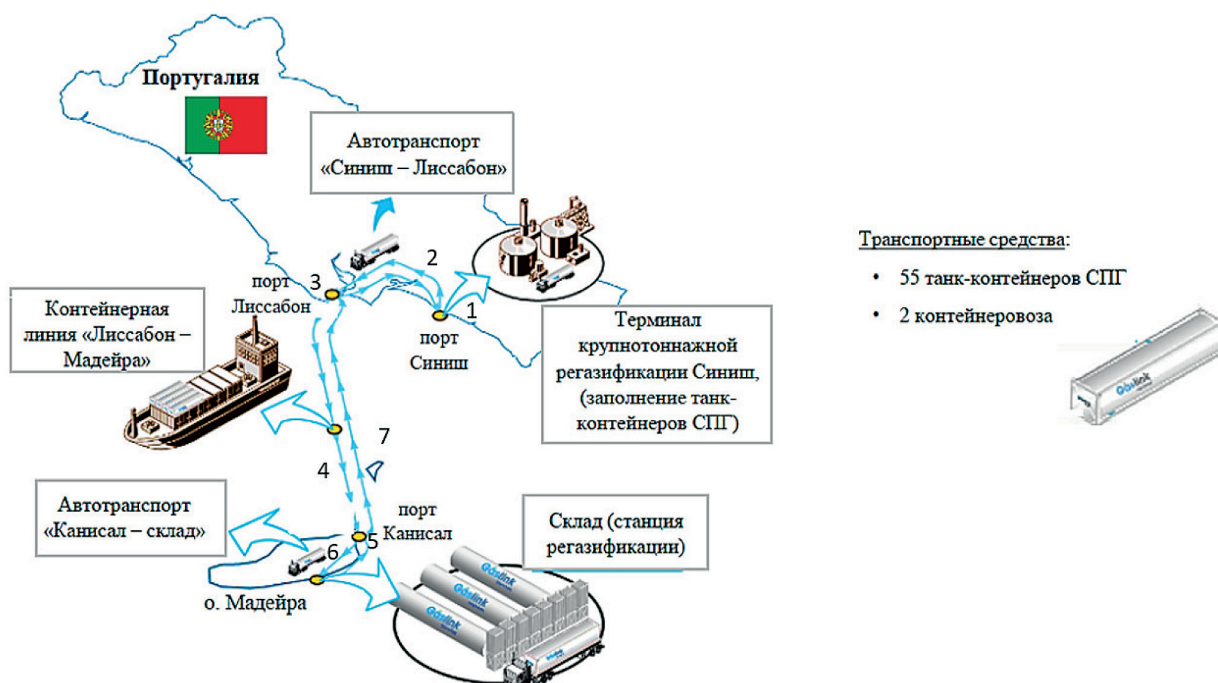


Рис. 11. Логистическая цепочка с танк-контейнерами СПГ в Португалии

Использование танк-контейнеров СПГ в РФ. По данным справочных материалов [29], с начала 2010-х гг. в РФ построено более пятнадцати малотоннажных заводов (менее 160 тыс. т/год) по сжижению СПГ. Все они расположены вблизи единой системы газоснабжения «Газпром», осуществляют прием сырьевого газа из магистральных газопроводов и его дальнейшее сжижение. Деятельность осуществляют крупные холдинги: «Газпром» (КСПГ «Канюсята», КСПГ «Владивосток» и др.), «Новатэк» (КСПГ «Челябинск») и независимые компании: «Криогаз», «Сибирь-Энерго» и др.

Примеры применения танк-контейнеров СПГ в Российской Федерации:

1. «Криогаз» в 2021 г. проводил тестирование мультимодальной перевозки для определения оптимальной логистической цепочки (заправка СПГ в Новокузнецке с отправкой автомобильным и речным транспортом на 3000 км до Усть-Кута и В. Муны) — рис. 12, а.

2. «Газпром СПГ-технологии» с 2021 г. для криогенных топливозаправочных пунктов в Перми и Тюмени использует танк-контейнеры для хранения СПГ совместно с модульными блоками заправки мобильной техники (рис. 12, б).

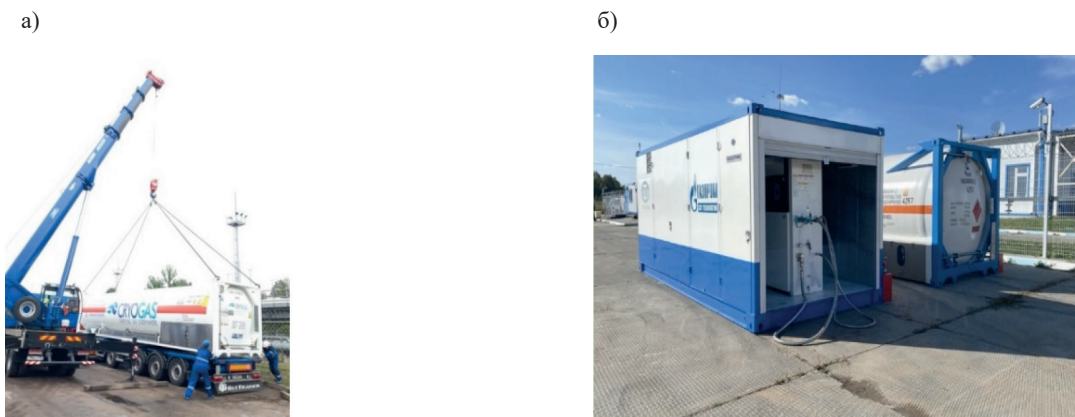


Рис. 12. Использование танк-контейнеров СПГ в РФ:
а — «Криогаз»; б — «Газпром СПГ-технологии»

Обсуждение (Discussion)

Танк-контейнеры предназначены для мобильной транспортировки и кратковременного хранения СПГ в малых объемах. С помощью данного способа перевозки СПГ газифицируют малые или отдаленные населенные пункты — для них таким образом обеспечивается энергетическая независимость [30]. Помимо этого танк-контейнеры активно начинают использовать на криогенных заправочных пунктах в качестве моторного топлива для автотранспорта или судов. К примеру, в АТР данная технология развивается на стыке крупнотоннажных регазификационных терминалов СПГ с дальнейшим распределением конечным потребителям. На примере РФ возможно применение вблизи магистральных газопроводов.

На территории РФ существует сеть магистральных газопроводов «Газпром» и крупнотоннажные экспортные СПГ заводы (более 2 млн т/год), например, Ямал СПГ 18,9 млн т/год и Сахалин-2 10,4 млн т/год. Масштабная ресурсная база газа и разветвленная транспортная сеть создают возможности для развития производственно-логистических цепочек с применением танк-контейнеров СПГ в РФ, в особенности для автономных отдаленных населенных пунктов и регионов с малым количеством населения. В связи с этим система газопроводов в подобных регионах развита в меньшей степени. В этом случае целевыми регионами могут являться Сибирский федеральный округ (6,8 % уровень газификации, плотность населения 3,9 чел./км²) и Дальневосточный федеральный округ (13 % уровень газификации, плотность населения 1,2 чел./км²). Для сравнения: в европейской части России газификация достигает 70–90 % при плотности населения 27 чел./км².

Для Дальнего Востока использование танк-контейнерной «виртуальной газовой трубы», т. е. газ для домовладений или предприятий поступает не из трубопроводной системы, а с помощью ритмичных поставок танк-контейнеров по круговой системе, позволит обеспечить газификацию населения. В настоящее время большинство объектов малотоннажного сжижения и потребления СПГ находится в Европейской части РФ, однако появилась тенденция и желание инвесторов создать подобные системы на Дальнем Востоке. Технологии поставок СПГ в танк-контейнерах должны способствовать подобному развитию событий. Основной задачей руководства страны является газификация всего населения, поэтому использование танк-контейнеров для перевозки СПГ позволит малонаселенным регионам использовать газ как основной источник энергии. В Российской Федерации основными регионами для реализации данного решения являются Дальний Восток, Сибирь и Крайний Север.

Заключение (Summary)

В работе приведены и проанализированы основные характеристики танк-контейнеров, показана логистическая цепочка с использованием танк-контейнеров, а также проанализирован международный опыт их использования и применения. Рассмотрены регионы Российской Федерации, в которых могут быть использованы танк-контейнеры СПГ для обеспечения населения Дальнего

Востока газом. Необходимо отметить, что в настоящее время в России проводится пока только тестирование данного вида поставки в малых объемах.

В результате проведенного обзорного анализа получены следующие результаты:

- отмечено развитие логистических цепочек с применением танк-контейнеров СПГ;
- рассмотрены ключевые характеристики танк-контейнера СПГ;
- проанализирован мировой парк танк-контейнеров и производственные мощности (53 тыс. шт./год);
- выполнен обзор морской транспортировки танк-контейнеров СПГ на судах-контейнеровозах, которые получили основное развитие в Китае.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. BP Statistical review of World Energy 2022. — 71st edition. — London: Whitehouse Associates, 2022. — 58 p.
2. *Smil V.* Natural gas: fuel for the 21st century / V. Smith. — Wiley-Blackwell, 2015. — 264 p.
3. *He T.* LNG cold energy utilization: Prospects and challenges / T. He, Z. R. Chong, J. Zheng, Y. Ju, P. Linga // *Energy*. — 2019. — Vol. 170. — Pp. 557–568. DOI: 10.1016/j.energy.2018.12.170.
4. BP Energy Outlook. — 2017 edition. — BP, 2017. — 103 p.
5. *Mokhatab S.* Handbook of liquefied natural gas / S. Mokhatab, J. Y. Mak, J. V. Valappil, D. A. Wood. — Gulf Professional Publishing, 2016. — 624 p.
6. *He T.* Review on the design and optimization of natural gas liquefaction processes for onshore and offshore applications / T. He, I. A. Karimi, Y. Ju // *Chemical Engineering Research and Design*. — 2018. — Vol. 132. — Pp. 89–114. DOI: 10.1016/j.cherd.2018.01.002.
7. *Khan M. S.* Retrospective and future perspective of natural gas liquefaction and optimization technologies contributing to efficient LNG supply: A review / M. S. Khan, I. A. Karimi, D. A. Wood // *Journal of Natural Gas Science and Engineering*. — 2017. — Vol. 45. — Pp. 165–188. DOI: 10.1016/j.jngse.2017.04.035.
8. *Lin W.* LNG (liquefied natural gas): a necessary part in China's future energy infrastructure / W. Lin, N. Zhang, A. Gu // *Energy*. — 2010. — Vol. 35. — Is. 11. — Pp. 4383–4391. DOI: 10.1016/j.energy.2009.04.036.
9. *Candela R. A.* Malcom McLean, containerization and entrepreneurship / R. A. Candela, P. J. Jacobsen, K. Reeves // *The Review of Austrian Economics*. — 2020. — Vol. 35. — Pp. 445–465. DOI: 10.1007/s11138-020-00529-2.
10. *Bernhofen D. M.* Estimating the effects of the container revolution on world trade / D. M. Bernhofen, Z. El-Sahli, R. Kneller // *Journal of International Economics*. — 2016. — Vol. 98. — Pp. 36–50. DOI: 10.1016/j.jinteco.2015.09.001.
11. Review of maritime transport 2021 // UNCTAD. — Geneva: United Nations, 2021. — 151 p.
12. *Notteboom T.* Containerisation, box logistics and global supply chains: The integration of ports and liner shipping networks / T. Notteboom, J. P. Rodrigue // *Maritime economics & logistics*. — 2008. — Vol. 10. — Pp. 152–174. DOI: 10.1057/palgrave.mel.9100196.
13. *Lisowski E.* Transport and storage of LNG in container tanks / E. Lisowski, W. Czyzycki // *Journal of KONES*. — 2011. — Vol. 18. — No. 3. — Pp. 193–201.
14. *Peng J.* Test and Analysis of LNG Tank Container Waterway Transport / J. Peng // *International Conference on Transportation Engineering 2009*. — American Society of Civil Engineers, 2012. — Pp. 1844–1848. DOI: 10.1061/41039(345)305.
15. *Wang Z.* Strength analysis of LNG tank container for trains under inertial force / Z. Wang, C. Qian // *Journal of Physics: Conference Series*. — IOP Publishing, 2020. — Vol. 1549. — No. 3. — Pp. 032107. DOI: 10.1088/1742-6596/1549/3/032107.
16. *Meng F.* An Approach on the Evaluation of LNG Tank Container Transportation Safety / F. Meng, L. Ma, X. Wang // *International Journal of Engineering and Management Research*. — 2019. — Vol. 9. — Is. 5. — Pp. 44–53. DOI: 10.31033/ijemr.9.5.8.
17. *Wang J.* Route optimization of LNG tank container multimodal transport considering transportation safety. / J. Wang, Y. Sang // *2nd International Conference on Internet of Things and Smart City (IoTSC 2022)*. — SPIE, 2022. — Vol. 12249. — Pp. 942–949. DOI: 10.1117/12.2637034.
18. *Yu P.* Experimental Study of Ship Motion Effect on Pressurization and Holding Time of Tank Containers during Marine Transportation / P. Yu, Y. Yin, Q. Yue, S. Wu // *Sustainability*. — 2022. — Vol. 14. — Is. 6. — Pp. 3595. DOI: 10.3390/su14063595.

19. Mamedova L. Advantages of Production and Operation of Innovational Storage Systems in Multimodal LNG-Transportation / L. Mamedova, M. Gogolukhina // IOP Conference Series: Earth and Environmental Science. — IOP Publishing, 2020. — Vol. 459. — No. 6. — Pp. 062074. DOI: 10.1088/1755-1315/459/6/062074.
20. 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.
21. Пономаренко М. А. Перевозки химических наливных грузов в танк-контейнерах: проблемы безопасности и особенности их транспортировки / М. А. Пономаренко, И. А. Русинов // Транспортное дело России. — 2017. — № 5. — Pp. 156–160.
22. Chen Q. S. Analysis of temperature and pressure changes in liquefied natural gas (LNG) cryogenic tanks / Q. S. Chen, J. Wegrzyn, V. Prasad // Cryogenics. — 2004. — Vol. 44. — Is. 10. — Pp. 701–709. DOI: 10.1016/j.cryogenics.2004.03.020.
23. Guo J. Analysis of handling and storage of liquefied natural gas tank container / J. Guo, H. Tang, H. Song, G. Sun // International Journal of Smart Grid and Clean Energy. — 2021. — Vol. 10. — No. 4. — Pp. 310–315. DOI: 10.12720/sge.10.4.310–315.
24. Сайт компании “Chart industries” [Электронный ресурс]. — Режим доступа: <https://www.chartindustries.com/Products/ISO-Containers> (дата обращения: 31.07.2022).
25. 2022 Global tank container fleet survey. — Surbiton, United Kingdom: ITCO, 2022. — 15 p.
26. Алифирова Е. Чтобы не было как прошлой зимой. Китай тестирует доставку СПГ танк-контейнерами с юга на север // Neftegaz.ru [Электронный ресурс] / Е. Алифирова. — Режим доступа: <https://neftegaz.ru/news/transport-and-storage/196527-chtoby-ne-bylo-kak-proshloy-zimoy-kitay-testiruet-dostavku-spg-tank-konteynerami-s-yuga-na-sever/> (дата обращения: 05.07.2022).
27. Алифирова Е. Tiger Gas получила второй контейнеровоз для поставок СПГ в ISO-контейнерах // Neftegaz.ru [Электронный ресурс] / Е. Алифирова. — Режим доступа: <https://neftegaz.ru/news/transport-and-storage/725755-tiger-gas-poluchila-vtoroy-konteynerovoz-dlya-postavok-spg-v-iso-konteynerakh/> (дата обращения: 05.07.2022).
28. Сайт компании “Gaslink” [Электронный ресурс]. — Режим доступа: <https://www.gaslink.pt/gasoduto-virtual/> (дата обращения: 08.07.2022).
29. Климентьев А. Справочные материалы. Карта российской СПГ отрасли 2022 / А. Климентьев, М. Ишмуратова, Д. Сун, А. К. Хауг, И. Кирилкина, А. Талипова, Д. Хусейнов, В. Киушкина, С. Лентьев, А. Сульдин, В. Карасевич. — 2022. — 112 p.
30. Alderman J. A. Introduction to LNG safety / J. A. Alderman // Process Safety Progress. — 2005. — Vol. 24. — Is. 3. — Pp. 144–151. DOI: 10.1002/prs.10085.

REFERENCES

1. BP Statistical review of World Energy 2022. 71st edition. London: Whitehouse Associates, 2022.
2. Smil, Vaclav. *Natural gas: fuel for the 21st century*. Wiley–Blackwell, 2015.
3. He, Tianbiao, Zheng Rong Chong, Junjie Zheng, Yonglin Ju, and Praveen Linga. “LNG cold energy utilization: Prospects and challenges.” *Energy* 170 (2019): 557–568. DOI: 10.1016/j.energy.2018.12.170.
4. BP Energy Outlook. 2017 edition. BP, 2017.
5. Mokhtab, Saied, John Mak, Jaleel Valappil, and David A. Wood. *Handbook of Liquefied Natural Gas*. Gulf Professional Publishing, 2016.
6. He, Tianbiao, Iftexhar A. Karimi, and Yonglin Ju. “Review on the design and optimization of natural gas liquefaction processes for onshore and offshore applications.” *Chemical Engineering Research and Design* 132 (2018): 89–114. DOI: 10.1016/j.cherd.2018.01.002.
7. Khan, Mohd Shariq, I. A. Karimi, and David A. Wood. “Retrospective and future perspective of natural gas liquefaction and optimization technologies contributing to efficient LNG supply: A review.” *Journal of Natural Gas Science and Engineering* 45 (2017): 165–188. DOI: 10.1016/j.jngse.2017.04.035.
8. Lin, Wensheng, Na Zhang, and Anzhong Gu. “LNG (liquefied natural gas): a necessary part in China’s future energy infrastructure.” *Energy* 35.11 (2010): 4383–4391. DOI: 10.1016/j.energy.2009.04.036.
9. Candela, Rosolino A., Peter J. Jacobsen, and Kacey Reeves. “Malcom McLean, containerization and entrepreneurship.” *The Review of Austrian Economics* 35 (2020): 445–465. DOI: 10.1007/s11138-020-00529-2.

10. Bernhofen, Daniel M., Zouheir El-Sahli, and Richard Kneller. "Estimating the effects of the container revolution on world trade." *Journal of International Economics* 98 (2016): 36–50. DOI: 10.1016/j.jinteco.2015.09.001.
11. *Review of maritime transport 2021*. UNCTAD. Geneva: United Nations, 2021.
12. Notteboom, Theo, and Jean-Paul Rodrigue. "Containerisation, box logistics and global supply chains: The integration of ports and liner shipping networks." *Maritime economics & logistics* 10 (2008): 152–174. DOI: 10.1057/palgrave.mel.9100196.
13. Lisowski, Edward, and Wojciech Czyżycki. "Transport and storage of LNG in container tanks." *Journal of KONES* 18.3 (2011): 193–201.
14. Peng, Jianhua. "Test and Analysis of LNG Tank Container Waterway Transport." *International Conference on Transportation Engineering 2009*. American Society of Civil Engineers, 2012. 1844–1848. DOI: 10.1061/41039(345)305.
15. Wang, Zhiqiang, and Caifu Qian. "Strength analysis of LNG tank container for trains under inertial force." *Journal of Physics: Conference Series*. Vol. 1549. No. 3. IOP Publishing, 2020. DOI: 10.1088/1742-6596/1549/3/032107.
16. Meng, Feiyu, Li Ma, and Xuefeng Wang. "An Approach on the Evaluation of LNG Tank Container Transportation Safety." *International Journal of Engineering and Management Research* 9.5 (2019): 44–53. DOI: 10.31033/ijemr.9.5.8.
17. Wang, Jie, and Yan Sang. "Route optimization of LNG tank container multimodal transport considering transportation safety." *2nd International Conference on Internet of Things and Smart City (IoTSC 2022)*. Vol. 12249. SPIE, 2022. DOI: 10.1117/12.2637034.
18. Yu, Peng, Yuanchao Yin, Qianjin Yue, and Shanghua Wu. "Experimental Study of Ship Motion Effect on Pressurization and Holding Time of Tank Containers during Marine Transportation." *Sustainability* 14.6 (2022): 3595. DOI: 10.3390/su14063595.
19. Mamedova, L., and M. Gogolukhina. "Advantages of Production and Operation of Innovational Storage Systems in Multimodal LNG-Transportation." *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*. Vol. 459. No. 6. IOP Publishing, 2020. DOI: 10.1088/1755-1315/459/6/062074.
20. Lee, Chung-Yee, and Dong-Ping Song. "Ocean container transport in global supply chains: Overview and research opportunities." *Transportation Research Part B: Methodological* 95 (2017): 442–474. DOI: 10.1016/j.trb.2016.05.001.
21. Ponomarenko, M., and I. Rusinov. "Transport of chemical liquid cargoes in tank-containers: security issues and especially their transportation." *Transport business of Russia* 5 (2017): 156–160.
22. Chen, Q.-S., J. Wegrzyn, and V. Prasad. "Analysis of temperature and pressure changes in liquefied natural gas (LNG) cryogenic tanks." *Cryogenics* 44.10 (2004): 701–709. DOI: 10.1016/j.cryogenics.2004.03.020.
23. Guo, Jian, Haiqi Tang, Hui Song, and Guoqing Sun. "Analysis of handling and storage of liquefied natural gas tank container." *International Journal of Smart Grid and Clean Energy* 10.4 (2021): 310–315. DOI: 10.12720/sgce.10.4.310-315.
24. Chart industries official website. Web. 31 July 2022 <<https://www.chartindustries.com/Products/ISO-Containers>>.
25. *2022 Global tank container fleet survey*. Surbiton, United Kingdom: ITCO, 2022.
26. Alifirova, E. "Chtoby ne bylo kak proshloi zimoi. Kitai testiruet dostavku SPG tank-konteinerami s yuga na sever." *Neftegaz.ru*. Web. 5 July 2022 <<https://neftegaz.ru/news/transport-and-storage/196527-htoby-ne-bylo-kak-proshloy-zimoy-kitay-testiruet-dostavku-spg-tank-konteynerami-s-yuga-na-sever>>.
27. Alifirova, E. "Tiger Gas poluchila vtoroi konteynerovoz dlya postavok SPG v ISO-konteinerakh." *Neftegaz.ru*. Web. 5 July 2022 <<https://neftegaz.ru/news/transport-and-storage/725755-tiger-gas-poluchila-vtoroy-konteynerovoz-dlya-postavok-spg-v-iso-konteynerakh>>.
28. Gaslink official website. Web. 8 July 2022 <<https://www.gaslink.pt/gasoduto-virtual>>.
29. Klimentiev, A. M. Ishmuratova, D. Sun, A. K. Haug, I. Kirilkina, A. Talipov, D. Huseinov, V. Kiushkina, S. Lentiev, A. Suldin, and V. Karasevich. *Spravochnye materialy. Karta rossiiskoi SPG otrasli 2022*. 2022.
30. Alderman, John A. "Introduction to LNG safety." *Process Safety Progress* 24.3 (2005): 144–151. DOI: 10.1002/prs.10085.

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРЕ

Купцов Николай Владимирович —
кандидат технических наук, руководитель
направления по планированию и инвестициям
ООО «Газпромнефть НТЦ»
190000, Российская Федерация, Санкт-Петербург,
наб. реки Мойки, 75–79
e-mail: kuptsov.nv@gazprom-neft.ru,
kuptsov.nikolay@gmail.com

INFORMATION ABOUT THE AUTHOR

Kuptsov, Nikolay V. —
PhD,
Planning & Investment Manager
Gazpromneft Science & Technology Center
75–79 Moika River Emb., St. Petersburg,
19000, Russian Federation
e-mail: kuptsov.nv@gazprom-neft.ru,
kuptsov.nikolay@gmail.com

Лилль Артем Викторович — техник
ФГБОУ ВО «ГУМРФ имени адмирала
С. О. Макарова»
198035, Российская Федерация, Санкт-Петербург,
ул. Двинская, 5/7
e-mail: artemgift890@gmail.com

Lill', Artem V. — Technician
Admiral Makarov State University of Maritime
and Inland Shipping
5/7 Dvinskaya Str., St. Petersburg, 198035,
Russian Federation
e-mail: artemgift890@gmail.com

*Статья поступила в редакцию 26 сентября 2022 г.
Received: September 26, 2022.*

ANALYSIS OF REGULATORY DOCUMENTATION ON SEAPORTS DESIGN IN TERMS OF TECHNOLOGICAL PROCESSES AUTOMATION AT CONTAINER TERMINALS

I. V. Zub¹, Yu. E. Ezhov¹, G. D. Kasatkin²

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

² — LENMORNIIPROEKT, JSC, St. Petersburg, Russian Federation

Seaports occupy one of the leading places in the foreign trade turnover of Russia. It is emphasized that the strategy of maritime activity of the Russian Federation provides for an increase in competitiveness through the modernization of existing and the construction of new terminals and seaports, which will give impetus to the development of ports and container terminals. The process of determining the port specialization and organizing its work, which is one of the initial stages for the planning process of the port construction or reconstruction, is investigated. The factors influencing not only economic and financial decisions, but also the introduction of information technologies that contribute to the automation of technological processes of the port, are also investigated. It is noted that new technologies have found application in ports where the production of loading and unloading operations is a repetitive process that can be modeled and programmed. It is indicated that most of the technological operations for the production of loading and unloading operations on modern lifting and transport equipment are automated, which increases the port efficiency, but not all ports can be automated, this is due to the possibility of accounting and control of the cargo unit, its location and shelf life, as well as identification. At terminals specializing in the bulk cargo transshipment, there are no such tasks for the management of lifting and transport equipment as at container terminals and terminals for the transshipment of bulk cargo and liquefied natural gas, which are initially automated. Automation is incorporated into the project during the construction of a new or reconstruction of an existing port or container terminal. The main documents that guide designers in the development of the project have been analyzed. Among them are "Set of rules 316.1325800.2017. Container terminals. Regulations of projecting", "Set of rules 350.1326000.2018. Norms for technological design of sea ports" and "Set of rules 262.1325800.2016. Container yard and terminal devices in industrial and transport manufacture. Terms of design and construction". They are obsolete and do not reflect modern requirements for technological processes. Special attention is paid to the fact that modern documents meeting the latest technological and technical requirements are necessary for the design of modern ports and terminals.

Keywords: container terminal, automation, regulatory documents, technological processes, lifting and transport equipment.

For citation:

Zub, Igor V., Yurii E. Ezhov, and Gleb 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 imeni admirala S. O. Makarova* 15.2 (2023): 262–271. DOI: 10.21821/2309-5180-2023-15-2-262-271.

УДК 656.013: 656.073.07: 656.615

АНАЛИЗ НОРМАТИВНОЙ ДОКУМЕНТАЦИИ ПО ПРОЕКТИРОВАНИЮ МОРСКИХ ПОРТОВ В ЧАСТИ АВТОМАТИЗАЦИИ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОВ НА КОНТЕЙНЕРНЫХ ТЕРМИНАЛАХ

И. В. Зуб¹, Ю. Е. Ежов¹, Г. Д. Касаткин²

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

² — АО «ЛЕНМОРНИИПРОЕКТ», Санкт-Петербург, Российская Федерация

В работе отмечается, что морские порты занимают одно из ведущих мест во внешнеторговом грузообороте России. Подчеркивается, что стратегия морской деятельности Российской Федерации предусматривает

повышение конкурентоспособности за счет модернизации действующих и строительства новых терминалов и морских портов, что дает импульс для развития портов и контейнерных терминалов. Исследован процесс определения специализации порта и организации его работы, являющийся одним из начальных этапов процесса планирования строительства или реконструкции порта, а также факторы, оказывающие влияние не только на экономические и финансовые решения, но и на внедрение информационных технологий, способствующих автоматизации технологических процессов порта. Отмечается, что новые технологии нашли применение в портах, где производство погрузочно-разгрузочных работ представляет собой повторяющийся процесс, который может быть смоделирован и запрограммирован. Указывается, что большинство технологических операций по производству погрузочно-разгрузочных работ на современном подъемно-транспортном оборудовании автоматизировано, что повышает эффективность работы порта, однако не все порты могут быть автоматизированы ввиду сложности учета и контроля грузовой единицы, ее места и срока хранения, а также идентификации. На терминалах, специализирующихся на перевалке насыпных и навалочных грузов, не возникает таких задач по управлению подъемно-транспортным оборудованием, как на контейнерных терминалах, терминалах по перегрузке наливных грузов и сжиженного природного газа, которые изначально являются автоматизированными. Автоматизация закладывается в проект при строительстве нового или реконструкции уже действующего порта или контейнерного терминала. Проанализированы основные документы, которыми руководствуются проектировщики при разработке проекта: «СП 316.1325800.2017. Терминалы контейнерные. Правила проектирования», «СП 350.1326000.2018. Нормы технологического проектирования морских портов» и «СП 262.1325800.2016. «Свод правил. Контейнерные площадки и терминальные устройства на предприятиях промышленности и транспорта», которые морально устарели и не отражают современных требований к технологическим процессам. Особое внимание обращается на то, что для проектирования современных портов и терминалов необходимы современные, отвечающие последним технологическим и техническим требованиям документы.

Ключевые слова: контейнерный терминал, автоматизация, нормативные документы, технологические процессы, подъемно-транспортное оборудование.

Для цитирования:

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 имени адмирала С. О. Макарова. — 2023. — Т. 15. — № 2. — С. 262–271. DOI: 10.21821/2309-5180-2023-15-2-262-271.

Введение (Introduction)

Морские порты занимают одно из ведущих мест во внешнеторговом грузообороте нашей страны. Стратегия морской деятельности Российской Федерации (РФ) предусматривает повышение конкурентоспособности за счет модернизации действующих и строительства новых терминалов и морских портов, что оказывает позитивное влияние на развитие территорий, связанных с морской деятельностью [1]. Развитие транспортной системы регионов позволит создать сеть инновационных кластеров и центров экономического развития [2].

События 2020–2022 г. оказали влияние на направление логистических потоков, что может положительно отразиться на строительстве или реконструкции портов северного, дальневосточного и каспийского бассейнов. Одним из начальных этапов процесса планирования строительства или реконструкции является определение специализации порта и организации его работы. Указанные факторы оказывают влияние не только на экономические и финансовые решения, но и на внедрение информационных технологий, способствующих автоматизации технологических процессов порта. Информационные технологии нашли применение в портах, где производство погрузочно-разгрузочных работ (ПРР) представляет собой повторяющийся процесс, который может быть смоделирован и запрограммирован [3]. С помощью современного подъемно-транспортного оборудования (ПТО) автоматизирована большая часть технологических операций по производству ПРР, что повышает эффективность работы порта.

Ритмичная работа морских портов является важным фактором для обеспечения функционирования транспортной системы РФ. Для обеспечения работы портов необходима соответствующая инфраструктура и ПТО. Стратегией развития российского транспорта определены основные направления: строительство и реконструкция транспортной инфраструктуры, сокращение времени обработки транспортных средств (ТС), внедрение современных технологий производства ПРР [1], [2].

Автоматизированное ПТО способствует увеличению скорости обработки ТС, в том числе судов, имеющих тенденцию к увеличению дедевейта. Автоматизация процессов ПРР способствует сокращению стоянки судов под обработкой, а автоматизация портовых операций — развитию как порта, так и региона в целом, обеспечивая взаимодействие между всеми участниками процесса [4], [5]. Кроме того, автоматизация позволяет уменьшить участие человека в операциях терминала: технологических (обработка ТС и складирование контейнеров), документообороте, а также планировании и управлении, что обеспечивает повышение эффективности работы и увеличение пропускной способности порта. Морские порты в большинстве случаев расположены вблизи или в черте больших городов. От взаимодействия и реакции на различные изменения в области движения водного и других видов транспорта как внутри региона расположения порта, так и в прилегающих районах зависит его пропускная способность и конкурентоспособность. На развитие портовой инфраструктуры оказывает влияние географическое расположение порта и доступность к транспортным узлам.

Целью настоящей работы является анализ действующей нормативной документации по проектированию и реконструкции морских портов и контейнерных терминалов, а также научных работ по автоматизации технологических и других терминальных услуг.

Методы и материалы (Methods and Materials)

Используемые методы исследования: анализ научной литературы и руководящих документов, изучающих вопросы автоматизации и проектирования контейнерных терминалов (КТ), а также системный анализ полученной информации позволяют определить основные тенденции автоматизации контейнерных терминалов. Автоматизация закладывается в проект при строительстве нового или реконструкции уже действующего порта или КТ. Основными документами, которыми руководствуются проектировщики при разработке проекта, являются: «СП 316.1325800.2017. Терминалы контейнерные. Правила проектирования» [6], «СП 350.1326000.2018. Нормы технологического проектирования морских портов» [7] и «СП 262.1325800.2016. «Свод правил. Контейнерные площадки и терминальные устройства на предприятиях промышленности и транспорта. Правила проектирования и строительства» [8].

Проект должен обеспечивать оптимальную работу КТ, включая технологические операции, а также взаимодействие всех видов ТС и систем управления. В технологической части проекта обосновывается целесообразность автоматизированной системы управления КТ (АСУ КТ) и приводится перечень автоматизируемых технологических операций. В состав АСУ КТ входит две системы: *управление информационными процессами* и *управление ПТО* [7]. Для создания АСУ ПТО необходимо, чтобы это оборудование было изготовлено для эксплуатации в автоматическом или автоматизированном режиме. Внедрение таких систем будет способствовать минимизации занятости докеров-механизаторов на ПРР, что снижает себестоимость работ и вероятность травматизма. Еще одно отличие автоматизированных КТ заключается в том, что использование такой системы позволяет уменьшить количество штивок контейнеров и обеспечивает высокую плотность складирования [9].

В работе [10] выполнено исследование работы КТ в период пандемии, в частности *автоматизированных и полуавтоматизированных* КТ. Производительность терминалов измерялась по следующим критериям: пропускная способность, количество обработанных судов и время стоянки. Полностью автоматизированные контейнерные терминалы за исследуемый период времени показали лучшие эксплуатационные характеристики, чем не полностью автоматизированные терминалы. В первом случае значительно увеличилась пропускная способность (на 30 %), сократилось время стоянки судна и увеличилось количество прибывающих судов. На полуавтоматизированных КТ пропускная способность снизилась примерно на 2 %. Автоматизированные КТ увеличили чистую прибыль на 25 %, а на неавтоматизированных КТ прибыль уменьшилась на 2 %. Таким образом, автоматизированные КТ показали, что они способны к адекватному реагированию на кризисы и обеспечивают ритмичную работу.

Следует отметить, что не все порты могут быть автоматизированы, это связано с возможностью учета и контроля грузовой единицы, ее места и срока хранения, идентификации. На терминалах, специализирующихся на перевалке насыпных и навалочных грузов, не возникает таких задач по управлению ПТО, как на КТ. Терминалы по перегрузке наливных грузов и сжиженного природного газа (СПГ) изначально выполняются автоматизированными. Если не рассматривать процесс сжижения газа, то непосредственно процесс перегрузки СПГ и наливных грузов технологически несложен, поскольку все оборудование выполнено для эксплуатации в автоматизированном режиме [11].

Контейнер как грузовая единица имеет *префикс* и *номер*, позволяющие его идентифицировать. Определенный алгоритм обработки контейнеров способствует развитию автоматизированного ПТО. Для КТ созданы автоматизированные ТС и многоярусные системы хранения, разработаны системы поиска контейнеров (например, Solvo). Для точного позиционирования контейнеров на судне при крене и деференте спредер контейнерных перегружателей оборудуется лазерными датчиками¹, системой, способствующей установке его параллельно контейнеру, и системой гашения колебаний², что ускоряет процесс ПТР. Критерием качества ПТР является время обработки ТС. Автоматическая система сбора и обработки информации о прибытии ТС, моделирующая процесс функционирования грузовых фронтов порта, способствует принятию управленческих решений [12], а также позволяет создать *паспорт перевозки*, способствующий введению *блокчейн-технологий* [13].

Преимущества автоматизации должны быть реализованы на КТ, как вновь строящихся, так и подлежащих реконструкции. основополагающими документами для проектировщиков являются указанные ранее своды правил (СП) [6]–[8]. При изучении данных СП [7] необходимо обратить внимание на то, что там ничего не сказано об автоматизации процессов КТ. При расчете пропускной способности (формулы (1)–(5)) морского грузового фронта автоматизация учитывается, в соответствии с нормами, одним коэффициентом:

$$P_{\text{год}} = \frac{30 M_{\text{сут}} K_{\text{мет}} K_{\text{зан}} N_{\text{м}}}{K_{\text{мес}}}, \quad (1)$$

где $P_{\text{год}}$ — годовая пропускная способность причала;

$M_{\text{сут}}$ — валовая интенсивность грузовых работ при обработке расчетных типов судов;

$K_{\text{мет}}$ — коэффициент использования бюджета рабочего времени причала, учитывающий простои причала по метеорологическим факторам в месяц максимальной работы;

$K_{\text{зан}}$ — коэффициент занятости причалов обработкой судов;

$N_{\text{м}}$ — продолжительность навигации в месяцах;

$K_{\text{мес}}$ — коэффициент месячной неравномерности грузопотока.

Валовая интенсивность грузовых работ определяется в виде

$$M_{\text{сут}} = \frac{1}{\sum_{j=1}^m \frac{A_j (t_{\text{гр}j} + t_{\text{п.с}j})}{2 \cdot 24 D_j K_{\text{кв}}}}, \quad (2)$$

где m — количество типов расчетных судов;

A_j — доля расчетных судов типа j в общем объеме расчетного грузооборота;

$t_{\text{гр}j}$ — время занятости причала выполнением грузовых работ при обработке судна типа j , ч;

$t_{\text{п.с}j}$ — среднее время занятости причала под вспомогательными производственными операциями судна типа j , ч;

¹ Пат. 2703365 Российская Федерация, МПК В65G 65/30, В66C 1/66, В66C 13/46. Способ перегрузки контейнеров / И. В. Зуб, Ю. Е. Ежов, В. Л. Щемелёв; заяв. и патентообл. Государств. ун-т морского и речного флота им. адм. С. О. Макарова. — № 2018145794; Заявл. 21.12.2018; опубл. 16.10.2019. Бюл. № 29.

² Пат. 200514 U1 Российская Федерация, МПК В66C 13/08, В66C 1/00. Грузозахватное устройство контейнерного крана / Ю. Е. Ежов, И. В. Зуб, В. Л. Щемелев; заяв. и патентообл. Государств. ун-т морского и речного флота им. адм. С. О. Макарова. — № 2020122846; Заявл. 10.07.2020; опубл. 28.10.2020.

D_j — контейнеровместимость судна типа j , конт.;

$K_{кв}$ — коэффициент использования контейнеровместимости судна (рекомендуемое значение 0,85).

Время занятости причала вспомогательными производственными операциями судна определяется по формуле

$$t_{грj} = \frac{2D_j K_{кв}}{M_j}, \quad (3)$$

где M_j — чистая интенсивность грузовых работ в конт./ч,

Чистая интенсивность грузовых работ

$$M_j = P_{тл} N_{тл} K_{рпкп}. \quad (4)$$

Здесь $P_{тл}$ — эксплуатационная производительность технологической линии, конт./ч;

$N_{тл}$ — количество технологических линий;

$K_{рпкп}$ — коэффициент, учитывающий снижение производительности в зависимости от одновременно работающих на одном судне причальных контейнерных перегружателей.

Эксплуатационная производительность технологической линии

$$P_{тл} = \frac{P_{тл}^m \cdot K}{1,067}, \quad (5)$$

где $P_{тл}^m$ — техническая производительность технологической линии, конт./ч;

1,0677 — коэффициент, учитывающий время обеденного перерыва;

K — коэффициент, учитывающий переход от технической к эксплуатационной производительности технологической линии (принимается при механизированном способе производства грузовых работ $K = 0,75$, при автоматизированном — $K = 0,9$).

Из приведенных формул видно, что автоматизация учитывается только при переходе от технической производительности к эксплуатационной. В СП [7] название приложения: «У2. Схемы механизации для терминалов, специализированных для контейнерных грузов», вызывает недоумение, поскольку механизация — это всегда переход от ручного труда к автоматизированному. Контейнеры никогда не перегружались вручную и контейнерные терминалы во всем мире переходят на *автоматизированное или автоматическое управление*. Поэтому правильнее в данном случае было бы использовать термин «технологические схемы». Также некорректно следующее выражение: «специализированных контейнерных грузов». Грузы, находящиеся в контейнере, могут быть различными: как универсальными, так и специализированными. В соответствии с ГОСТом Р 53350–2009¹ «грузовой контейнер — единица транспортного оборудования, имеющая постоянную техническую характеристику, обеспечивающую прочность для многократного применения». Если сравнить СП [7], который заменил «РД 31.3.05–97. Нормы технологического проектирования морских портов» [14], то в нем практически нет изменений. Разработчики не учли произошедшие за двадцать лет изменения, в течение которых контейнерные терминалы были оснащены современной техникой, а также того, что новые технологические схемы разработаны с учетом процессов автоматизации. Современное ПТО позволяет складировать контейнеры в 5–6 ярусов, что увеличивает эффективность использования площади и емкости терминала. При необходимости дополнительный ярус позволяет увеличить срок хранения контейнеров, что может дать дополнительную прибыль или заинтересовать клиента увеличенным сроком бесплатного хранения.

В СП [9] в п. 4.2.1.1 отмечается, что компоновка порта выполняется с учетом требований Градостроительного кодекса РФ к территориальному планированию, а следовательно, проект должен пройти процедуру государственной экспертизы. Идентичное требование содержится также в СП [6]. В процессе экспертизы проекта эксперты должны руководствоваться СП, которые утверждены соответствующими министерствами Российской Федерации. При обнаружении каких-либо несоот-

¹ ГОСТ Р 53350–2009 «Контейнеры грузовые серии 1. Классификация, размеры и масса». М.: Стандартиформ, 2018. 16 с.

ветствий проект будет возвращен на доработку или обоснование принятых в нем технологических и других решений. Морально устаревшие технологические решения, законодательно закрепленные в СП [7], могут привести к тому, что заказчик не сможет получить одобрение проекта на строительство или реконструкцию современного КТ.

В СП [6], [8] дано краткое описание технологических процессов, рекомендуемые виды ПТО, а также уделено внимание системам управления с многочисленными функциями, охватывающими все виды деятельности КТ. Система управления должна отражать информацию о контейнере: его местоположение в реальном времени и статус (хранение, перетарка, ремонт и др.). К задачам управления относится отслеживание местоположения ПТО, что позволяет оперативно управлять обработкой ТС, а также формирование отчетов, сопроводительных и других документов. В СП [6] указывается, что автоматическая система управления ПТО должна разрабатываться изготовителем оборудования, а также в этом документе и в СП [8] рассмотрены технологические решения со среднетоннажными контейнерами, которые в настоящее время практически не используются.

В работе [15] предложена концепция автоматизации терминала, позволяющая сократить и оптимизировать рабочие процессы, рекомендовано объединить терминальных операторов, грузовладельцев и грузоперевозчиков в единую региональную информационную платформу. В базу этой платформы будет включена информация о ПТО, ТС, а также геолокация контейнеров, что позволит оптимизировать трафик движения ТС под погрузку / выгрузку. При этом также существует противоположное мнение. Так, в отчете Международного транспортного форума [16] приводятся доказательства того, что производительность в автоматизированных портах не отличается от производительности в портах без средств автоматизации. Более важными факторами, влияющими на производительность порта, являются *географическое положение и его размеры*. По данным на 2021 г., в той или иной степени автоматизировано 53 КТ, что составляет всего 4 % от их общего количества.

Степень автоматизации терминальных операций различна: большинство автоматизированных систем отслеживают работу ПТР и хранение контейнеров, далее происходит процесс автоматизации транспортных средств с применением автоматических тележек (AGV) и автономных терминальных тягачей (ATs), работающих между причалом и складом. Таким образом, можно сделать вывод о том, что автоматизация КТ дает преимущества только при определенных условиях и, следовательно, для ограниченной группы терминалов, это в первую очередь КТ, имеющие стабильный грузооборот. Напротив, КТ, не имеющие стабильного грузооборота, лучше обслуживаются за счет меньшей автоматизации, обеспечивающей большую гибкость при диверсификации грузопотока. Кроме того, существует и *социальная проблема*. Внедрение автоматизации приводит к социальным конфликтам, так как сокращается персонал, поэтому в работе предлагается также рассматривать *влияние автоматизации КТ на занятость населения в регионе*.

Результаты (Results)

Несоответствие современным требованиям нормативной документации, которой руководствуются проектировщики, не позволяют создать новые и реконструировать действующие КТ. Однако проблема состоит не только в этом, большинство КТ эксплуатируют ПТО, которое не автоматизировано. В стратегии развития морских портов [2] ставятся задачи не только обновить имеющееся ПТО, но и достичь такого уровня производства отечественного ПТО, которое бы не уступало импортному. На зарубежных КТ эксплуатируются AGV, которые работают без водителя и управляются с помощью датчиков. Место хранения контейнеров определяет компьютер. Контейнеры складируются в зависимости от срока их хранения [17]. Кроме AGV введены в эксплуатацию ATs.

Беспилотные ATs управляются посредством цифровой карты, загружаемой в систему управления парком тягачей. Карта, созданная с использованием светочувствительной технологии с помощью лазера и приемника, в сочетании с 360° камерами обеспечивает круговой обзор в режиме реального времени. Создаваемая 3-D карта окрестностей AT позволяет мгновенно реагировать на любые возникающие помехи. Система позиционирования дает возможность достичь точности, равной 2 см, и точности

угла поворота, равной $0,5^\circ$ [18]. Определение местоположения ПТО сокращает дополнительные перемещения, уменьшая эксплуатационные расходы. Анализ поступающей информации АСУ позволит определять и резервировать определенное время прибытия ТС для погрузки / разгрузки.

Внедрению проекта автоматизации на КТ, получившего в ряде стран название iTerminals 4.0, способствовал новый подход к использованию интернет-технологий «Индустрия 4.0». В задачи данного проекта входит контроль за ПТО, сбор данных, а также предоставление отчетности и моделей бизнес-аналитики. Интернет-технология «Индустрия 4.0» в некоторых случаях называется *четвертой промышленной революцией*. Авторами работ [19], [20] отмечается, что четвертая промышленная революция в развитии информационных технологий — это «шестой технологический уклад», который в России практически отсутствует, так как не везде внедрение автоматизированных систем дает положительные результаты. В работе [21] рассмотрены проблемы, возникающие при попытке массового введения в действие терминальных операционных систем (TOS) на КТ: нехватка квалифицированных кадров, а также сочетание сложных технологических, организационных и экологических факторов.

Обсуждение (Discussion)

Вопрос автоматизации КТ актуален несмотря на имеющиеся противоположные точки зрения. Преимущества автоматизации очевидны — это ускорение документооборота и процесса ПРР, исключая участие человека в процессе выполнения многих монотонных операций, повышение безопасности труда (минимизация или полное отсутствие сотрудников в зоне производства ПРР), отслеживание прибытия и убытия ТС, что способствует отслеживанию *пиков нагрузки* на ПТО и образованию «окон», позволяющих без ущерба для ПРР проведение технического обслуживания ПТО. Сторонники противоположного взгляда на решение данного вопроса выдвигают свои аргументы: высокая стоимость автоматизации, сокращение рабочих мест, что может привести к социальным конфликтам и отсутствию гибкости технологических процессов при диверсификации грузопотоков. Благодаря наличию диаметрально противоположных взглядов решение о внедрении автоматизации при строительстве или реконструкции порта должно приниматься исходя из *стратегических целей*, а также степени автоматизации технологических, управленческих и других процессов предполагаемых партнеров.

Заключение (Conclusion)

Внешнеэкономическая деятельность России в основном осуществляется через морские порты. Каждый порт или КТ в своем составе имеет несколько стивидорных компаний, каждая из которых является отдельным юридическим лицом. Часто между этими компаниями, а также между зарубежными терминалами возникает конкуренция. Строительство новых и реконструкция действующих портов повышают конкурентоспособность портовой отрасли на мировом рынке морских перевозок и на внешнем рынке. Одним из способов повышения конкурентоспособности портов служит автоматизация, способствующая ускорению ПРР, повышению безопасности труда, а также объединению всех участников процесса в единую информационную систему. Эффективность работы автоматизированные терминалы показали во время пандемии [10]. Следует отметить, что для автоматизации портов или отдельных портовых операций необходима разработка нового СП, поскольку действующий [7] морально устарел и не отражает современные условия технологических процессов. Поэтому специалистам проектных организаций при создании проекта нужны современные, отвечающие последним технологическим и техническим требованиям, документы.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Стратегии развития морской деятельности Российской Федерации до 2030 года. Утверждена распоряжением Правительства Российской Федерации от 30 августа 2019 г. № 1930-р [Электронный ресурс]. — Режим доступа: <http://government.ru/docs/37755/> (дата обращения 16.12.2022).

2. Стратегия развития морской портовой инфраструктуры России до 2030 года. — М., 2015. — 284 с. [Электронный ресурс]. — Режим доступа: https://www.rosmorport.ru/media/File/seastrategy/strategy_150430.pdf (дата обращения 02.01.2023).
3. 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 имени адмирала С. О. Макарова. — 2022. — Т. 14. — № 2. — С. 218–229. DOI: 10.21821/2309-5180-2022-14-2-218-229.
4. Грошев Г. М. Автоматизация информационного обеспечения независимых участников мультимодальных перевозок контейнеров в морской порт в транспортном узле / Г. М. Грошев, Н. В. Климова, А. В. Сугоровский, А. Д. Манаков, П. Е. Булавский // Автоматика на транспорте. — 2018. — Т. 4. — № 3. — С. 315–332.
5. Стрельников Д. Д. Вектор развития российских морских портов / Д. Д. Стрельников, И. А. Стрельникова // Эксплуатация морского транспорта. — 2021. — № 3 (100). — С. 55–59.
6. СП 316.1325800.2017. Терминалы контейнерные. Правила проектирования. — М.: Стандартинформ, 2018. — 54 с.
7. СП 350.1326000.2018. Нормы технологического проектирования морских портов. — М.: Стандартинформ, 2018. — 218 с.
8. СП 262.1325800.2016. Контейнерные площадки и терминальные устройства на предприятиях промышленности и транспорта. Правила проектирования и строительства. — М.: Стандартинформ, 2017. — 28 с.
9. *Notteboom T. Port Economics, Management and Policy* / T. Notteboom, A. Pallis, J-P. Rodrigue. — Routledge, 2022. — 642 p.
10. Kim B. Study on Comparing the Performance of Fully Automated Container Terminals during the COVID-19 Pandemic / B. Kim, G. Kim, M. Kang // Sustainability. — 2022. — Vol. 14. — Is. 15. — Pp. 9415. DOI: 10.3390/su14159415.
11. Музлова Г. Особенности автоматизации портовых терминалов в России / Г. Музлова // Морские порты. — 2014. — № 9 (130). — С. 46–49.
12. Васин А. В. Моделирование оптимальной конфигурации морского порта / А. В. Васин, Д. С. Захаров, Л. В. Анненков // Вестник Государственного университета морского и речного флота имени адмирала С. О. Макарова. — 2019. — Т. 11. — № 4. — С. 662–669. DOI: 10.21821/2309-5180-2019-11-4-662-669.
13. Кузнецов А. Л. Направления цифровизации транспортной отрасли / А. Л. Кузнецов, А. В. Кириченко, В. Н. Щербакова-Слюсаренко // Вестник Государственного университета морского и речного флота имени адмирала С. О. Макарова. — 2018. — Т. 10. — № 6. — С. 1179–1190. DOI: 10.21821/2309-5180-2018-10-6-1179-1190.
14. РД 31.3.05–97. Нормы технологического проектирования морских портов. — М., 1998. — 177 с.
15. Цифровые решения для работы сухих портов. — 2020. — 18 с. [Электронный ресурс]. — Режим доступа: <https://www.unescap.org/sites/default/files/%D0%A6%D0%B8%D1%84%D1%80%D0%BE%D0%B2%D1%8B%D0%B5%20%D1%80%D0%B5%D1%88%D0%B5%D0%BD%D0%B8%D0%B5%20%D0%B4%D0%BB%D1%8F%20%D1%81%D1%83%D1%85%D0%B8%D1%85%20%D0%BF%D0%BE%D1%80%D1%82%D0%BE%D0%B2%202020%5B1970%5D.pdf> (дата обращения: 03.01.2023).
16. Container Port Automation: Impacts and Implications [Электронный ресурс]. — Режим доступа: <https://www.itf-oecd.org/sites/default/files/docs/container-port-automation.pdf> (дата обращения 07.01.2023).
17. Sensors in the Rotterdam container terminal by Dipl.-Ing. Andreas Biniasch // Port strategy [Электронный ресурс]. — Режим доступа: <https://www.portstrategy.com/ps-directory/ifm-electronic/sensors-in-the-rotterdam-container-terminal-by-dipl-ing-andreas-biniasch/1468290.supplierarticle> (дата обращения 03.01.2023).
18. Autonomous truck first // Port strategy [Электронный ресурс]. — Режим доступа: <https://www.portstrategy.com/news/autonomous-truck-first/1479204.article> (дата обращения 03.01.2023).
19. Тебекин А. В. Анализ признаков промышленной революции в инициативе «индустрия 4.0» / А. В. Тебекин, Е. Г. Анисимов, П. А. Тебекин, А. А. Егорова // Транспортное дело России. — 2021. — № 2. — С. 13–21. DOI: 10.52375/20728689_2021_2_13.
20. Шушунова Т. Н. Влияние обострения глобальных вызовов на стратегию цифровой трансформации наукоемких производств / Т. Н. Шушунова, В. Ф. Вакуленко, А. В. Самороков, К. Ю. Лашманкина // Транспортное дело России. — 2022. — № 1. — С. 131–133. DOI: 10.52375/20728689_2022_1_131.
21. Gekara V. O. Challenges of implementing container terminal operating system: The case of the port of Mombasa from the Belt and Road Initiative (BRI) perspective / V. O. Gekara, X. V. T. Nguyen // Journal of International Logistics and Trade. — 2020. — Vol. 18. — Is. 1. — Pp. 49–60. DOI: 10.24006/jilt.2020.18.1.049.

REFERENCES

1. Strategii razvitiya morskoi deyatel'nosti Rossiiskoi Federatsii do 2030 goda. Web. 16 Dec. 2022 <<http://government.ru/docs/37755/>>.
2. *Strategiya razvitiya morskoi portovoi infrastruktury Rossii do 2030 goda*. M., 2015. Web. 2 Jan. 2023 <https://www.rosморport.ru/media/File/seastrategy/strategy_150430.pdf>.
3. Zub, Igor V., Yurii E. Ezhov, and Tatjana S. Angolenko. "Information systems as a tool for improving the seaports productivity." *Vestnik Gosudarstvennogo universiteta morskogo i rechnogo flota imeni admirala S. O. Makarova* 14.2 (2022): 218–229. DOI: 10.21821/2309-5180-2022-14-2-218-229.
4. Groshev, Gennady M., Nadezhda V. Klimova, Anton V. Sugorovsky, Alexander D. Manakov, and Peter Ye. Bulavsky. "Automation of information support independent participants of multimodal transportation of containers in sea port and transport hub." *Transport automation research* 4.3 (2018): 315–332.
5. Strel'nikov, D.D., and I. A. Strel'nikova. "Vector of development of Russian seaports." *Ekspluatatsiya morskogo transporta* 3(100) (2021): 55–59.
6. Set of rules 316.1325800.2017. Container terminals. Regulations of projecting. M.: Standartinform, 2018.
7. Set of rules 350.1326000.2018. Norms for technological design of sea ports. M.: Standartinform, 2018.
8. Set of rules 262.1325800.2016. Container yard and terminal devices in industrial and transport manufacture. Terms of design and construction. M.: Standartinform, 2017.
9. Notteboom, Theo, Athanasios Pallis, and Jean-Paul Rodrigue. *Port Economics, Management and Policy*. Routledge, 2022.
10. Kim, Bokyoung, Geunsub Kim, and Moohong Kang. "Study on Comparing the Performance of Fully Automated Container Terminals during the COVID-19 Pandemic." *Sustainability* 14.15 (2022): 9415. DOI: 10.3390/su14159415.
11. Muzlova, G. "Osobennosti avtomatizatsii portovykh terminalov v Rossii." *Morskie porty* 9(130) (2014): 46–49.
12. Vasin, Andrei V., Dmitrii S. Zakharov, and Leonid V. Annenkov. "Modeling the optimal seaport configuration." *Vestnik Gosudarstvennogo universiteta morskogo i rechnogo flota imeni admirala S. O. Makarova* 11.4 (2019): 662–669. DOI: 10.21821/2309-5180-2019-11-4-662-669.
13. Kuznetsov, Aleksandr L., Aleksandr V. Kirichenko, and Victoria N. Shcherbakova-Slyusarenko. "The directions of the transport industry digitalization." *Vestnik Gosudarstvennogo universiteta morskogo i rechnogo flota imeni admirala S. O. Makarova* 10.6 (2018): 1179–1190. DOI: 10.21821/2309-5180-2018-10-6-1179-1190.
14. RD 31.3.05–97. Normy tekhnologicheskogo proektirovaniya morskikh portov. M., 1998.
15. Tsifrovye resheniya dlya raboty sukhikh portov. Web. 3 Jan. 2023 <<https://www.unescap.org/sites/default/files/%D0%A6%D0%B8%D1%84%D1%80%D0%BE%D0%B2%D1%8B%D0%B5%20%D1%80%D0%B5%D1%88%D0%B5%D0%BD%D0%B8%D0%B5%20%D0%B4%D0%BB%D1%8F%20%D1%81%D1%83%D1%85%D0%B8%D1%85%20%D0%BF%D0%BE%D1%80%D1%82%D0%BE%D0%B2%202020%5B11970%5D.pdf>>.
16. Container Port Automation: Impacts and Implications. Web. 7 Jan. 2023 <<https://www.itf-oecd.org/sites/default/files/docs/container-port-automation.pdf>>.
17. "Sensors in the Rotterdam container terminal by Dipl.-Ing. Andreas Biniasch." *Port strategy*. Web. 3 Jan. 2023 <<https://www.portstrategy.com/ps-directory/ifm-electronic/sensors-in-the-rotterdam-container-terminal-by-dipl-ing-andreas-biniasch/1468290.supplierarticle>>.
18. "Autonomous truck first." *Port strategy*. Web. 3 Jan. 2023 <<https://www.portstrategy.com/news/autonomous-truck-first/1479204.article>>.
19. Tebekin, A., E. Anisimov, P. Tebekin, and A. Egorova. "Analysis of signs of the industrial revolution in the Industry 4.0 initiative." *Transport business of Russia* 2 (2021): 13–21. DOI: 10.52375/20728689_2021_2_13.
20. Shushunova, T., V. Vakulenko, A. Samorokov, and K. Lashmankina. "The impact of the aggression of global challenges on the strategy of the digital transformation of school-intensive industries." *Transport business of Russia* 1 (2022): 131–133. DOI: 10.52375/20728689_2022_1_131.
21. Gekara, Victor Oyaro, and Xuan-Vi Thanh Nguyen. "Challenges of implementing container terminal operating system: The case of the port of Mombasa from the Belt and Road Initiative (BRI) perspective." *Journal of International Logistics and Trade* 18.1 (2020): 49–60. DOI: 10.24006/jilt.2020.18.1.049.

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

Ежов Юрий Евгеньевич —

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

Касаткин Глеб Денисович —

инженер 3 категории
АО «ЛЕНМОРНИИПРОЕКТ»
198035, Российская Федерация, Санкт-Петербург,
Межевой канал, д. 3, к. 2
e-mail: cool.gleb.1999@yandex.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

Ezhov, Yurii E. —

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

Kasatkin, Gleb D. —

3rd category engineer
LENMORNIIPROEKT, JSC
3/2 Mezhevoy Canal, St. Petersburg, 198035,
Russian Federation
e-mail: cool.gleb.1999@yandex.ru

Статья поступила в редакцию 17 января 2023 г.

Received: January 17, 2023.

ТЕХНОЛОГИЯ СУДОСТРОЕНИЯ, СУДОРЕМОНТА И ОРГАНИЗАЦИЯ СУДОСТРОИТЕЛЬНОГО ПРОИЗВОДСТВА

DOI: 10.21821/2309-5180-2023-15-2-272-281

PROSPECTS FOR REPLACING PRODUCTION LINES IN THE SHIPYARDS WORKSHOPS WITH MULTIFUNCTIONAL ASSEMBLY AND WELDING MANIPULATORS

E. G. Burmistrov¹, O. A. Shchegoleva², A. E. Burmistrova¹

¹ — Volga State University of Water Transport, Nizhny Novgorod, Russian Federation

² — Samara branch of Volga State University of Water Transport,
Samara, Russian Federation

Some aspects for improving the technical level and flexibility of assembly and welding production of domestic shipyards are discussed in the paper. It is noted that a number of shipyards have integrated mechanized production lines of foreign manufacturers: for metal processing, manufacture of ship hull structures, their painting, etc. As a rule, such lines are equipped with high-performance technological equipment; however, they are ineffective in conditions of small-scale production. The main reason is insufficient line loading. An alternative to such lines can be multifunctional complex mechanized and partially automated assembly and welding manipulators, which are a flexible production module equipped with an assembly and welding portal (or semi-portal) and a set of replaceable mounted assembly and welding equipment. The research purpose is an increase in the technical level and flexibility of assembly and welding production of domestic shipbuilding enterprises in the short term by replacing resource-producing and inefficient due to insufficient loading of mechanized production lines of foreign production with import-substituted multifunctional complex-mechanized assembly and welding manipulators. The subject of the research is a flexibly reconfigurable production system of a shipyard. Mechanized production lines of assembly and welding production and complex mechanized assembly and welding manipulators are accepted as objects of research. As a result of the research, the functionality of assembly and welding manipulators for the assembly of ship hull structures and a set of factors influencing the choice of their design schemes are determined. It is concluded that due to the extreme urgency of the issue considered in the paper, it is necessary to conduct a set of special studies on the theoretical justification of replacing inefficient mechanized production lines with complex mechanized multifunctional assembly and welding manipulators, and a range of priority tasks to achieve this goal is defined.

Keywords: flexible production systems, small-scale production, mechanized production line, assembly and welding manipulator.

For citation:

Burmistrov, Evgeny G., Olga A. Shchegoleva, and Anastasia E. Burmistrova. "Prospects for replacing production lines in the shipyards workshops with multifunctional assembly and welding manipulators." *Vestnik Gosudarstvennogo universiteta morskogo i rechnogo flota imeni admirala S. O. Makarova* 15.2 (2023): 272–281. DOI: 10.21821/2309-5180-2023-15-2-272-281.

УДК 629.12.002

ПЕРСПЕКТИВЫ ЗАМЕНЫ ПОТОЧНЫХ ЛИНИЙ В ЦЕХАХ ВЕРФЕЙ МНОГОФУНКЦИОНАЛЬНЫМИ СБОРОЧНО-СВАРОЧНЫМИ МАНИПУЛЯТОРАМИ

Е. Г. Бурмистров¹, О. А. Щеголева², А. Е. Бурмистрова¹

¹ — ФГБОУ ВО «Волжский государственный университет водного транспорта»,
Нижний Новгород, Российская Федерация

² — Самарский филиал ФГБОУ ВО «Волжский государственный университет
водного транспорта», Самара, Российская Федерация

В статье рассмотрены некоторые аспекты повышения технического уровня и гибкости сборочно-сварочного производства отечественных судостроительных верфей. Отмечается, что на ряде верфей внедрены комплексно-механизированные поточные линии зарубежных производителей для обработки металла, изготовления судовых корпусных конструкций, их окраски и т. п., которые, как правило, укомплектованы высокопроизводительным технологическим оборудованием и предназначены для работы в условиях крупносерийного поточного производства. При этом в условиях мелкосерийного производства они оказываются малоэффективными из-за недостаточной загрузки. Подчеркивается, что альтернативу таким линиям при мелкосерийном типе производства могут составить многофункциональные комплексно-механизированные и частично автоматизированные сборочно-сварочные манипуляторы, представляющие собой гибкий производственный модуль, оснащенный сборочно-сварочным порталом или полупорталом и комплектом сменно-навесного сборочного и сварочного оборудования. Целью исследования является повышение в краткосрочной перспективе технического уровня и гибкости сборочно-сварочного производства отечественных судостроительных предприятий путем замены вырабатывающих или уже выработавших свой ресурс и малоэффективных, ввиду недостаточной загрузки, механизированных поточных линий зарубежного производства импортозамещающими многофункциональными комплексно-механизированными сборочно-сварочными манипуляторами. Предметом исследования в статье является гибко перенастраиваемая производственная система судостроительной верфи. В качестве объектов исследования приняты механизированные поточные линии сборочно-сварочного производства и комплексно механизированные сборочно-сварочные манипуляторы. В результате исследований определен функционал сборочно-сварочных манипуляторов для сборки судовых корпусных конструкций и комплекс факторов, влияющих на выбор их конструктивных схем. Сделан вывод о том, что ввиду чрезвычайной актуальности рассматриваемого в статье вопроса необходимо проведение комплекса специальных исследований по теоретическому обоснованию замены малоэффективных механизированных поточных линий комплексно механизированными многофункциональными сборочно-сварочными манипуляторами и определен круг первоочередных задач для достижения этой цели.

Ключевые слова: мелкосерийное производство, механизированная поточная линия, комплексно механизированный сборочно-сварочный манипулятор.

Для цитирования:

Бурмистров Е. Г. Перспективы замены поточных линий в цехах верфей многофункциональными сборочно-сварочными манипуляторами / Е. Г. Бурмистров, О. А. Щеголева, А. Е. Бурмистрова // Вестник Государственного университета морского и речного флота имени адмирала С. О. Макарова. — 2023. — Т. 15. — № 2. — С. 272–281. DOI: 10.21821/2309-5180-2023-15-2-272-281.

Введение (Introduction)

Автоматизация производственных процессов в судостроении на основе применения высокопроизводительного технологического оборудования позиционируется в настоящее время в качестве одного из главных направлений обеспечения конкурентоспособности российских верфей [1]. В области судового корпусостроения проблема может быть решена либо применением гибких производственных систем (ГПС), включающих оборудование с ЧПУ и централизованный транспорт, либо управлением от ЭВМ [1]. Кроме ряда других преимуществ, ГПС позволяют значительно сократить простой оборудования, связанные с переходом к изготовлению изделий другой номенклатуры, и увеличить производительность труда [2].

Возможности ГПС сокращения простоев оборудования определяются тем, насколько быстро эти системы способны приспосабливаться к изготовлению изделий другого наименования, а также к другим изменениям в производственном процессе, т. е. тем, насколько велика их гибкость [3]. Опыт эксплуатации существующих ГПС, с одной стороны, указывает на значительную потерю их эффективности при низком коэффициенте использования технологического оборудования в составе ГПС из-за недостаточного обеспечения его технологической гибкости. С другой стороны, излишнее увеличение технологической гибкости ГПС связано с ростом стоимости и уменьшением технико-экономической эффективности их использования. Отсутствие в современной литературе публикаций, раскрывающих сущность технологической гибкости ГПС, и ранее изложенное обуславливают актуальность проведения специальных исследований.

Целью исследований является повышение технического уровня и гибкости сборочно-сварочного производства отечественных верфей в условиях их мало- и среднесерийной загрузки за счет

широкого применения multifunctional комплексно-механизированных сборочно-сварочных манипуляторов.

Методы и материалы (Methods and Materials)

В соответствии с ГОСТом 26228–90 «Системы производственные гибкие. Термины и определения, номенклатура показателей» под ГПС понимают совокупность в различных сочетаниях оборудования с ЧПУ, роботизированных технологических комплексов, гибких производственных модулей, отдельных единиц технологического оборудования и систем обеспечения их функционирования в автоматическом режиме в течение заданного интервала времени, обладающую свойством автоматизированной переналадки при производстве изделий произвольной номенклатуры в установленных пределах значений их характеристик.

Известно, что ГПС ориентированы главным образом на крупносерийный и массовый, т. е. поточный, тип производства изделий, так как применение именно такой формы организации производства повышает его эффективность, обеспечивая не только увеличение выпуска продукции, но и улучшение всех технико-экономических показателей работы предприятия. Необходимость постоянного поддержания ритма потока способствует лучшему использованию оборудования и рабочего времени основных производственных рабочих, а также сокращает потери рабочего времени. Непрерывность производственного процесса в условиях поточного производства обеспечивает также существенное снижение размеров потребных оборотных средств [4], [5]. При стабильности условий работы и специализации поточных производств уменьшается производственный брак и снижается себестоимость продукции. Поточное производство обеспечивает снижение трудоемкости продукции вследствие сокращения затрат времени на его производство и повышение уровня механизации процесса.

Основными факторами повышения эффективности поточного производства являются [6]: использование высокопроизводительного оборудования, применение новейших технологий, увеличение объема выпуска продукции, обеспечение ритмичности производства, повышение производительности труда, сокращение длительности производственного цикла, ускорение оборачиваемости оборотных средств, снижение себестоимости продукции, увеличение, прибыльности и рентабельности. Таким образом, внедрение ГПС в производство обеспечивает определенные производственные преимущества.

Результаты (Results)

В настоящее время можно считать окончательно сформировавшейся тенденцию перехода предприятий к *высокоавтоматизированному гибкому производству* [1], [2], [6], однако мелкосерийное и единичное производство остаются практически вне этого процесса [1]. В полной мере это относится и к современному судостроению, так как оно характеризуется изготовлением небольших партий разнородных изделий с изменяющейся номенклатурой, которые требуют частой переналадки технологического оборудования. Значительные вложения на создание ГПС при этом оказываются экономически нецелесообразными [2], [3]. Поэтому в настоящее время вопрос использования ГПС на судостроительных предприятиях с единичным и мелкосерийным типами производства остается нерешенным, приобретая все большую актуальность. В частности, весьма остро ставится вопрос о целесообразности дальнейшей эксплуатации существующих и разработки новых МПЛ для изготовления судовых корпусных конструкций, так как их использование при строительстве судов малыми сериями и в условиях нестабильной загрузки верфей имеет нюансы, в определенной степени решенные только для средне- и крупносерийного типов производства.

Обследование ряда предприятий с единичным и мелкосерийным типом производства позволило выявить ряд проблем, наличие которых делает невозможным внедрение на них ГПС или их элементов, т. е. при сохранении существующих подходов к организации производства такие предприятия могут остаться неконкурентоспособными. В то же время естественными являются попытки комплексно механизировать некоторые технологические процессы, так как в настоящее

время порядка 70 % от общего объема работ на предприятиях с единичным и мелкосерийным типами производства выполняются вручную. Применение таких мер позволяет сократить общую трудоемкость постройки судов в 1,5–2 раза, а также уменьшить или исключить количество необходимой технологической оснастки [5].

Одним из основных элементов ГПС в судостроении традиционно считаются *комплексно-механизированные поточные линии* (МПЛ) [2]. МПЛ широко используют в корпусообрабатывающем производстве (для предварительной обработки проката, для плазменной и лазерной резки, для формообразования деталей и др.), сборочно-сварочном производстве для изготовления узлов и секций корпуса судна, трубомедницком производстве (для изготовления труб-деталей и узлов трубопроводов), достроечных видах производств и т. п. Общий вид МПЛ для изготовления плоских секций приведен на рис. 1.

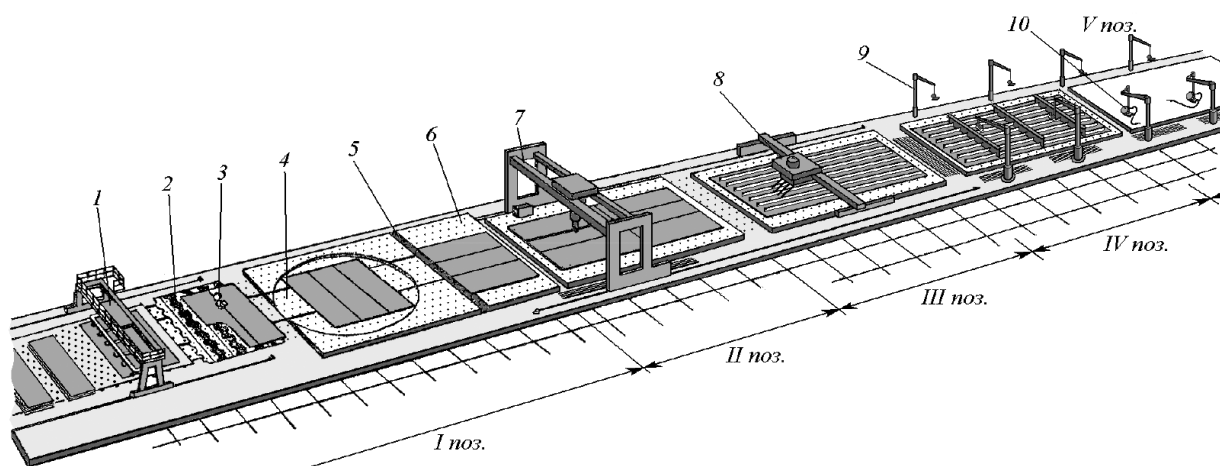


Рис. 1. Общий вид механизированной поточной линии для изготовления крупногабаритных плоскостных секций: 1 — листоукладчик; 2 — стенд с синхронным медным ползуном; 3 — автомат сварочный; 4 — разворотный круг; 5 — формирующее устройство; 6 — стенд сборочный с роликоопорами; 7 — перегружатель набора; 8 — агрегат для групповой приварки набора; 9 — грузовая стрела; 10 — сварочная стрела

Применение МПЛ имеет очевидные преимущества, так как обеспечивает высокую производительность и ритмичность производства при выпуске изделий большими партиями, способствует высвобождению численности квалифицированных рабочих для выполнения работ на других производственных участках и объектах, повышению производительности труда, сокращению длительности производственного цикла и т. п. [5], [6]. Однако статистика эксплуатации МПЛ показывает, что при всех достоинствах как элемента ГПС имеет место ряд факторов, ставящих под сомнение эффективность использования существующих МПЛ, а также создание и внедрение в производство новых МПЛ, в том числе на основе использования гибких производственных модулей и промышленной робототехники [6]–[8]. Как следует из источников: <http://vuz-24.ru/nex/vuz-86719.php> и https://referatwork.ru/category/proizvodstvo/view/291910_effektivnost_potocnogo_proizvodstva, МПЛ для изготовления плоских секций, внедренные за последние 10–15 лет на ряде отечественных судостроительных заводов (ПАО «Завод «Красное Сормово», АО «Зеленодольский завод им. А. М. Горького», ОАО «Невский ССЗ» и др.), используются крайне неэффективно. При производственной мощности, рассчитанной на строительство двенадцати судов водоизмещением 4,5–6,5 тыс. т в год, на каждом из указанных заводов строится не более семи-восьми таких судов в год. Это составляет лишь 55–65 % от расчетной производственной мощности линий, т. е. такой загрузки для МПЛ недостаточно, поэтому почти половину производственного времени МПЛ фактически простаивают, а их чрезвычайно дорогостоящее оборудование используется лишь чуть более, чем наполовину, при том, что стоимость таких линий составляет примерно 23–25 млн долл.

Ситуацию не всегда может изменить даже частичное перепрофилирование МПЛ для изготовления не свойственной для судостроения продукции (например, крупногабаритных мостовых конструкций). Во-первых, это, как правило, разовые заказы. Во-вторых, требуется переналадка технологического оборудования линии под изготовление изделий с иными конструктивно-технологическими характеристиками, а для этого гибкость линии должна быть достаточно высокой и, соответственно, другими режимами обработки. В-третьих, компетенции персонала для производства корпусных и мостовых конструкций различны, что также необходимо учитывать и т. д. Кроме того, существующие МПЛ занимают весьма большие производственные площади. Как правило, это пяти-, семипозиционные линии. Площадь каждой позиции в среднем составляет примерно 220 м², т. е. МПЛ занимает до 1500–2000 м² производственной площади. Все это делает МПЛ чрезвычайно «дорогим удовольствием», которое позволить себе может далеко не каждое, даже вполне успешное предприятие.

Анализ опыта передовых предприятий (не только судостроительных) [9]–[11], показывает, что достаточно эффективной альтернативой МПЛ на предприятиях с единичным или мелкосерийным типом производства оказываются высокопроизводительные комплексно-механизированные многофункциональные сборочно-сварочные манипуляторы (МССМ) и участки. На них полностью или частично могут быть механизированы такие работы, как сборка, транспортировка, манипулирование сварочным инструментом и (или) изделием, загрузка деталей и выгрузка готовых сборочных единиц и т. д. Из источника <http://vuz-24.ru/nex/vuz-86719.php> следует, что оптимальных результатов можно достичь при сочетании использования оборудования для механизации указанных работ с научной организацией труда и соблюдении принципов эргономики, правил санитарии и техники безопасности. Это позволит обеспечить выполнение трудового процесса с минимальной затратой физической и психической энергии работающих.

При разработке конструктивных схем МССМ и его исполнительных механизмов должны быть рассмотрены следующие факторы, оказывающие влияние на его функционирование [12]:

1. *Гибкость производства*, которая характеризуется изменяющейся количественно и качественно производственной программой. Современные проекты судов редко приспособлены к механизированному производству корпусных конструкций, в них не всегда используются модульные принципы проектирования, унификация конструкций и т. п. С учетом этого разрабатываемые МССМ и средства технологического оснащения (СТО) для них должны обладать большой гибкостью.

2. *Облегчение труда*. В настоящее время доля ручного труда в сборочно-сварочных цехах верфей может достигать 60 % и более. Работа с тяжеловесными крупногабаритными конструкциями требует значительных физических усилий, а ограниченное пространство внутри изготавливаемых сборочных единиц (СЕ) обуславливает работу в тяжелых условиях. При разработке МССМ и выборе способа изготовления СЕ необходимо предусмотреть возможность решения этой проблемы.

3. *Устранение неблагоприятных условий труда*. Разрабатываемые МССМ и способы изготовления СЕ должны максимально исключать или ограничивать неблагоприятные условия, такие как запыленность и загазованность воздуха рабочей зоны от сварки, световое излучение, шум и др.

4. *Приемлемость МССМ для предприятия*. МССМ должны функционировать при выборе любого из следующих, применяемых в настоящее время способов изготовления СЕ: сборки и сварки на одном рабочем месте; сборки и сварки на одном рабочем месте с разбивкой СЕ на узлы; сборки и сварки секций на потоке. Кроме того, МССМ должен иметь минимальную стоимость.

5. *Конструктивная схема МССМ*. Выбранный способ изготовления СЕ должен предусматривать операции, которые можно выполнять максимально простым по конструкции МССМ. То есть конструктивная схема МССМ, с одной стороны, должна соответствовать технологическим возможностям предприятий, а с другой — комплектация МССМ должна быть максимально простой.

6. *Качество работы*. Оценивая и устанавливая способ изготовления СЕ и технологические возможности МССМ, необходимо предусматривать минимальные сварочные деформации и максимально возможную точность изготовления конструкций.

7. *Производительность труда.* Принятый способ изготовления СЕ, конструктивная схема МССМ и другие факторы должны преследовать главную цель: повышение производительности труда при изготовлении СЕ. В связи с этим должно быть механизировано максимальное количество операций при любых условиях организации производства.

Для того чтобы МССМ функционировала в любой схеме организации производственного процесса изготовления СЕ с учетом изложенных ранее факторов, необходимо определить основные требования к разработке его конструктивных схем. Перспективный МССМ для изготовления плоских секций с последующим внедрением в сборочно-сварочных цехах верфей с небольшой загрузкой должен иметь в своем составе следующие составные части (рис. 2): несущую балку полукозлового или порталного типа со сдвоенными ригелями, тележку, колонну подвижную, замковое соединение, сменные исполнительные механизмы, привод передвижения балки, привод передвижения тележки, привод подъема колонны, привод поворота колонны, энергоподвод к балке, энергоподвод к исполнительному механизму, энергоподвод к поворотной колонне, пульт управления на стойке, пульт управления выносной.

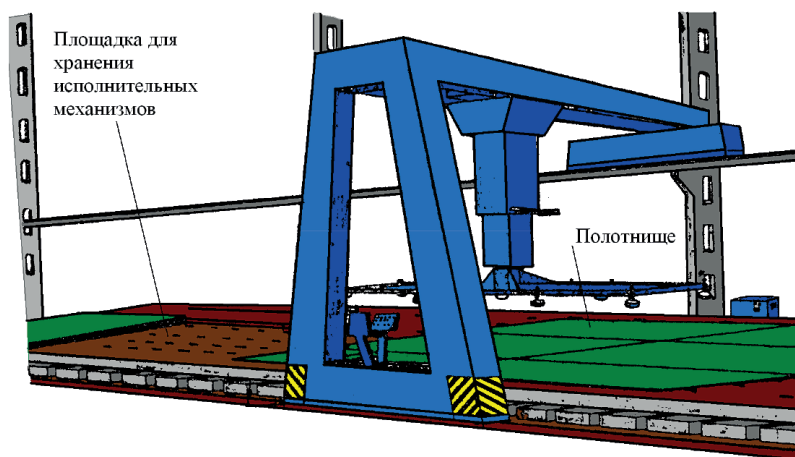


Рис. 2. Общий вид многофункционального сборочно-сварочного манипулятора

Нижняя часть колонны с исполнительным механизмом (ИМ) должна иметь четыре степени свободы перемещения. Приводы несущей балки и тележки должны иметь регулируемую скорость передвижения в пределах скорости сварки, газовой резки и маршевой скорости перемещения подвижных составных частей. Портал, тележка, колонна МССМ должны иметь четкую фиксацию при остановке. Точность фиксации должна быть в пределах ± 2 мм. Привод подъема подвижной части колонны должен быть жестким (пнеumo- или гидропривод, рейковый привод и т. д.). МССМ должен отвечать современным требованиям технической эстетики и эргономики, а его составные части соответствовать антропометрическим данным человека. Кроме того, МССМ должен соответствовать современным требованиям техники безопасности, а его габаритно-конструктивные характеристики должны соотноситься с техническими характеристиками изготавливаемых СТО.

Принципиально в МССМ могут применяться следующие варианты энергоподвода (электроэнергии, сжатого воздуха, CO_2): энергоподвод к МССМ и непосредственно к каждому ИМ (например, связанная с МССМ многозвенная консольная балка); энергоподвод только к МССМ-носителю, а от него к ИМ. Очевидно, что детали и узлы МССМ должны изготавливаться из наиболее доступных материалов, должны быть взаимозаменяемы в пределах участка, линии, цеха, предприятия, т. е. должны иметь максимальный уровень унификации и стандартизации. Кроме того, конструкция МССМ и его составных элементов должна удовлетворять требованиям последующей поэтапной модернизации с механизированным выполнением максимального количества технологических операций на данном этапе и полностью автоматизированным (роботизированным) в перспективе.

Структура МССМ и его ИМ должна отвечать современным принципам модульно-блочного построения, а их конструкция иметь возможность оперативной переналадки на изготовление различных типов СЕ. Кроме того, МССМ как гибкое оборудование, должен иметь возможность оперировать как с неподвижной СЕ, так и перемещать ее и / или отдельные ее элементы. При этом на всех этапах изготовления СЕ должна осуществляться информационная поддержка всех основных технологических операций [13].

Важно, чтобы МССМ был адаптирован для работы при различных технологических схемах организации производства:

- секция изготавливается на одном рабочем месте, а в МССМ по ходу выполнения технологического процесса последовательно заменяются ИМ (в этом случае МССМ, по сути, представляет собой сборочно-сварочный центр);
- комплект секций также изготавливается на одном рабочем месте, при этом разбивается, например, на три группы элементов: полотнище, панель, секция. ИМ сменяются по ходу выполнения технологического процесса отдельно для изготовления каждой группы элементов (т. е. не более трех раз, т. е. реже, чем в предыдущей схеме);
- СЕ изготавливается в потоке — МССМ размещены по ходу технологического процесса, при этом ИМ стабильно закреплены на МССМ или подлежат замене в зависимости от количества МССМ на линии или от выполняемых операций. В этом случае стенды для размещения СЕ должны оснащаться подъемно-опускными роликоопорами.

При размещении МССМ на рабочем месте должно быть четко определено местонахождение ИМ в порядке выполнения технологического процесса в специальных контейнерах или в магазинах. МССМ также должен быть оборудован быстродействующим замковым соединением — промежуточным звеном между МССМ и ИМ, расположенным на конце подвижной колонны. Высота подъема подвижной колонны должна быть выбрана исходя из следующих условий: максимальная высота перемещаемых изделий (набора); габариты захватных механизмов; безопасная работа обслуживающего персонала. Для обеспечения удобства работы МССМ должен быть оборудован двумя дублирующими пультами управления: *стационарным* на стойке или вне агрегата и *откидным* на подвижной колонне.

Обсуждение (Discussion)

Учитывая ранее изложенное, технико-экономическая эффективность МССМ может быть достигнута при соблюдении следующих условий:

- снижение затрат времени на выполнение различных вспомогательных работ;
- повышение количества наплавленного металла в единицу времени путем преимущественного выполнения сварки в нижнем положении с помощью манипуляторов-кантователей или позиционеров;
- механизация сборочных работ, установка и переустановка заготовок, главным образом за счет применения входящих в состав участка транспортных и подъёмных средств;
- экономия производственных площадей;
- улучшение условий труда вследствие применения вентиляционных устройств, балансиров для подвески инструмента, столов с поворотными деками, повышения энергооснащенности рабочих мест и др.;
- снижение расходов на проектирование при использовании типовых решений и технологий.

Таким образом, комплексно-механизированные МССМ и участки на их основе, при наличии сопоставимых с существующими МПЛ технико-экономических показателей и функционала позволяют выполнять соответствующие единичному и мелкосерийному типу производства задачи (строительство 2–6 суд./год); обеспечивают достаточно высокий уровень гибкости производства в широком диапазоне конструктивно-технологических характеристик выпускаемой продукции; занимают в 4–5 раз меньшую производственную площадь с меньшей более чем в 5 раз себестоимостью.

При этом несмотря на указанные достоинства МССМ обоснованием их внедрения на судостроительных предприятиях взамен традиционных МПЛ (или параллельно с ними) до настоящего

времени отраслевая наука не занималась. При этом изучением вопросов создания и внедрения ГПС на основе МПЛ в 70–80-е гг. XX в. занимались отраслевые НИИ и профильные кафедры многих вузов, включая ВГУВТ (ГИИВТ). В частности, известны работы в данной области Центрального научно-исследовательского института технологии судостроения (ЦНИИТС, г. Ленинград). Многие проекты этого института были успешно внедрены на «Адмиралтейских верфях», «Балтийском заводе» (г. Ленинград), «Севмашпредприятии» (г. Северодвинск) и других заводах морского судостроения. Кафедра технологии судостроения и профильная проблемная лаборатория технологии судостроения ГИИВТа под руководством проф. Ю. Г. Кулика занималась аналогичными работами для заводов речного судостроения. Некоторые проекты кафедры технологии судостроения ГИИВТа (например, проект сборочно-сварочного агрегата для изготовления модуль-панелей (1981 г.) и проект МПЛ изготовления плоских секций для Городецкой судовой верфи (1979 г.)) были внедрены на судостроительном заводе «Ока» (г. Навашино) и «Городецкой судовой верфи» (г. Городец). Интерес к МПЛ в те годы был оправдан крупносерийным и массовым строительством сухогрузных и наливных судов типа «Волго-Дон», «Волгонепфть», «Сормовский», «Нефтерудовоз» и других судов, серийного строительства до 350–650 единиц.

В настоящее время в связи с мелко- и среднесерийным типом судостроительного производства (не более 50–60 судов в серии) актуальность приобретают вопросы повышения гибкости производственной системы верфи при мелко- и среднесерийном строительстве судов. В частности, поэтому в настоящее время требуется проведение специального исследования по обоснованию разработки, созданию и внедрению на судостроительных предприятиях комплексно механизированных сборочно-сварочных манипуляторов.

Заключение (Conclusion)

Обоснование замены малоэффективных поточных линий на специализированных участках изготовления секций корпусов судов комплексно механизированными сборочно-сварочными манипуляторами представляется весьма актуальным. Для этого необходимо:

- выполнить анализ современного состояния проблемы обеспечения гибкости производственной системы сборочно-сварочного производства, в том числе рассмотреть совокупность факторов, влияющих на эффективность производства верфи, способы обеспечения гибкости и т. п.;
- теоретически обосновать модели обеспечения гибкости производственной системы сборочно-сварочного производства при единичном и мелкосерийном типах производства и разработать соответствующую модель ГПС сборочно-сварочного производства для оптимизации её параметров;
- выполнить экспериментальные исследования модели обеспечения гибкости производственной системы сборочно-сварочного производства верфи при единичном и мелкосерийном типах производства;
- разработать рекомендации по повышению гибкости производственной системы сборочно-сварочного производства при мелкосерийном строительстве судов на основе применения МССМ;
- выполнить технико-экономическое обоснование замены МПЛ на комплексно механизированные МССМ при произвольной загрузке производства и подтвердить его соответствующими расчётами.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Полякова М. Ю. Гибкие производственные системы как основа комплексной автоматизации технологических процессов / М. Ю. Полякова // Наука. Технологии. Общество. Экономика. Сборник научных трудов I Международной научно-практической конференции. — Ставрополь: ООО «Секвойя», 2022. — С. 290–293.
2. Бурмистрова А. Е. Проблемы внедрения гибких производственных систем в единичном и мелкосерийном производстве и перспективы замены механизированных поточных линий многофункциональными сборочно-сварочными манипуляторами: в 2 ч. / А. Е. Бурмистрова, О. А. Щеголева // Современные тенденции и перспективы развития водного транспорта России : материалы межвузовской науч.-практ.

конф. для асп., студ. и курс., 19 мая 2022 г. — Ч. 1. — СПб.: Изд-во ГУМРФ им. адмирала С. О. Макарова, 2022. — С. 209–219.

3. Белов А. Ю. Повышение эффективности производства за счёт использования систем промышленной автоматизации / А. Ю. Белов, Д. А. Синицын // *Техника и технологии, политика и экономика: проблемы и перспективы* / Материалы VI Междунар. науч.-практ. конф. — М.: ФГАОУ ВО «Московский политехнический университет», 2020. — С. 19–23.

4. Титова О. В. Эффективное развитие гибких производственных систем на высокотехнологичных промышленных предприятиях / О. В. Титова // *Финансовый бизнес*. — 2021. — № 6 (216). — С. 268–271.

5. Голов Р. С. Формирование гибких производственных систем на базе цифровых технологий на предприятиях высокотехнологичных отраслей промышленности / Р. С. Голов, В. В. Мыльник // *СТИН*. — 2022. — № 2. — С. 34–36.

6. Дуюн И. А. Оценка эффективности работы гибких производственных систем и роботизированных комплексов с использованием имитационного моделирования / И. А. Дуюн, К. В. Чуев // *Вестник Белгородского государственного технологического университета им. В. Г. Шухова*. — 2021. — № 4. — С. 91–100. DOI: 10.34031/2071-7318-2021-6-4-91-100.

7. Резник А. М. Технология сварки с использованием роботов. Преимущества и недостатки. Перспективы развития / А. М. Резник, А. В. Полякова // *Системы управления полным жизненным циклом высокотехнологичной продукции в машиностроении: новые источники роста* / Материалы V Всеросс. науч.-практ. конф. — М.: Московский гос. техн. ун-т имени Н. Э. Баумана, 2022. — С. 215–219.

8. Арсентьева Т. М. Проблемы внедрения гибких производственных систем в мелкосерийном и единичном производстве / Т. М. Арсентьева, Е. Г. Бурмистров // *Великие реки-2020* / Труды 22-го Междунар. науч.-промышл. форума. — Н. Новгород: Волжский гос. ун-т водного транспорта, 2020. — С. 20–23.

9. Шолохов М. А. Факторы эффективности внедрения сварочных роботов в индустрии 4.0 / М. А. Шолохов, И. В. Ершова, Д. С. Бузорова, С. С. Полосков // *Сварка и диагностика*. — 2020. — № 5. — С. 41–44.

10. Белозеров Д. А. Проблемы рынка робототехники в России и перспективы коммерциализации разработок / Д. А. Белозеров // *Альманах научных работ молодых ученых университета ИТМО* / Материалы XLIX науч. и учеб.-метод. конф. — СПб.: ФГАОУ ВО «Национальный исследовательский университет ИТМО», 2020. — Т. 5. — С. 47–51.

11. Дун Ю. Э. Конкурентоспособность производства как основной фактор эффективного управления предприятием в рыночных условиях / Ю. Э. Дун, А. М. Бричко // *Економіка та управління АПК*. — 2019. — Т. 2. — № 151. — С. 67–75. DOI: 10.33245/2310-9262-2019-151-2-67-75.

12. Булавко О. А. Развитие гибких производственных систем в условиях нового технологического уклада / О. А. Булавко, Л. Р. Туктарова // *Бизнес. Образование. Право*. — 2021. — № 2 (55). — С. 39–43. DOI: 10.25683/VOLBI.2021.55.207.

13. Лебедева Е. Г. Реализация информационной поддержки жизненного цикла изделий судостроения как этап построения «бережливого производства» / Е. Г. Лебедева, Ю. Ю. Шванева, А. А. Волоцкой, А. А. Сомпольцева // *Научные проблемы водного транспорта*. — 2020. — № 63. — С. 68–76. DOI: 10.37890/jwt.vi63.78.

REFERENCES

1. Polyakova, M. Yu. “Gibkie proizvodstvennyye sistemy kak osnova kompleksnoi avtomatizatsii tekhnologicheskikh protsessov.” *Nauka. Tekhnologii. Obshchestvo. Ekonomika. Sbornik nauchnykh trudov I Mezhdunarodnoi nauchno-prakticheskoi konferentsii*. Stavropol’: Obshchestvo s ogranichennoi otvetstvennost’yu, “SEKVOIYa”, 2022. 290–293.

2. Burmistrova, A. E., and O. A. Shchegoleva. “Problems of implementation of flexible production systems in single and small-series production and prospects for replacing mechanized production lines with multifunctional assembly and welding manipulators.” *Materialy mezhvuzovskoi nauchno-prakticheskoi konferentsii dlya aspirantov, studentov i kursantov «Sovremennye tendentsii i perspektivy razvitiya vodnogo transporta Rossii» 19 maya 2022 goda: Chast’ 1*. SPb.: Izd-vo GUMRF im. admirala S. O. Makarova, 2022. 209–219.

3. Belov, A. Y., and D. A. Sinitsyn. “Improving production efficiency through the use of industrial automation systems.” *Tekhnika i tekhnologii, politika i ekonomika: problemy i perspektivy. Materialy VI Mezhdunarodnoi nauchno-prakticheskoi konferentsii*. M.: FGAOU VO “Moskovskii politekhnikeskii universitet”, 2020. 19–23.

4. Titova, O. V. “Effective development of flexible production systems in high-tech industrial enterprises.” *Finansovyi biznes* 6(216) (2021): 268–271.

5. Golov, R. S., and V. V. Myl'nik. "Formirovanie gibkikh proizvodstvennykh sistem na baze tsifrovyykh tekhnologii na predpriyatiyakh vysokotekhnologichnykh otraslei promyshlennosti." *STIN* 2 (2022): 34–36.

6. Duyun, I., and K. Chuev. "Evaluation of the efficiency of flexible production systems and robotic complexes using simulation." *Bulletin of Belgorod State Technological University named after V. G. Shukhov* 4 (2021): 91–100. DOI: 10.34031/2071-7318-2021-6-4-91-100.

7. Reznik, A. M., and A. V. Polyakova. "Welding technology using robots. Advantages and disadvantages. Development prospects." *Sistemy upravleniya polnym zhiznennym tsiklom vysokotekhnologichnoi produktsii v mashinostroenii: novye istochniki rosta. Materialy V Vserossiiskoi nauchno-prakticheskoi konferentsii*. M.: Moskovskii gosudarstvennyi tekhnicheskii universitet imeni N. E. Baumana, 2022. 215–219.

8. Arsenteva, Tatyana M., and Evgeny G. Burmistrov. "Problems of introduction of flexible production systems in small-scale and single production." *Velikie reki-2020. Trudy 22-go Mezhdunarodnogo nauchno-promyshlennogo foruma*. Nizhnii Novgorod: Volzhskii gosudarstvennyi universitet vodnogo transporta, 2020. 20–23.

9. Sholokhov, M. A., I. V. Ershova, D. S. Buzorina, and S. S. Poloskov. "Factors in the effectiveness of the introduction of welding robots in the industry 4.0." *Welding and Diagnostics* 5 (2020): 41–44.

10. Belozarov, D. A. "Problemy rynka robototekhniki v Rossii i perspektivy kommersializatsii razrabotok." *Al'manakh nauchnykh rabot molodykh uchenykh Universiteta ITMO. Materialy XLIX nauchnoi i uchebno-metodicheskoi konferentsii*. Vol. 5. SPb.: FGAOU VO «Natsional'nyi issledovatel'skii universitet ITMO», 2020. 47–51.

11. Dong, Yu., and A. Bruchko. "Competitiveness of production as a determining factor of effective management of the enterprise in market conditions." *Agribusiness Economics and Management* 2.151 (2019): 67–75. DOI: 10.33245/2310-9262-2019-151-2-67-75.

12. Bulavko, Olga Aleksandrovna, and Lilia Ravilievna Tuktarova. "Development of flexible production systems in the conditions of a new technological style." *Business. Education. Law* 2(55) (2021): 39–43. DOI: 10.25683/VOLBI.2021.55.207.

13. Lebedeva, Elena G., Yuliya Yu. Shvaneva, Alexander A. Volotskoi, and Anna A. Sompoltseva. "Implementation of information support for the shipbuilding products life cycle as a stage of creating "lean production"." *Russian Journal of Water Transport* 63 (2020): 68–76. DOI: 10.37890/jwt.vi63.78.

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

Бурмистров Евгений Геннадьевич —
доктор технических наук, профессор
ФГБОУ ВО «Волжский государственный
университет водного транспорта»
603950, Российская Федерация, Нижний Новгород,
ул. Нестерова, 5
e-mail: burmistrov_e_g@mail.ru

Щеголева Ольга Анатольевна — аспирант
Научный руководитель:
Бурмистров Евгений Геннадьевич
Самарский филиал ФГБОУ ВО «ВГУВТ»
443036, Российская Федерация, Самара,
ул. Неверова, 87
e-mail: shh151@mail.ru

Бурмистрова Анастасия Евгеньевна —
специалист отдела НИР
ФГБОУ ВО «Волжский государственный
университет водного транспорта»
603950, Российская Федерация, Нижний Новгород,
ул. Нестерова, 5
e-mail: sovvesna@yandex.ru

INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Burmistrov, Evgeny G. —
Doctor of Technical Sciences, professor
Volga State University
of Water Transport
5 Nesterova Str., Nizhny Novgorod, 603950,
Russian Federation
e-mail: burmistrov_e_g@mail.ru

Shchegoleva, Olga A. — Postgraduate
Supervisor:
Burmistrov, Evgeny G.
Samara branch of Volga State University
of Water Transport
87 Neverova Str., Samara, 443036, Russian Federation
e-mail: shh151@mail.ru

Burmistrova, Anastasia E. —
Specialist of the Research Department
Volga State University
of Water Transport
5 Nesterova Str., Nizhny Novgorod, 603950,
Russian Federation
e-mail: sovvesna@yandex.ru

Статья поступила в редакцию 15 февраля 2023 г.
Received: February 15, 2023.

ORGANIZATIONAL AND TECHNICAL LEVEL OF PREPARATION OF SHIPBUILDING AND SHIP REPAIR PRODUCTION AND WAYS TO INCREASE IT

T. Yu. Pasheeva¹, V. I. Fatov²

¹ — Karelian Research Centre of the Russian Academy of Sciences,
Petrozavodsk, Russian Federation

² — Onego Shipyard, JSC, Petrozavodsk, Russian Federation

A set of problems of a shipbuilding and ship repair plant in terms of production preparation efficiency, focusing on such issues as import substitution, modernization, the introduction of innovative solutions in production, digitalization of production, is studied in the paper. Considerable attention is paid to the real state of the shipbuilding industry, the difficulties it faces, and the prospects for restoring specific positions. A set of issues related to the shipbuilding and ship repair production organization is considered. Attention is paid to the production efficiency, taking into account the fact that the efficiency of shipbuilding and ship repair production in modern Russia is characterized by the development of high-tech science-intensive industries and the introduction of innovative technologies. It is concluded that modern high-tech shipbuilding and ship repair production requires the involvement of significant financial and intellectual resources, and production facilities must be provided with modern, mostly automated production equipment, slipways, docks, boathouses, so it is necessary to take specific measures towards a significant improvement in performance, characterizing the state of fixed production assets. On the example of Onego Shipyard, JSC, the trend towards production modernization and the prospects for production and economic development are shown; it requires significant investment in the technical re-equipment and production modernization, and also contributes to the creation of a new production infrastructure and a significant renewal of fixed assets. Considerable attention should be paid to the issues of a systematic approach to solving the problems of shipbuilding and ship repair production, taking into account the organizational and technical component.

Keywords: organization of shipbuilding and ship repair production, import substitution, modernization, digitalization, innovations, economic analysis, management efficiency, production preparation quality, production capacities, technological processes.

For citation:

Pasheeva, Tatyana Yu., and Vadim I. Fatov. "Organizational and technical level of preparation of shipbuilding and ship repair production and ways to improve it." *Vestnik Gosudarstvennogo universiteta morskogo i rechnogo flota imeni admiral S. O. Makarova* 15.2 (2023): 282–294. DOI: 10.21821/2309-5180-2023-15-2-282-294.

УДК 338.45:629.12(470.22)

ОРГАНИЗАЦИОННО-ТЕХНИЧЕСКИЙ УРОВЕНЬ ПОДГОТОВКИ СУДОСТРОИТЕЛЬНО-СУДОРЕМОНТНОГО ПРОИЗВОДСТВА И ПУТИ ЕГО ПОВЫШЕНИЯ

Т. Ю. Пашеева¹, В. И. Фатов²

¹ — ФГБУН Федеральный исследовательский центр «Карельский научный центр
Российской академии наук», Петрозаводск, Российская Федерация

² — АО «Онежский судостроительно-судоремонтный завод»,
Петрозаводск, Российская Федерация

В работе исследована совокупность проблем судостроительно-судоремонтного завода с точки зрения эффективности подготовки производства. Главное внимание акцентировано на таких вопросах, как импортозамещение, модернизация, внедрение инновационных решений и цифровизация производства. Значительное место уделено реальному состоянию судостроительного производства, основным сложностям,

возникающим в ходе производства, перспективам восстановления утраченных позиций. Рассмотрен вопрос, связанный с организацией судостроительно-судоремонтного производства. Отмечается, что эффективность судостроительно-судоремонтного производства в современной России характеризуется развитием высокотехнологичных наукоемких производств и внедрением инновационных технологий. На примере Акционерного общества «Онежский судостроительно-судоремонтный завод» показаны тенденции развития и модернизации производства. Подчеркивается, что перспективы производственно-экономического развития требуют значительных инвестиционных вложений в техническое перевооружение и модернизацию производства. Сделаны выводы о том, что современное наукоемкое судостроительно-судоремонтное производство требует привлечения значительных финансовых и интеллектуальных ресурсов, обеспечения производственных мощностей современным автоматизированным оборудованием, а также необходимо принятие конкретных мер, направленных на существенное улучшение показателей, характеризующих состояние основных производственных фондов. Рекомендовано значительное внимание уделять вопросам системного подхода к решению задач судостроительно-судоремонтного производства с учетом организационно-технической составляющей.

Ключевые слова: организация судостроительно-судоремонтного производства; импортозамещение, модернизация, цифровизация, инновации, экономический анализ, эффективность управления, качество подготовки производства, производственные мощности, технологические процессы.

Для цитирования:

Пашеева Т. Ю. Организационно-технический уровень подготовки судостроительно-судоремонтного производства и пути его повышения / Т. Ю. Пашеева, В. И. Фатов // Вестник Государственного университета морского и речного флота имени адмирала С. О. Макарова. — 2023. — Т. 15. — № 2. — С. 282–294. DOI: 10.21821/2309-5180-2023-15-2-282-294.

Введение (Introduction)

Современное судостроение является индикатором уровня развития экономики и научно-технического прогресса в стране. Эффективность судостроительно-судоремонтного производства в современной России характеризуется развитием высокотехнологичных наукоемких производств и внедрением инновационных технологий. Современное наукоемкое судостроительно-судоремонтное производство для выхода из кризисной ситуации требует привлечения значительных финансовых и интеллектуальных ресурсов. Необходимым условием правильного понимания сущности внутрихозяйственных связей и технико-экономических показателей, характеризующих деятельность судостроительно-судоремонтных предприятий, является изучение закономерностей развития судостроительно-судоремонтного производства и основных вопросов экономики и планирования. Среди многих факторов, повышающих экономическую эффективность судостроительно-судоремонтного производства, к основным можно отнести подготовку производства, а также совершенствование его организации и управления. Для решения проблем, связанных с обеспечением конкурентоспособности отечественных судостроительно-судоремонтных производств, необходим научно-обоснованный подход в решении вопросов подготовки, организации и управления производством.

Целью настоящего исследования является рассмотрение уровня организационно-технической подготовки судостроительно-судоремонтного производства с точки зрения эффективности и перспектив дальнейшего улучшения на примере АО «Онежский судостроительно-судоремонтный завод» (далее — АО «ОССЗ»).

Задачи исследования: выявить проблемные вопросы и риски в подготовке судостроительно-судоремонтного производства АО «ОССЗ», а также рассмотреть возможность их решения путем повышения эффективности подготовки судостроительно-судоремонтного производства с учетом реального состояния отрасли.

Методы и материалы (Methods and Materials)

В статье [1] рассмотрены основные проблемы российского судо- и кораблестроения, такие как нехватка судостроительных мощностей, современных технологий, дефицит квалифицированных кадров, высокая стоимость строительства и низкое его качество, недостаточное развитие

современных финансовых инструментов и недостаточная государственная поддержка. Ситуация в сфере импортозамещения в отечественной промышленности в связи с усилением антироссийских санкций в 2022 г. требует решения многих проблем.

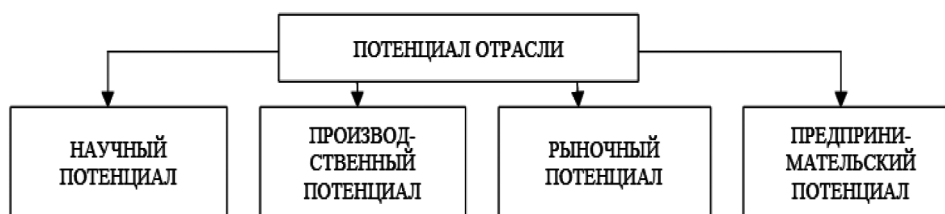
В процессе исследования проблем и перспектив реализации планов импортозамещения в отраслях промышленности с учетом существующих в настоящее время геополитических условий функционирования национального хозяйства и планов импортозамещения Минпромторга России, принятых на период до 2024 г. автор статьи [2, с. 164] отмечает следующее: «...В настоящее время не созданы институциональные, рыночные, финансовые, инвестиционные предпосылки для радикальной проблемы импортозамещения в стране, что требует формирования национальных стратегических программ по данной проблематике».

В статье [3] указывается на необходимость решения комплекса задач: конструкторского, технологического, материально-технического и организационно-планового обеспечения производства, экономического и социального развития, реконструкции и технического перевооружения верфи. Автор статьи [4, с. 53] отмечает следующее: «В условиях ограничения импорта в Российскую Федерацию технологий и оборудования в затруднительном положении оказались высокотехнологичные отрасли отечественной промышленности. Возникли проблемы, связанные с импортозамещением продукции. На первый план вышла необходимость в выстраивании независимой промышленной и технологической политики и поиск собственных современных решений в различных областях науки и техники».

Санкционные ограничения и последовавшая за этим острая нехватка комплектующих выявили новые системные проблемы в отечественном судостроении, многие судостроительные и судоремонтные заводы оказались отрезаны от передовых западных технологий. Технологическое развитие судостроительных производств и полноценное импортозамещение для судостроения России в нынешней геополитической ситуации — это уже не вопрос экономической целесообразности и не простой протекционизм ради поддержки отечественного производителя, сегодня для нашей страны это вопрос выживания и сохранения отрасли [1].

Автор статьи [5] отмечает, что более 70 % предприятий, входящих в АО «Объединенная судостроительная корпорация», используют автоматизированные системы планирования учета и контроля хода работ, часть которых сформирована в интегрированном блоке планирования и учета состояния производства. Автор акцентирует внимание на актуальной проблеме: построении взаимодействия между предприятиями, осуществляемого до настоящего времени на основе передачи «форматов», а не массивов данных в рамках единого информационного пространства, что связано с использованием разнородных информационных продуктов. Не сформированы единые центры обработки данных, поскольку развитие информационных технологий осуществлялось самостоятельно на каждом предприятии, не построена единообразная и общая для всех предприятий АО «Объединенная судостроительная корпорация» система организационно-распорядительного документооборота и финансовых данных, как и унифицированная система нормативно-справочной информации [5].

С целью реализации планов по обновлению российского флота необходимо выполнение следующих условий: судостроительные заводы и верфи должны располагать техническими возможностями и опытом постройки судов; производственные мощности должны быть обеспечены современным, по большей части автоматизированным производственным оборудованием, стапелями, доками, эллингами. Также необходимо решать вопросы межотраслевой и внутриотраслевой кооперации. Наличие научных и проектных разработок, сокращение сроков постройки судов, применение прогрессивных технологий и эффективной организации труда, наличие квалифицированных рабочих и инженерных кадров являются необходимым условием для обеспечения строительства инновационных судов высокого качества. Состав потенциала судостроительной отрасли [6] приведен на рисунке.



Состав потенциала судостроительной отрасли

Авторы статьи [6] считают, что составляющими научного потенциала предприятия являются накопленные *научные и опытно-конструкторские разработки*, имеющиеся нематериальные активы, патентоспособность идеи, научные кадры и неотделимые от конкретных физических лиц ноу-хау и знания. Составляющими производственного потенциала предприятия являются имеющееся оборудование и технологии, наличие технически грамотного персонала, налаженные связи или возможности организации производства по кооперации, поставщики комплектующих.

Авторы статьи [7], проанализировав результаты хозяйственности организаций судостроения, указывают на то, что организациям отрасли следует предпринимать усилия в направлении существенного улучшения показателей, характеризующих состояние основных производственных фондов. Перспективное производственно-экономическое развитие требует значительных инвестиционных вложений в техническое перевооружение и модернизацию производств, а также создание новой производственной инфраструктуры либо существенного обновления основных фондов.

На судостроительно-судоремонтных предприятиях организационно-технический уровень производства определяет технические возможности строительства и ремонта судов: чем он выше, тем большие возможности существуют для выполнения строительных (ремонтных) работ.

Результаты (Results)

В статье [1] отмечается, что российская судостроительная промышленность является крупнейшей машиностроительной отраслью, обладающей высоким научно-техническим и производственным потенциалом. Создание одного рабочего места в судостроении влечет за собой появление четырех-пяти (по некоторым оценкам, шести-семи) рабочих мест в смежных отраслях. Для Республики Карелия судостроение имеет приоритетное значение. Акционерное общество «Онежский судостроительно-судоремонтный завод» основан в г. Петрозаводске на базе модернизированных судоремонтных мощностей Беломорско-Онежского пароходства. Основным видом деятельности завода является строительство судов и плавучих конструкций. АО «ОССЗ» способствует развитию судостроительной и судоремонтной отрасли и пополнению отечественного флота современными судами [8]. За период 2015–2020 гг. на АО «ОССЗ» были построены следующие типы судов: несамоходный землесос пр. CSD650 — одна единица; рабочие катера пр. ST23WIM — шесть единиц; рабочие катера с гибридной силовой установкой пр. ST23WIM–H — две единицы; лоцмейстерский катер пр. 02780M — три единицы; грунтоотвозные шаланды пр. HB-600 — четыре единицы; грунтоотвозная шаланда пр. HB-900 — одна единица; самоотвозной трюмный землесос проекта TSHD-2000 — одна единица; грузопассажирский паром пр. 3265 — одна единица; азимутальный буксир проекта ASD3413 ICE — одна единица. Строящиеся суда: краболовы пр. CCa5712LS — серия из четырех судов. Планируемые к строительству: мелкосидящие ледоколы пр. 22740M ледового класса Icebreaker6 — две единицы и две в опционе [8]. Указанные проекты построенных судов подтверждают возможности АО «ОССЗ» строительства современной морской техники. В перспективе на базе АО «ОССЗ» будет создана цифровая верфь, на которой планируется выпускать суда типа *река–море* с увеличением количества построенных судов.

Ключевой целью АО «ОССЗ» является переход к новому качественному состоянию, оптимизация системы функционирования предприятия в соответствии с требованиями внешней среды и выработанной стратегией его развития, способствующей принципиальному улучшению

управления, повышению эффективности и конкурентоспособности производства и выпускаемой продукции. Положительным эффектом данного подхода является то, что такие базовые элементы, как «оптимизация системы функционирования предприятия», «требования внешнего окружения», «стратегия развития предприятия», «повышение эффективности и конкурентоспособности производства и выпускаемой продукции» приводятся во взаимодействие [9]. Рассмотрим производство АО «ОССЗ» как *целостную систему*, состоящую из взаимосвязанных и взаимозависимых частей, каждая из которых оказывает влияние на жизнеспособность и эффективное функционирование производства. В качестве составных элементов данной системы выступают средства производства, технологии, персонал, структура, и др. При условии, что все части системы функционируют исправно, она функционирует эффективно, сбой в любой части системы могут оказать влияние на нее в целом.

В настоящее время на заводе строится первая в России *цифровая верфь* — современный комплекс для строительства судов, прокладываются инженерные сети для обеспечения строительства, выполняется демонтаж зданий и сооружений, строятся объекты вспомогательного назначения. На территории действующих корпусов завода появятся цеха, оснащенные современным высокотехнологичным роботизированным оборудованием. Цифровая платформа позволит автоматизировать все производственные процессы. Предполагается, что цифровая верфь позволит существенно увеличить объемы производства [15]. На производственных площадках АО «ОССЗ» выполняются работы по устройству котлована и фундаментов, строительству каркаса нового блока корпусных цехов; в новом эллинге планируется установить консольный, козловые и мостовые краны грузоподъемностью до 60 т. До конца 2024 г. на территории завода запланировано возведение блока корпусных цехов, контрольно-пропускного пункта, подпорной стены, центра обработки данных, станции газификации технических газов, компрессорной станции и очистных сооружений. Для управления предприятием будет внедрена *интегрированная информационная система цифрового производства* [8].

Цифровую верфь предлагается рассматривать как инновационное высокотехнологичное цифровое производство, требующее предварительной модернизации производственных мощностей АО «ОССЗ». Внедрение новой системы планирования и экономического стимулирования дает широкие возможности повышения эффективности судостроительного производства. Особая роль отводится технико-экономическим показателям, характеризующим конечные результаты производственно-хозяйственной деятельности судостроительного производства, в том числе показателям экономической эффективности. Важная роль в расчетах при оценке практической деятельности АО «ОССЗ» завода принадлежит *показателям производственной мощности*. Производственные мощности, характеризующие максимальные возможности судостроительного завода, позволяют выявить его внутренние резервы и являются базой при планировании новых мощностей, выделении капиталовложений и формировании производственной программы. Недостаточное использование имеющихся производственных мощностей и основных фондов создает необходимость больших капитальных вложений для строительства новых и расширения действующих заводов.

При оценке производственной мощности АО «ОССЗ» под производственной мощностью данного завода предлагается понимать максимально возможный годовой выпуск продукции или объем переработки сырья в номенклатуре и ассортименте, предусмотренный на плановый период при полном использовании производственного оборудования и площадей с учетом применения передовой технологии, а также улучшения организации производства и труда. Это определение применительно к судостроительным и судоремонтным предприятиям должно быть дополнено требованиями максимально возможного использования судоподъемных сооружений и причалов. Таким образом, производственная мощность характеризует объективно существующие реальные условия максимально возможного выпуска (ремонта) продукции (судов), для реализации которых необходимо освоить наиболее прогрессивные для данного завода технологии, передовые технические нормы использования оборудования, сырья и затрат рабочего времени на единицу продукции, внедрить передовые методы организации производства и труда.

При разработке перспективного плана модернизации и технического развития судостроительно-судоремонтного завода расчеты производственной мощности завода в целом и его

отдельных цехов позволяют найти такое *наиболее экономичное решение* поставленной задачи, как достижение максимального выпуска судов при минимальных затратах. Главным при рассмотрении вопросов о производственной мощности следует считать состав и содержание факторов, влияющих на ее величину. Решающим фактором являются средства труда: станки и другое производственное оборудование.

На АО «ОССЗ» наиболее активно действующими средствами труда является силовое и производственное оборудование, инструмент и приспособления. Без этих средств труда производственный процесс невозможен, поэтому данная часть производственных средств относится к *активной части* основных производственных фондов. К необходимым средствам труда относятся судоподъемные сооружения и причалы, определяющие производственные возможности судостроительно-судоремонтного завода, специализацию его производственной программы и, таким образом, должны учитываться в числе факторов, влияющих на величину производственной мощности.

При определении производственной мощности судостроительно-судоремонтного завода следует учитывать группу основных (ведущих) производственных цехов, в которых выполняются наиболее сложные технологические процессы по изготовлению и ремонту корпусов, механизмов, агрегатов, устройств и систем с наибольшей долей их трудоемкости, имеющие в своем составе наибольшие основные производственные фонды. Максимальные объемы производства сосредоточены в корпусообрабатывающем, механосборочном, трубопроводном и электромонтажном цехах. В корпусообрабатывающем производстве АО «ОССЗ» используются современные технологии сборки и сварки, применяются такие распространенные технологии, как автоматическая сварка полотнищ под слоем флюса, полуавтоматическая сварка секций и блоков в среде защитных газов, беспостельная сборка секций и блоков корпуса [8].

При расчете производственной мощности судостроительно-судоремонтного завода необходимо учитывать основные факторы: количество и качество технологического оборудования и рабочих мест, определяемое наличием производственных площадей; применение передовых технологических норм использования оборудования, материальных и трудовых затрат; применение передовой технологии, организации производства и труда; режим работы завода. Необходим расчет пропускной способности судоподъемных средств и причалов, влияние которых на величину производственной мощности и степень ее использования выражается посредством реализации производственной программы. Существующие диспропорции производственных мощностей Онежского судостроительно-судоремонтного завода не позволяют увеличить объемы производства, поэтому выявление диспропорции производственных мощностей является одной из главных задач, решаемых в процессе анализа их использования.

Производство АО «ОССЗ» имеет сравнительно малый уровень механизации и большую номенклатуру работ, осуществляемых с помощью различного универсального оборудования, размещенного в цехах завода. Часть производственного оборудования имеет низкий коэффициент загрузки, но является технологически необходимой и экономически оправданной, так как без него невозможно выполнение даже редко встречающихся работ, что может привести к дополнительным простоям в строительстве и ремонте судов и значительным затратам.

В основных цехах завода имеется полный комплект производственного оборудования, необходимый для выполнения соответствующих работ. Наиболее высокий коэффициент загрузки имеет металлорежущее оборудование и оборудование сборочно-сварочного производства. Недостаток вспомогательных площадей оказывает отрицательное влияние на ход производственного процесса, создавая дополнительные потери времени, связанные с излишним перемещением материалов, изготавливаемых или ремонтируемых агрегатов, узлов и деталей, а также нерациональным перемещением рабочих. В то же время излишняя вспомогательная площадь может привести к неоправданной потере производственной мощности цеха. Следует отметить, что продолжительность строительства или ремонта судна зависит не только от количества рабочих, занятых на соответствующих работах, но также и от других факторов, например, от механизации и автоматизации работ (производственных процессов), уровня организации производства и труда и т. д.

Научно-технический прогресс в судостроительно-судоремонтной отрасли постоянно вносит изменения в технологические процессы, совершенствуя производство, что предъявляет особые требования к средствам и условиям труда. Планировка любого цеха не может оставаться без изменения в течение длительного времени, так как постоянное совершенствование технологии, увеличение парка оборудования и создание специализированных производств (в данном случае реализация проекта «Цифровая верфь») требует ее постоянной корректировки. В создавшейся ситуации возникла необходимость модернизации производства.

Процесс модернизации АО «ОССЗ» является совместным проектом АО «Центр технологии судостроения и судоремонта», ФГБОУ ВО «Санкт-Петербургский государственный морской технический университет», ФГУП «Росморпорт». Концепцию большой модернизации АО «ОССЗ» для создания цифровой верфи разработал Санкт-Петербургский государственный морской университет. Авторский надзор проводится силами специалистов АО «Центр технологии судостроения и судоремонта» [10]. Идея создания проекта «Цифровая верфь» предусматривает применение современных технологических решений, а именно: цифрового моделирования, создания виртуальной и имитационной модели предприятия, производственных процессов и «цифровизации» подготовки производства, 4D-планирования на основе виртуальной модели предприятия и выполняемых заказов [11].

В рамках реализации проекта на АО «ОССЗ» необходимо создать цифровую инфраструктуру, реализовать сквозное интегрированное цифровое управление производством. Учитывая особенности судостроения и судоремонта, это потребует внедрения инновационных цифровых производственных, технологических и управленческих решений, которые положительным образом отразятся на сокращении сроков технической подготовки производства и строительства судов, повысят уровень технологической и производственной культуры, будут способствовать возникновению дополнительных стимулов для привлечения и удержания квалифицированных кадров на предприятии. Цифровая верфь позволит работать одновременно в трех направлениях: *люди – изделия – процесс*. Немаловажно, что при выборе технологического оборудования основной акцент сделан на применение и внедрение оборудования российского производства [12].

Проект «Цифровая верфь» обеспечит цифровизацию жизненного цикла судна, позволит создать цифровую платформу с включением этапов проектирования, производства, эксплуатации и послепродажного сервиса. Внедрение данного проекта обеспечит сокращение времени постройки судна и трудоемкости подготовки производства, уменьшит непроизводительные потери на переделках. Для принятия эффективных решений на всех этапах жизненного цикла изделий судостроения многие вопросы будут эффективно решаться за счет обеспечения возможности *прослеживаемости данных* по изделиям судостроения [11]. Авторы указанной публикации обращают внимание на требования к цифровизации производства судостроительных предприятий, основанных на общемировых тенденциях развития цифровых производств. По их мнению, необходимо обеспечить процедуры полной интеграции процессов передачи данных в цифровом виде между проектантом и верфью, цифровизация производственных процессов должна составлять не менее 90 % от объема всех задействованных мощностей основного производства, в связи с чем возникает необходимость создания цифровых моделей управления производством на базе цифровых прототипов изделий и обеспечения информационной поддержки полного жизненного цикла изделий. Авторы публикации [11] отмечают также, что данный проект позволит создать современное высокотехнологичное предприятие на базе единой цифровой платформы», что будет способствовать развитию инновационных технологий и увеличению производительности труда, создаст прозрачность учета, повысит обоснованность принимаемых управленческих решений, обеспечит участников процесса проектирования и строительства кораблей и судов актуальной достоверной информацией о ходе их строительства и наличии необходимых ресурсов. В условиях санкционных ограничений с учетом повышения стоимости закупаемых комплектующих, оборудования, материалов, инструментов и увеличения сроков их поставок сроки строительства (ремонта) судов могут быть изменены не в пользу производства, что чревато существенными финансовыми потерями.

Реализация проекта «Цифровая верфь» позволит обеспечить также технологическую независимость России в области судостроения, а также будет способствовать созданию высокотехнологичных верфей с целью развития долгосрочных конкурентных преимуществ в режиме действующих санкционных ограничений. Достижение целей данного проекта обеспечит возможность создания системы информационного и программного обеспечения бизнес-процессов судостроительного производства с учетом применения инновационных технических и технологических решений [11]. Цифровизация судостроительной отрасли обеспечит переход от традиционного судостроения к концепции «Судостроение 4.0», предполагающей трансформацию всех процессов верфи, включая проектирование, производство, снабжение, логистику, ремонт, обслуживание изделий, использование новых машин, передового программного обеспечения и организационной трансформации всех процессов верфи, что, в свою очередь, даст возможность создания цифровой верфи, предусматривающей взаимосвязь всех процессов на предприятии: от организации бухгалтерского и складского учета, оцифровки чертежей и планово-технологической документации до моделирования испытаний и создания 3D-моделей корабля с элементами дополненной реальности. Цифровизация судостроительной отрасли позволит эффективно, качественно и безопасно выполнять заказы на строительство судов.

Концепция «Судостроение 4.0» подразумевает автоматизацию производства посредством внедрения передовых технологий. В процессе строительства судов разрабатываются и внедряются инновационные технологические процессы, позволяющие кардинально изменить условия и характер судостроительного производства всего цикла строительства судна с учетом комплексной цифровой трансформации производства.

Основными инновационными технологиями и измерительными средствами, применяемыми в качестве инновационных технологических решений при строительстве судов, являются:

- аппараты дробеструйной очистки;
- комплексы термической резки;
- многофункциональные гибочно-правильные станки и машины;
- трубогибочные станки;
- комплекс оборудования для механизированной сборки и роботизированной сварки микропанелей;
- роботизированные лазерные комплексы;
- сварочное оборудование;
- позиционная линия изготовления плоских секций;
- оптимизация сборки и сварки на базе моделирования сборочных деформаций;
- оптимизация сборки и сварки на базе моделирования сварочных деформаций;
- технологии композиционных материалов и изделий.

В связи с тем, что к качеству строительства судов предъявляются высокие требования, существует острая необходимость внедрения современных измерительных технологий на базе применения новых трехкоординатных систем. Для решения задач размерного контроля на современном техническом уровне необходимы к применению следующие измерительные средства:

- высокоточные лазерные тахеометры;
- лазерные трекеры;
- лазерные сканеры;
- система внутрицехового позиционирования;
- гиротеодолит;
- лазерные проекторы;
- система центровки валов;
- двухкоординатные уровни;
- лазерные дальнометры.

Предполагается, что в результате внедрения координатных методов размерного контроля будут решены следующие задачи [13]:

- разработка технологии изготовления корпусных конструкций, оборудования и трубопроводов в «чистый размер»;
- метрологическое обеспечение модульных методов монтажа судового оборудования;
- оцифровка корпусных конструкций и оборудования судов при ремонте, модернизации и реновации;
- высокоточный контроль гребных винтов, антенн и других конструкций сложной формы;
- повышение точности изготовления постелей и каркасов судовых конструкций;
- упрощение сборочных стендов, а также настройка, сооружение лесов и выполнение измерений;
- переход к виртуальной контрольной сборке крупных блоков судов, собираемых на плаву, что позволит исключить поиски необходимой площадки для физической контрольной сборки блоков, транспортировку блоков на эту площадку и пригоночные работы на месте;
- выполнение бесшаблонной разметки отверстий судовых фундаментов;
- возможность контроля локальных деформаций и перемещений изделий в быстропотекающих процессах, например, при сварке или при движении изделий [13].

Точность выполненных измерений позволит существенно повысить производительность и экономическую эффективность труда, улучшить качество и обеспечить безопасность строящихся судов [13].

Заключение (Conclusion)

Подготовка производства, совершенствование организации и управления производства являются основными факторами и предпосылками, повышающими экономическую эффективность судостроительно-судоремонтного производства. Для АО «ОССЗ» инвестиции в обновление производственно-технологической базы являются одним из ключевых факторов повышения рентабельности хозяйственной деятельности. В рамках модернизации и цифровизации АО «ОССЗ» в июле 2022 г. состоялось заседание межведомственной рабочей группы по координации работ и контролю за реализацией инвестиционного проекта модернизации предприятия, а также церемония по заливке бетоном буронабивной сваи в основании основного объекта модернизации — блока корпусных цехов АО «ОССЗ». В декабре 2022 г. Российским фондом развития информационных технологий и АО «ОССЗ» было подписано «Соглашение о выделении денежных средств на финансовое обеспечение и возмещение затрат» о реализации проекта «Внедрение решения Global-Marine: система управления судостроением и судоремонтом» с целью внедрения интегрированной информационной системы цифрового производства при строительстве судов гражданского флота с применением современных инновационных технологий. Это позволит увеличить объемы производства и производительность труда с учетом замещения зарубежных цифровых продуктов и решений. Реализация проектов, ориентированных на достижение требуемого уровня «цифровой зрелости», и привлечение необходимого объема производственных инвестиций является актуальной и востребованной для российских судостроительных верфей практической задачей в свете обеспечения их сбалансированного и устойчивого перспективного производственно-экономического развития [14].

В настоящее время значительное внимание уделяется вопросам системного подхода к решению задач судостроительно-судоремонтного производства с учетом организационно-технической составляющей. Модернизация и внедрение инноваций позволит решить проблемы, связанные с технологией постройки и ремонтов судов. В частности, в статье [15, с. 465] отмечается следующее: «Длительность циклов разработки, постройки и эксплуатации судов, их низкая серийность и высокая капиталоемкость создают определенные проблемы, которые могут быть решены только с переходом отрасли на инновационный путь развития с технологической модернизацией предприятий». Автор указанной публикации обращает внимание на необходимость устранения причин, тормозящих процессы внедрения инноваций на предприятиях судостроительной отрасли, такие как ограниченность ресурсов, рискованность внедрения инноваций, несоответствие кадрового персонала и отсутствие мотивации. Цифровизацию необходимо рассматривать как конкурентное

преимущество, позволяющее эффективно, качественно и безопасно выполнять заказы на строительство судов [16].

Современное состояние отечественных судостроительных заводов и верфей требует всестороннего анализа, целью которого является выявление наиболее вероятных и экономически эффективных путей будущего развития судостроительной отрасли. Для возможного анализа необходимо выполнение следующих этапов: описание объекта (судостроительного завода) со всей системой взаимосвязи; анализ тенденций развития в прошлом и настоящем; постановку целей и задач развития объекта и определение путей их достижения в прогнозируемом периоде. Первые два этапа имеют характер инерционного прогноза. Результаты их реализации определяют такой уровень развития, который может быть достигнут при сохранении в будущем закономерностей, сформированных к началу прогнозируемого периода. Третий этап представляет целевой прогноз, т. е. прогнозирование путей достижения заранее заданных целей с учетом существующих зависимостей темпов развития и изменения их в процессе внедрения инновационных технических и технологических решений, достижений научно-технического прогресса и совершенствования организации судостроительного производства.

Для прогнозирования развития судостроительной отрасли на перспективу необходимо применять методы прогнозирования объемов строительства, предусматривающие выполнение следующих этапов:

- точное формулирование проблем, подлежащих решению;
- исследование особенностей строительства судов;
- уточнение влияния научно-технического прогресса на эффективность производства;
- получение представления об уровне развития, объемах и сроках внедрения и эффективности новых типов оборудования и технологических процессов;
- выполнение группировки всех возможных нововведений (инновационных решений) по степени их готовности к использованию, степени распространения и освоения к началу прогнозируемого периода.

На базе выполнения указанных процедур можно получить четкое представление об уровне развития, объемах и сроках внедрения и эффективности новых типов оборудования, технологических процессов и т. п. Из всей совокупности возможных путей развития на основе логического анализа необходимо выбрать в наибольшей степени соответствующий решению задач, поставленных перед судостроительной отраслью. Задача выбора оптимального варианта перспективного развития судостроительной отрасли с учетом строительства инновационных судов и перспектив их последующего ремонта требует точного количества описания всех допустимых вариантов и точного определения *критерия оптимальности*, отражающего эффективность функционирования всей производственной системы судостроительного завода с учетом подготовки производства. Несмотря на то, что в судостроении наблюдается положительная динамика производства, на которое замыкается множество производств оборудования, комплектующих, материалов и т. д., в настоящее время сохраняется зависимость от импорта.

Длительность сроков проектирования и постройки судов, низкая серийность и высокая капиталоемкость, значительная себестоимость постройки судов являются основными проблемами судостроительной отрасли, решение которых возможно путем перехода на инновационный путь развития. В связи с этим необходимо принятие мер, направленных на технологическую модернизацию судостроительных производств. Состав организационно-экономического механизма технологической модернизации предлагается реализовать с помощью социально-экономических, организационно-технических, информационных и других методов, а также учета основных задач, определяющих направления инновационного развития судостроительной отрасли: поддержание необходимого технического уровня судостроительного производства и выведение его на современный уровень, конкурентоспособный по отношению к состоянию зарубежного производства; обеспечение строительства судов в минимально возможные сроки с наименьшими расходами.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Савченко О. В. Современное состояние, проблемы и перспективы развития отечественного гражданского судостроения / О. В. Савченко, В. Н. Половинкин // Труды Крыловского государственного научного центра. — 2022. — № 3(401). — С. 152–164. DOI: 10.24937/2542-2324-2022-3-401-152-164.
2. Тебекин А. В. Анализ проблем и перспектив реализации планов импортозамещения в отраслях промышленности / А. В. Тебекин // Транспортное дело России. — 2022. — № 2. — С. 159–165. DOI: 10.52375/20728689_2022_2_159.
3. Михеева Т. А. Влияние качества подготовки производства на судостроительном предприятии на качество выпускаемой продукции / Т. А. Михеева, И. Н. Лучков, Е. Г. Бурмистров // Вестник Волжской государственной академии водного транспорта. — 2018. — № 56. — С. 55–64.
4. Абдикеев Н. М. Импортозамещение в высокотехнологичных отраслях промышленности в условиях внешних санкций / Н. М. Абдикеев // Управленческие науки. — 2022. — Т. 12. — № 3. — С. 53–69. DOI: 10.26794/2304-022X-2022-12-3-53-69.
5. Горин Е. А. Цифровые технологии в отечественном судостроении / Е. А. Горин // Бюллетень науки и практики. — 2017. — № 11 (24). — С. 236–242. DOI: 10.5281/zenodo.1048457.
6. Абрамов А. В. Конкурентоспособность и инновационный потенциал судостроительной промышленности / А. В. Абрамов [и др.] // Региональные проблемы преобразования экономики. — 2016. — № 5 (67). — С. 14–22.
7. Кирильчук С. П. Цифровизация и инвестирование как факторы производственно-экономического развития российских судостроительных верфей / С. П. Кирильчук, Д. С. Князева // Инновации и инвестиции. — 2022. — № 5. — С. 4–7.
8. Онежский судостроительно–судоремонтный завод [Электронный ресурс]. — Режим доступа: <http://onegoshipyard.ru/proizvodstvo/sudostroenie/> (дата обращения: 18.01.2023).
9. 100-летие Республики Карелия. Онежский судостроительно–судоремонтный завод приступил к сборке первого судна-крановлаза [Электронный ресурс]. — Режим доступа: <https://gov.karelia.ru/news/23-04-2020-100-letie-respubliki-kareliya-onezhskiy-sudostroitelno-sudoremontnyy-zavod-pristupil-k-sborke-pervog/> (дата обращения: 18.01.2023).
10. Специалисты АО «ЦТСС» приступили к выполнению авторского надзора за глубокой модернизацией АО «Онежский судостроительно-судоремонтный завод» [Электронный ресурс]. — Режим доступа: <http://www.sstc.spb.ru/news/spetsialisty-ao-tstss-pristupili-k-vypolneniyu-avtorskogo-nadzora-za-glubokoy-modernizatsiey-ao-onezh.html> (дата обращения: 24.01.2023).
11. Середохо В. А. Проект «Цифровая верфь»: создание экосистемы предприятия для развития цифрового производства / В. А. Середохо, С. М. Макеев // Инновации. — 2019. — № 9 (251). — С. 19–22.
12. Аналогов петрозаводской цифровой верфи в России нет [Электронный ресурс]. — Режим доступа: <http://rk.karelia.ru/ekonomika/production/dmitrij-rodionov-analogov-petrozavodskoj-tsifrovoj-verfi-v-rossii-net/> (дата обращения: 24.01.2023).
13. Отраслевой центр высокоточных измерений АО «ЦТСС» [Электронный ресурс]. — Режим доступа: http://www.sstc.spb.ru/upload/medialibrary/%D0%A6%D0%A2%D0%A1%D0%A1_%D0%9E%D1%82%D1%80%D0%B0%D1%81%D0%BB%D0%B5%D0%B2%D0%B9%20%D1%86%D0%B5%D0%BD%D1%82%D1%80%20%D0%B2%D1%8B%D1%81%D0%BE%D0%BA%D0%BE%D1%82%D0%BE%D1%87%D0%BD%D1%8B%D1%85%20%D0%B8%D0%B7%D0%BC%D0%B5%D1%80%D0%B5%D0%BD%D0%B8%D0%B9.pdf (дата обращения: 16.05.2022).
14. 7 июля на Онежском судостроительно-судоремонтном заводе состоялось заседание межведомственной рабочей группы [Электронный ресурс]. — Режим доступа: <http://onegoshipyard.ru/press-centr/novosti/7-ijulja-na-onezhskom-sudostroitel-no-sudoremontnom-zavode-sostojalos-zasedanie-mezhvedomstvennoj-rabochej-gruppy/> (дата обращения: 24.01.2023).
15. Полосков С. С. Судостроение России на инновационном пути развития: проблемы и перспективы / С. С. Полосков // Вопросы инновационной экономики. — 2018. — Т. 8. — № 3. — С. 465–478. DOI: 10.18334/vinec.8.3.39404.
16. Верфи будущего [Электронный ресурс]. — Режим доступа: <https://www.kommersant.ru/doc/4154779> (дата обращения: 21.05.2022).

REFERENCES

1. Savchenko, Oleg V., and Valery N. Polovinkin. "The current state, problems and prospects of domestic commercial shipbuilding." *Transactions of the Krylov State Research Center* 3(401) (2022): 152–164. DOI: 10.24937/2542-2324-2022-3-401-152-164.
2. Tebekin, A. "Analysis of problems and prospects for the implementation of import substitution plans in industries." *Transport business of Russia* 2 (2022): 159–165. DOI: 10.52375/20728689_2022_2_159.
3. Mikheeva, T.A., I. N. Luchkov, and E. G. Burmistrov. "Impact of quality of preparation of production at shipbuilding enterprise on quality of production." *Bulletin of VSAWT* 56 (2018): 55–64.
4. Abdikeev, Niyaz M. "Import substitution in high-tech industries under external sanctions." *Management Sciences* 12.3 (2022): 53–69. DOI: 10.26794/2304-022X-2022-12-3-53-69.
5. Gorin, Evgenii. "Digital technology in the national shipbuilding." *Bulletin of Science and Practice* 11(24) (2017): 236–242. DOI: 10.5281/zenodo.1048457.
6. Abramov, Alexey Vasilievich, Vladimir Leonidovich Alexandrov, Boris Alexandrovich Gorelik, Vladimir Georgievich Makarov, and Alexander Yurievich Smirnov. "Competitive ability and the innovative potential of the shipbuilding industry." *Regional'nye problem preobrazovaniya ekonomiki* 5(67) (2016): 14–22.
7. Kirilchuk, S. P., and D. S. Knyazeva. "Digitalization and investment as factors for industrial and economic development of Russian shipyards." *Innovations and investments* 5 (2022): 4–7.
8. Onega shipbuilding and ship repair plant. Web. 18 Jan. 2023 <<http://onegoshipyar.ru/proizvodstvo/sudostroenie>>.
9. 100-letie Respubliki Kareliya. Onezhskii sudostroitel'no–sudoremontnyi zavod pristupil k sborke pervogo sudna-krabolova. Web. 18 Jan. 2023 <<https://gov.karelia.ru/news/23-04-2020-100-letie-respubliki-kareliya-onezhskiy-sudostroitelno-sudoremontnyy-zavod-pristupil-k-sborke-pervogo>>.
10. Spetsialisty AO «TsTSS» pristupili k vypolneniyu avtorskogo nadzora za glubokoi modernizatsiei AO «Onezhskii sudostroitel'no-sudoremontnyi zavod». Web. 24 Jan. 2023 <<http://www.sstc.spb.ru/news/spetsialisty-ao-tstss-pristupili-k-vypolneniyu-avtorskogo-nadzora-za-glubokoy-modernizatsiey-ao-onezh.html>>.
11. Seredokho, V. A., and S. M. Makeev. "Digital shipyard: building ecosystem of enterprise for digital production." *Innovations* 9(251) (2019): 19–22.
12. Analogov petrozavodskoi tsifrovoy verfi v Rossii net. Web. 24 Jan. 2023 <<http://rk.karelia.ru/ekonomika/production/dmitrij-rodionov-analogov-petrozavodskoj-tsifrovoy-verfi-v-rossii-net/>>.
13. Otrasevoi tsentr vysokotochnykh izmerenii AO «TsTSS». Web. 16 May 2023 <http://www.sstc.spb.ru/upload/medialibrary/%D0%A6%D0%A2%D0%A1%D0%A1_%D0%9E%D1%82%D1%80%D0%B0%D1%81%D0%BB%D0%B5%D0%B2%D0%B9%20%D1%86%D0%B5%D0%BD%D1%82%D1%80%20%D0%B2%D1%8B%D1%81%D0%BE%D0%BA%D0%BE%D1%82%D0%BE%D1%87%D0%BD%D1%8B%D1%85%20%D0%B8%D0%B7%D0%BC%D0%B5%D1%80%D0%B5%D0%BD%D0%B8%D0%B9.pdf>.
14. 7 iyulya na Onezhskom sudostroitel'no-sudoremontnom zavode sostoyalos' zasedanie mezhvedomstvennoy rabochey gruppy. Web. 24 Jan. 2023 <<http://onegoshipyar.ru/press-centr/novosti/7-iyulya-na-onezhskom-sudostroitelno-sudoremontnom-zavode-sostojalos-zasedanie-mezhvedomstvennoj-rabochej-gruppy/>>.
15. Poloskov, S. S. "The innovative way of Russia's shipbuilding development: problems and prospects." *Russian Journal of Innovation Economics* 8.3 (2018): 465–478. DOI: 10.18334/vinec.8.3.39404.
16. Verfi budushchego. Web. 21 May 2022 <<https://www.kommersant.ru/doc/4154779>>.

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

Пашеева Татьяна Юрьевна —
кандидат технических наук, научный сотрудник
ФГБУН Федеральный исследовательский центр
«Карельский научный центр
Российской академии наук»
185910, Российская Федерация, г. Петрозаводск,
ул. Пушкинская, 11
e-mail: tatjana-pasheeva@rambler.ru

INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Pasheeva, Tatyana Yu. —
PhD, researcher
Karelian Research Centre
of the Russian Academy
of Sciences
11 Pushkinskaya Str., Petrozavodsk, 185910,
Russian Federation
e-mail: tatjana-pasheeva@rambler.ru

Фатов Вадим Иванович — заместитель
директора по подготовке производства
АО «Онежский судостроительно-судоремонтный
завод»
185005, Российская Федерация, г. Петрозаводск,
ул. Ригачина, 25
e-mail: V.Fatov@onegoshipyard.ru

Fatov, Vadim I. —
Deputy Director for production preparation
Onego Shipyard, JSC
25 Rigachin Str.,
Petrozavodsk, 185005,
Russian Federation
e-mail: V.Fatov@onegoshipyard.ru

*Статья поступила в редакцию 15 февраля 2023 г.
Received: February 15, 2023.*

DOI: 10.21821/2309-5180-2023-15-2-295-303

EXPERIMENTAL STUDY OF THE INFLUENCE OF CATAMARAN PARAMETERS ON WATER RESISTANCE

K. M. Ushakov^{1,2}, Yu. V. Yatsuk¹

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

² — Forss Tekhnologii, Ltd., St. Petersburg, Russian Federation

The advantages of multihulls over monohulls are better running characteristics at high speeds and a larger deck area, which is critical for passenger ships. When designing, it is necessary to choose geometric parameters, which include the distance between the hulls. A brief description of the existing methods for calculating the towing resistance of multihull vessels is provided in the paper. New results of an experimental study of the effect of transverse clearance and the ratio of the one hull width to draft on the resistance of a displacement catamaran are also provided. The studies are carried out by testing a small non-self-propelled model of a multihull vessel in the towing tank. The model length is 1.84 m; the width of one hull is 0.15 m; the draft varies from 0.07 m to 0.11 m. The experiment is carried out in the towing tank of the Admiral Makarov State University of Maritime and Inland Shipping. The results are processed according to the Froude method without taking into account dynamic heel and they are presented as a dependence of the residual resistance coefficients on the Froude number. By approximating the experimental data, an expression allowing evaluating the influence of these parameters on the value of the residual resistance in the range of Froude numbers 0.30–0.70 is obtained. One hull is also tested at two draft values in the same speed range. These data are not approximated, but they are presented in the paper in the form of experimentally obtained points. The results of the work can be used at the initial stages of designing catamarans and at studying the influence of these factors on the residual resistance.

Keywords: Ship, catamaran, multihull, water resistance, model, towing test, high speed vessel, rest resistance.

For citation:

Ushakov, Konstantin M., and Yury V. Yatsuk. "Experimental study of the influence of catamaran parameters on water resistance." *Vestnik Gosudarstvennogo universiteta morskogo i rechnogo flota imeni admirala S. O. Makarova* 15.2 (2023): 295–303. DOI: 10.21821/2309-5180-2023-15-2-295-303.

УДК 629.12:532.583.4

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ ПАРАМЕТРОВ КАТАМАРАНА НА ОСТАТОЧНОЕ СОПРОТИВЛЕНИЕ

К. М. Ушаков^{1,2}, Ю. В. Яцук¹

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

² — ООО «Форс технологии», Санкт-Петербург, Российская Федерация

Предметом исследования является изучение преимуществ многокорпусных судов перед однокорпусными, заключающихся в лучших ходовых характеристиках на больших скоростях и большей площади палубы, что является критичным для пассажирских судов. Отмечается, что при проектировании необходимо выбирать геометрические параметры, в том числе расстояние между корпусами. В работе дано краткое описание существующих методов расчета буксировочного сопротивления многокорпусных судов, а также приведены новые результаты экспериментального исследования влияния поперечного клиренса и отношения ширины одного корпуса к осадке на ходкость водоизмещающего катамарана. Отмечается, что исследования проводились путем испытания в опытовом бассейне малой несамоходной модели многокорпусного судна. Длина модели составляла 1,84 м, ширина одного корпуса — 0,15 м, осадка варьировалась от 0,07 м до 0,11 м. Отличительными особенностями модели является большая полнота обводов и волнорассекающий нос. Эксперимент выполнялся в опытовом бассейне ФГБОУ ВО «ГУМРФ имени адмирала С. О. Макарова». Результаты были обработаны по методу Фруда без учета динамической посадки и представлены в виде зависимости коэффициентов остаточного сопротивления от числа Фруда. Путем аппроксимации

экспериментальных данных было получено выражение, позволяющее оценить влияние указанных параметров на величину остаточного сопротивления в диапазоне чисел Фруда 0,30–0,70. Также при двух значениях осадки в том же диапазоне скоростей был испытан один корпус катамарана. Эти данные не аппроксимированы, но приведены в статье в виде экспериментально полученных точек. Результаты работы могут быть использованы на начальных стадиях проектирования катамаранов и при исследовании влияния указанных факторов на остаточное сопротивление.

Ключевые слова: судно, катамаран, ходкость, многокорпусное судно, сопротивление, модельные испытания, высокоскоростные суда, остаточное сопротивление

Для цитирования:

Ушаков К. М. Экспериментальное исследование влияния параметров катамарана на остаточное сопротивление / К. М. Ушаков, Ю. В. Яцук // Вестник Государственного университета морского и речного флота имени адмирала С. О. Макарова. — 2023. — Т. 15. — № 2. — С. 295–303. DOI: 10.21821/2309-5180-2023-15-2-295-303.

Введение (Introduction)

Многокорпусные суда обладают некоторыми преимуществами перед однокорпусными — в частности, меньшее буксировочное сопротивление на больших скоростях, большую площадь палуб, более высокую начальную остойчивость, меньшие уровни ходового дифферента. Все это обуславливает высокую популярность данного типа судов для обеспечения высокоскоростных перевозок. В процессе проектирования часто возникает необходимость выбора поперечного клиренса. При этом увеличение клиренса влечет за собой увеличение ширины моста, а также площади поперечного сечения его балок вследствие увеличения поперечного изгибающего момента. Указанные факторы способствуют увеличению массы корпуса. Для учета данных факторов было выполнено исследование влияния поперечного клиренса и отношения ширины одного корпуса катамарана к осадке.

Целью данной работы является получение данных о сопротивлении воды движению катамаранов с относительно полными обводами.

Методы и материалы (Methods and Materials)

Достоверное прогнозирование ходкости возможно с помощью проведения модельных испытаний или выполнения верифицированного CFD-анализа. Оба этих подхода требуют наличия данных об обводах и посадке судна. На ранних стадиях проектирования эти данные могут быть неизвестны и неоднократно меняться в процессе проектирования. Для предварительной оценки ходкости разрабатываются способы расчета, основанные на серийных физических или численных экспериментах, пригодных для решения задачи оптимизации. Влияние приведенных факторов можно установить, используя серийные испытания катамаранов. В частности, в работе [1] приведен один из таких методов. Все модели серии имеют килеватость и круглую скулу, относительную длину L/B_1 — 6–12, относительную ширину B_1/T — 1–3, безразмерный горизонтальный клиренс c/L — 0,2–0,5 и коэффициенты общей полноты от C_B — 0,33–0,44. Здесь и далее L — длина катамарана по ватерлинии; B_1 — ширина одного корпуса; T — осадка; c — горизонтальный клиренс. Затем в [2] данная серия была дополнена, диапазон L/B увеличен до 15,1.

Результаты численного эксперимента для определения коэффициента волнового сопротивления катамаранов приведены в [3]. Необходимо отметить, что численное моделирование гидродинамики многокорпусных судов имеет особенности [4], математические модели следует верифицировать надежными данными. Регрессионная формула применима для L/B_1 от 10,4 до 20,8, B_1/T от 1,5 до 2,5, C_B от 0,5 до 0,6. В статье [5] приведены данные о сопротивлении моделей катамаранов со значительными вариациями форм обводов. Варьировалась форма носовых обводов, килеватость, острота скулы, наличие продольных реданов, развал бортов. В приведенных исследованиях авторы разделяли сопротивление на волновую и вязкостную составляющие. Автор [6] разделяет полное сопротивление на сопротивление трения и на остаточное сопротивление, что значительно упрощает выполнение практических расчетов, делая этот способ более применимым при проектировании. Исследования гидродинамического взаимодействия корпусов также выполняются довольно часто

[7]. Как правило, варьируется поперечный клиренс, измеряются величины сопротивления, ходовые просадка и дифферент, а также волновой профиль. Такие исследования позволяют определить оптимальный с точки зрения гидродинамики клиренс, но не вполне применимы к задачам проектирования, поскольку требуется учет сразу нескольких факторов. Буксировочное сопротивление, как и гидродинамическое взаимодействие корпусов, зависит от обводов.

Исследования выполнялись путем буксировки модели в опытовом бассейне ФГБОУ ВО «ГУМРФ имени адмирала С. О. Макарова». Длина бассейна 120 м, ширина — 6,0 м, глубина — около 3,0 м. Скорость буксировки во время испытаний достигала 3 м/с, максимально возможная скорость — 6 м/с. Длина модели $L = 1,84$ м, ширина одного корпуса $B_1 = 0,15$ м. Общая ширина катамарана B варьировалась в диапазоне 0,564–0,900 м, осадка — в диапазоне 0,07–0,11 м. Отношение длины к ширине одного корпуса при этом составило 12,26, коэффициент полноты водоизмещения изменялся в пределах 0,750–0,788. С такой геометрией корпуса испытания проводились впервые. Форма обводов одного корпуса показана на рис. 1, подготовленная к испытаниям модель на воде в бассейне — на рис. 2.

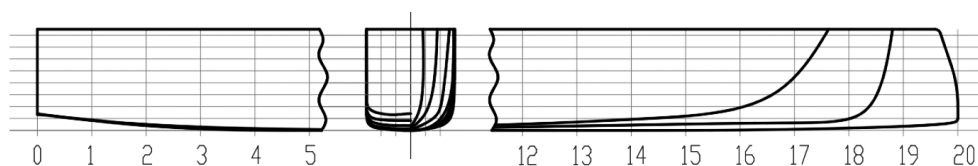


Рис. 1. Форма обводов модели

Модель имеет достаточно большую полноту по сравнению с большинством существующих скоростных катамаранов, обратный наклон форштевня и транцевую корму. Форма носовых обводов является достаточно распространенной и приспособлена для движения судна в условиях волнения (волнорассекающий нос) [8].



Рис. 2. Подготовленная к испытаниям модель

Модель была изготовлена из пенополистирола, поверхность упрочнена эпоксидной смолой, окрашена и отполирована. Для обеспечения турбулентности обтекания в районе первого теоретического шпангоута, в соответствии с [9], был закреплен проволочный турбулизатор, во время испытаний проводился контроль отсутствия аэрации корпусов модели в этом районе.

Результаты (Results)

Испытания проводились в диапазоне чисел Фруда 0,30–0,70. Полученные во время испытаний данные были обработаны по методу Фруда [10]. В процессе буксировочных испытаний измерялись скорость V и буксировочное сопротивление R_m модели.

На основе проведенных испытаний были определены следующие параметры:

- коэффициент остаточного сопротивления корпуса C_R ,

$$C_R = C_M - C_{Fom} \quad (1)$$

- коэффициент полного сопротивления модели

$$C_M = \frac{2R_M}{\rho V^2 S_M} \quad (2)$$

где R_M — измеренная сила сопротивления корпуса модели, Н;

S_M — площадь смоченной поверхности модели, m^2 ;

V — скорость буксировки модели, м/с;

$\rho = 1000 \text{ кг/м}^3$ — массовая плотность воды;

- коэффициент сопротивления эквивалентной гладкой пластины, рассчитанный для модели:

$$C_{Fom} = \frac{0,075}{(\lg Re_M - 2)^2} \quad (3)$$

- число Рейнольдса:

$$Re_M = VL / \nu_M \quad (4)$$

где $\nu_M = 1,092 \cdot 10^{-6}$ — кинематическая вязкость воды в опытовом бассейне, m^2/c (температура воды в процессе испытаний составляла $16,5^\circ C$);

- число Фруда:

$$Fn = V / \sqrt{gL} \quad (5)$$

где $g = 9,81 \text{ м/с}^2$ — ускорение свободного падения.

В результате испытаний были получены зависимости коэффициентов остаточного сопротивления C_R от числа Фруда Fn , относительного клиренса c/L , а также отношения B_1/T , где c — горизонтальный клиренс, м; B_1 — ширина одного корпуса, м; T — осадка катамарана (рис. 3).

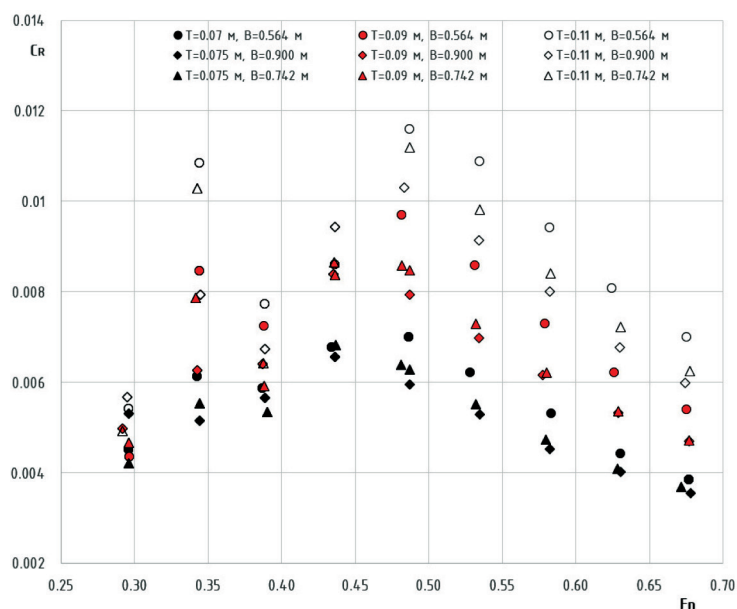


Рис. 3. Экспериментальные значения коэффициентов остаточного сопротивления катамарана в зависимости от числа Фруда, относительного клиренса и осадки

Полученные значения коэффициентов остаточного сопротивления были аппроксимированы следующей формулой для ряда чисел Фруда:

$$C_R = \left(\frac{B_1}{T}\right)^2 \left[a_2 \left(\frac{c}{L}\right)^2 + a_1 \frac{c}{L} + a_0 \right] + \frac{B_1}{T} \left[b_2 \left(\frac{c}{L}\right)^2 + b_1 \frac{c}{L} + b_0 \right] + \left[d_2 \left(\frac{c}{L}\right)^2 + d_1 \frac{c}{L} + d_0 \right]. \quad (6)$$

Коэффициенты полинома приведены в следующей таблице.

Коэффициенты аппроксимации

Fn	0,30	0,34	0,39	0,44	0,49	0,53	0,58	0,63	0,70
a_2	0,11082	0,20807	-0,21251	0,2152	-0,18363	-0,17895	-0,14737	-0,18304	-0,13216
a_1	-0,05361	-0,09927	0,09936	-0,09378	0,09578	0,082	0,064	0,07656	0,05422
a_0	0,00776	0,013269	-0,01154	0,00431	-0,00901	-0,00467	-0,00247	-0,00413	-0,0023
b_2	-0,39497	-0,47322	0,69123	-0,75029	0,74678	0,65497	0,52222	0,63684	0,43333
b_1	0,19569	0,238622	-0,32067	0,31211	-0,38678	-0,29889	-0,22544	-0,263	-0,17367
b_0	-0,02966	-0,04225	0,03525	-0,01499	0,03071	0,01151	0,00343	0,00904	0,00242
d_2	0,40532	0,150877	-0,4555	0,66433	-0,71404	-0,54854	-0,40234	-0,50468	-0,31754
d_1	-0,19992	-0,10533	0,20411	-0,26644	0,36033	0,24044	0,16489	0,19878	0,11767
d_0	0,0346	0,040899	-0,01385	0,02238	-0,01445	0,00569	0,0119	0,00536	0,01005

Пределы применимости формулы (6): B_1/T — 1,30–2,14, c/L — 0,13–0,35. Отдельно проводились испытания одиночного корпуса катамарана. Экспериментально полученные точки приведены на рис. 4.

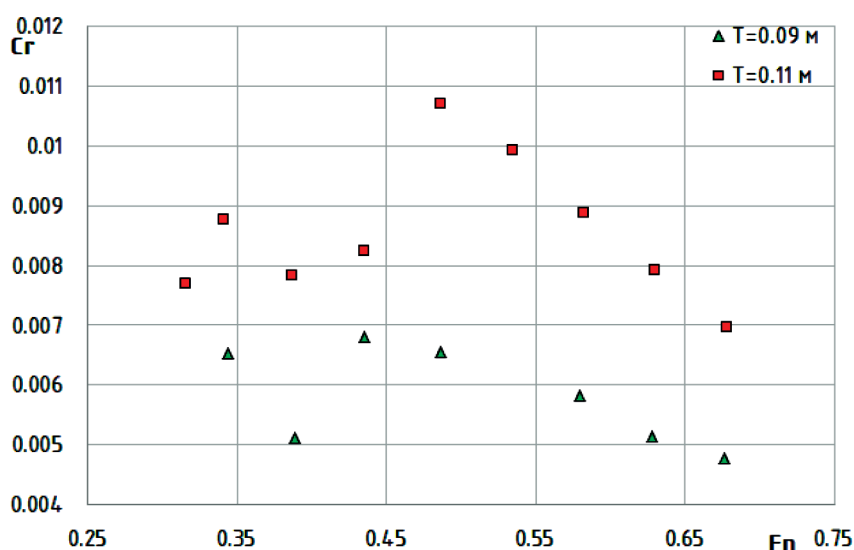


Рис. 4. Экспериментальные значения коэффициентов остаточного сопротивления в зависимости от числа Фруда относительного клиренса и осадки

Эти данные не учитываются в формуле (6), но могут быть использованы при проектировании катамаранов и судов с соответствующей формой обводов. Поскольку подобные размерения для однокорпусных судов нехарактерны, испытания выполнялись в ограниченном объеме, при двух осадках: 0,09 м и 0,11 м.

Обсуждение (Discussion)

Приведенный полином (6) предлагается использовать для оценки влияния на коэффициент остаточного сопротивления изменения клиренса и осадки катамарана. Однако он может быть

использован и для непосредственного расчета коэффициента остаточного сопротивления катамарана с близкими значениями C_n и L/B_1 .

Расчет буксировочного сопротивления натурного судна может быть выполнен по формуле

$$R_n = C_n \frac{\rho_n \cdot V_n^2}{2} S_n, \quad (7)$$

где ρ_n — плотность забортной воды в районе эксплуатации судна, т/м³.

Коэффициент полного сопротивления судна:

$$C_n = C_R + C_{Fo,n} + \Delta C, \quad (8)$$

где ΔC — надбавка, учитывающая шероховатость корпуса и сопротивление выступающих частей.

Коэффициент сопротивления эквивалентной гладкой пластины, рассчитанный для натурного судна:

$$C_{Fo,n} = 0,075 / (\lg Re_n - 2)^2. \quad (9)$$

Число Рейнольдса для натурного судна:

$$Re_n = V_n L_{вЛН} / \nu_n, \quad (10)$$

где ν_n — кинематическая вязкость воды для натурного судна, м²/с;

Полученные кривые по характеру близки к зависимостям, приводимым в публикациях различных авторов — характерные «горбы» в районе $Fn = 0,35$ и $Fn = 0,50$ и близкая к линейной зависимость в диапазоне $Fn = 0,55–0,70$. Такой же характер кривых приводится, например, в [11]. В [12] общий характер кривых сохраняется, однако отсутствует локальный максимум в районе $Fn = 0,35$. Такие различия могут объясняться влиянием погруженной площади транца, поскольку величина «горба» увеличивается с увеличением B/T и соответствующим увеличением погруженной площади. Существенная разница в указанных площадях обнаруживается и у моделей в приведенных ранее работах. Как показано в [13] и [14], от структуры обтекания транца зависят как волновое сопротивление, так и сопротивление формы. Режим обтекания зависит от формы транца и числа Фруда по осадке транцем:

$$Fn_t = V / \sqrt{9,81 T_t}, \quad (11)$$

где T_t — осадка транцем.

Режим обтекания может быть условно разделен на четыре фазы [15]: *фаза 1* — обтекание со стационарным вихрем в районе транца; *фаза 2* — нестационарное обтекание с образованием «кармановской дорожки вихрей»; *фаза 3* — «осушение» транца с образованием вихрей; *фаза 4* — «сухой транец».

В работе [16] показано, что кривая коэффициентов остаточного сопротивления имеет максимум на скоростях, соответствующих фазам 2 и 3. Этим фазам применительно к моделям, испытанным в данной работе, соответствовали числа Фруда $Fn \approx 0,35$. Таким образом, при использовании формулы (6) следует особенно внимательно относиться к соответствию погруженных площадей транца, по крайней мере, при $Fn < 0,4$. Аналогичные процессы происходят также при движении одиночных корпусов — обтекание транца можно разделить на четыре стадии, а кривые остаточного сопротивления имеют локальный максимум в районе $Fn \approx 0,35$.

На рис. 5 приведены результаты расчетов коэффициентов остаточного сопротивления по формуле (6) и в соответствии с рекомендациями публикации [6]. Расчеты выполнялись для нескольких вариантов. На графике приведены кривые для $c/L = 0,15$, $B_1/T = 1,35$, $B_1/T = 1,7$ и $B_1/T = 2,00$. Как видно, характер кривых довольно близок. Присутствуют различия по величине коэффициентов остаточного сопротивления и по положению экстремумов их кривой. Кроме того, метод [6] не показывает локальных максимумов кривых остаточного сопротивления в районе чисел Фруда 0,35.

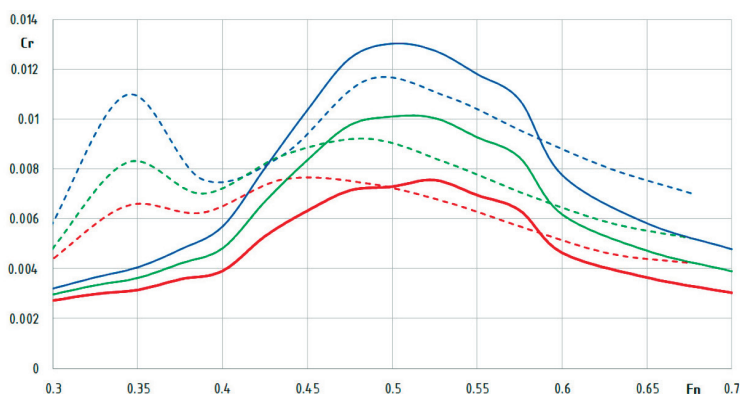


Рис. 5. Сравнение расчетов коэффициентов остаточного сопротивления

Следует также отметить, что ИТТС [9] для высокоскоростных судов рекомендует во время испытаний измерять ходовой дифферент, определять площадь смоченной поверхности во время движения и разделять остаточное сопротивление и сопротивление трения не по формуле (1), а с учетом того факта, что трение будет возникать только на той части корпуса, которая находится в воде, по формуле (11):

$$C_{RM} = C_M - (S_l/S_M)C_{Fo,M}. \quad (12)$$

Здесь S_l — площадь смоченной поверхности в ходовом режиме.

По сравнению с классическим способом, использованным в работе [6] и в данной статье, такой метод пересчета увеличивает долю сопротивления, моделируемую по числу Фруда, и уменьшает долю, пересчитываемую по числу Рейнольдса, что физически более достоверно. Однако в этом случае при испытаниях необходимо также измерять ходовой дифферент и площадь смоченной поверхности, а также пересчитывать их значения в реальных размерах, что существенно усложняет расчет.

Заключение (Conclusion)

В работе приведены результаты модельных испытаний водоизмещающего катамарана при различных клиренсах и осадках, а также аппроксимация этих результатов. Полученные данные могут быть использованы на ранних стадиях проектирования многокорпусных судов при выборе расстояния между корпусами. Выполненное сравнение характера полученных кривых с данными, приведенными в других работах, показывает хорошую достоверность эксперимента и аппроксимации, а выявленные различия вызваны иными геометрическими параметрами судов.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Insel M.* An Investigation into Resistance Components of High-Speed Displacement Catamarans. Doctoral Thesis / M. Insel. — United Kingdom: University of Southampton, 1990. — 378 p.
2. *Molland A. F.* Resistance Experiments on a Systematic Series of High Speed Displacement Catamaran Forms: Variation of Length-Displacement Ratio and Breadth-Draft Ratio (Ship Science Report, 71) / A. F. Molland, J. F. Wellicome, P. R. Couser. — Southampton, UK: University of Southampton, 1994. — 82 p.
3. *Pham X. P.* Wave Resistance Prediction of Hard-Chine Catamarans through Regression Analysis / X. P. Pham, K. Kantimahanthi, P. K. Sahoo // 2nd International Euro Conference on High Performance Marine Vehicles, Hamburgo, Alemania. — 2001. — Pp. 382–394.
4. *Sugalski K.* Influence of the Symmetry Plane Boundary Condition on the Planing Multihull Calm Water Resistance Test. CFD to Towing Tank Comparison / K. Sugalski // New Trends in Production Engineering. — 2018 — Vol. 1. — Is. 1. — Pp. 385–391. DOI: 10.2478/ntpe-2018-0048.
5. *Schwetz A.* Wave Resistance of Semi-Displacement High Speed Catamarans Through CFD and Regression Analysis / A. Schwetz, P. K. Sahoo // Proc. 3rd International Euro Conference on High Performance Marine Vehicles (HIPER'02). — 2002. — Pp. 355–368.

6. Grubišić I. Multi-attribute design optimization of Adriatic catamaran ferry / I. Grubišić, I. Munić // *Maritime Transportation and Exploitation of Ocean and Coastal Resources*. — London, Leiden, New York, Philadelphia Singapore: Taylor & Francis group plc., 2005. — Pp. 851–858.
7. Broglia R. Experimental investigation of interference effects for high-speed catamarans / R. Broglia, B. Jacob, S. Zaghi, F. Stern, A. Olivieri // *Ocean Engineering*. — 2014. — Vol. 76. — Pp. 75–85. DOI: 10.1016/j.oceaneng.2013.12.003.
8. Крыжевич Г. Б. Способы и средства улучшения мореходности, комфортабельности и снижения материалоемкости пассажирского катамарана / Г. Б. Крыжевич, А. Ю. Правдин // *Труды Крыловского государственного научного центра*. — 2021. — № 1 (395). — С. 99–108. DOI: 10.24937/2542-2324-2021-1-395-99-108.
9. ITTC Recommended procedures and guidelines [Электронный ресурс]. — Режим доступа: https://ittc.info/media/9876/0_0.pdf (дата обращения: 20.09.2021).
10. Бавин В. Ф. Ходкость и управляемость судов: учеб. / В. Ф. Бавин, В. И. Зайков, Л. Б. Сандлер, В. Г. Павленко; под ред. В. Г. Павленко. — М.: Транспорт, 1991. — 396 с.
11. Ramsani Z. B. Effect of Hull Form and its Associated Parameters on the Resistance of a Catamaran / Z. B. Ramsani, I.C.K. Tam, A. Dev // *Proc. of the 6th Intl. Conf. on Technology and Operation of Offshore Support Vessels (OSV Singapore 2016)*. — OSV Singapore, 2016. — Pp. 56–66.
12. Mandru A. Experimental study on catamaran hydrodynamics / A. Mandru, F. Pacuraru // *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*. — IOP Publishing, 2020. — Vol. 916. — Is. 1. — Pp. 012060. DOI: 10.1088/1757-899X/916/1/012060.
13. Korkmaz K. B. Scaling of wetted-transom resistance for improved full-scale ship performance predictions / K. B. Korkmaz, S. Werner, R. Bensow // *Ocean Engineering*. — 2022. — Vol. 266. — Pp. 112590. DOI: 10.1016/j.oceaneng.2022.112590.
14. Kamal I. M. Influence of the transom immersion to ship resistance components at low and medium speeds / I. M. Kamal, A. I. Ismail, M. N. Abdullah, Y. A. Ahmed // *Journal of Naval Architecture and Marine Engineering*. — 2020. — Vol. 17. — No. 2. — Pp. 165–182. DOI: 10.3329/jname.v17i2.48494.
15. Haase M. Wave-piercing Catamaran Transom Stern Ventilation Process / M. Haase, J. Binns, G. Thomas N. Bose // *Ship Technology Research*. — 2016. — Vol. 63. — Is. 2. — Pp. 71–80. DOI: 10.1080/09377255.2015.1119922.
16. Hadler J. B. On the Effect of Transom Area on the Resistance of Hi-Speed Monohulls / J. B. Hadler, J. L. Kleist, M. L. Unger. — *Proceedings of 9th International Conference on Fast Sea Transportation*. — 2007. — Pp. 176–183.

REFERENCES

1. Insel, Mustafa. An Investigation into Resistance Components of High-Speed Displacement Catamarans. Doctoral Thesis. United Kingdom: University of Southampton, 1990.
2. Molland, A.F., J. F. Wellicome, and P. R. Couser. *Resistance experiments on a systematic series of high speed displacement catamaran forms: variation of length-displacement ratio and breadth-draught ratio* (Ship Science Report, 71). Southampton, UK: University of Southampton, 1994.
3. Pham, Xuan P., Kishore Kantimahanthi, and Prasanta K. Sahoo. “Wave resistance prediction of hard-chine catamarans through regression analysis.” *2nd International Euro Conference on High Performance Marine Vehicles, Hamburg, Alemania*. 2001.
4. Sugalski, Karol. “Influence of the Symmetry Plane Boundary Condition on the Planing Multihull Calm Water Resistance Test. CFD to Towing Tank Comparison.” *New Trends in Production Engineering* 1.1 (2018): 385–391. DOI: 10.2478/ntpe-2018-0048.
5. Schwetz, Adam, and P. K. Sahoo. “Wave resistance of semi-displacement high speed catamarans through CFD and regression analysis.” *Proc. 3rd International Euro Conference on High Performance Marine Vehicles (HIPER’02)*. 2002.
6. Grubišić Izvor, and Ivan Munić. “Multi-attribute design optimization of Adriatic catamaran ferry.” *Maritime Transportation and Exploitation of Ocean and Coastal Resources*. London, Leiden, New York, Philadelphia Singapore: Taylor & Francis group plc., 2005. 851–858.
7. Broglia, Riccardo, Boris Jacob, Stefano Zaghi, Frederick Stern, and Angelo Olivieri. “Experimental investigation of interference effects for high-speed catamarans.” *Ocean Engineering* 76 (2014): 75–85. DOI: 10.1016/j.oceaneng.2013.12.003.

8. Kryzhevich, Gennady B., and Andrian Yu Pravdin. "Methods and means to improve seakeeping performance and comfort and to reduce material consumption of passenger catamaran." *Transactions of the Krylov State Research Centre* 1(395) (2021): 99–108. DOI: 10.24937/2542-2324-2021-1-395-99-108.
9. ITTC Recommended procedures and guidelines. Web. 20 Sept. 2021 <https://ittc.info/media/9876/0_0.pdf>.
10. Bavin, V.F., V. I. Zaikov, L. B. Sandler, and V. G. Pavlenko. *Khodkost' i upravlyаемost' sudov: ucheb.* Edited by V. G. Pavlenko. M.: Transport, 1991.
11. Ramsani, Zulkarnain Bin, Ivan CK Tam, and Arun Dev. "Effect of Hull Form and its Associated Parameters on the Resistance of a Catamaran." *Proc. of the 6th Intl. Conf. on Technology and Operation of Offshore Support Vessels (OSV Singapore 2016)*. OSV Singapore, 2016. 56–66.
12. Măndru, Anca Maria, and Florin Pacuraru. "Experimental study on catamaran hydrodynamics." *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*. Vol. 916. No. 1. IOP Publishing, 2020. DOI: 10.1088/1757-899X/916/1/012060.
13. Korkmaz, Kadir Burak, Sofia Werner, and Rickard Bensow. "Scaling of wetted-transom resistance for improved full-scale ship performance predictions." *Ocean Engineering* 266 (2022): 112590. DOI: 10.1016/j.oceaneng.2022.112590.
14. Kamal, I. Z. Mustaffa, A. Imran Ismail, M. Naim Abdullah, and Y. Adnan Ahmed. "Influence of the transom immersion to ship resistance components at low and medium speeds." *Journal of Naval Architecture and Marine Engineering* 17.2 (2020): 165–182. DOI: 10.3329/jname.v17i2.48494.
15. Haase, Max, J. Binns, G. Thomas, and N. Bose. "Wave-piercing catamaran transom stern ventilation process." *Ship Technology Research* 63.2 (2016): 71–80. DOI: 10.1080/09377255.2015.1119922.
16. Hadler, J.B., J. L. Kleist, and M. L. Unger. "On the Effect of Transom Area on the Resistance of Hi-Speed Monohulls." *Proceedings of 9th International Conference on Fast Sea Transportation*. 2007. 176–183.

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

Ушаков Константин Михайлович —
старший преподаватель,
ведущий инженер-конструктор
ФГБОУ ВО «ГУМРФ имени адмирала
С. О. Макарова»
198035, Российская Федерация, Санкт-Петербург,
Двинская, 5/7
ООО «Форсс технологии»
190013, Российская Федерация, Санкт-Петербург,
Бронницкая, 44/117, лит. А, пом. 1Н
e-mail: lotinskey@yandex.ru,
kaf_shipbuilding@gumrf.ru
Яцук Юрий Владимирович —
кандидат технических наук, доцент
ФГБОУ ВО «ГУМРФ имени адмирала
С. О. Макарова»
198035, Российская Федерация, Санкт-Петербург,
Двинская, 5/7
e-mail: YatsukUV@gumrf.ru

INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Ushakov, Konstantin M. —
Senior lecturer,
lead design engineer
Admiral Makarov State University of Maritime
and Inland Shipping
5/7 Dvinskaya Str., St. Petersburg, 198035,
Russian Federation
Forss Tekhnologii, Ltd.
44/117 Bronnitskaya Str., St. Petersburg, 190013,
Russian Federation
e-mail: lotinskey@yandex.ru,
kaf_shipbuilding@gumrf.ru
Yatsuk, Yury V. —
PhD, associate professor
Admiral Makarov State University of Maritime
and Inland Shipping
5/7 Dvinskaya Str., St. Petersburg, 198035,
Russian Federation
e-mail: YatsukUV@gumrf.ru

Статья поступила в редакцию 27 января 2023 г.
Received: January 27, 2023.

СУДОВЫЕ ЭНЕРГЕТИЧЕСКИЕ УСТАНОВКИ И ИХ ЭЛЕМЕНТЫ (ГЛАВНЫЕ И ВСПОМОГАТЕЛЬНЫЕ)

DOI: 10.21821/2309-5180-2023-15-2-304-314

THERMAL EFFICIENCY OF ENVIRONMENTALLY FRIENDLY CLOSED COOLING SYSTEMS OF MARINE POWER PLANTS

K. Yu. Fedorovsky, N. K. Grinenko

Sevastopol State University, Sevastopol, Russian Federation

The issues of heat removal efficiency of cladding heat exchangers of closed cooling systems of ship power plants are considered. The use of such systems allows obtaining technical and environmental advantages in the operation of the vessel. The latter ensures the conservation of fish resources of the seas and continental waters. It is shown that the worst conditions for heat removal take place when the vessel is parked. In this case, heat transfer to outboard water is carried out with free convection. This mode is the main calculation mode. In the case of vessel movement, heat removal increases significantly, since it is carried out with forced convection. For the case of the ship berthing, the results of experimental thermal engineering studies on a model of 1m² are presented. It is shown that the efficiency of heat removal significantly depends on the orientation of the ship's plating of the temperature difference in the apparatus. The transition from the bottom location of the apparatus to the side, as well as an increase in the temperature difference, provide greater thermal efficiency. Generalizing similarity equations are obtained for the case of the ship berthing. Based on them, a method for the calculation has been developed. The reliability of this technique is fully confirmed by the results of testing such a heat exchanger, with an area of 100 m², on a self-propelled floating crane of project 15201. It is shown that the obtained generalizing similarity equations have their own characteristics compared to the known ones. This is a consequence of the peculiarities of the processes taking place in such devices. For the case of vessel movement, generalizing similarity equations are also obtained. In this case, the authors have used the results of their own tests of such devices on the floating crane of project 15201, as well as the tests results of other researchers on various ships.

Keywords: ecology, ship power plant, cooling system, heat transfer, ship berthing, vessel movement.

For citation:

Fedorovskiy, Konstantin Yu., and Nadezhda K. Grinenko. "Thermal efficiency of environmentally friendly closed cooling systems of marine power plants." *Vestnik Gosudarstvennogo universiteta morskogo i rechnogo flota imeni admiral S. O. Makarova* 15.2 (2023): 304–314. DOI: 10.21821/2309-5180-2023-15-2-304-314.

УДК: 629.12(075.4)

ТЕПЛОВАЯ ЭФФЕКТИВНОСТЬ ЭКОЛОГИЧЕСКИ БЕЗОПАСНЫХ ЗАМКНУТЫХ СИСТЕМ ОХЛАЖДЕНИЯ СЭУ

К. Ю. Федоровский, Н. К. Гриненко

ФГАОУ ВО «Севастопольский государственный университет», г. Севастополь, Россия

Рассмотрены вопросы эффективности теплоотвода обшивочных теплообменных аппаратов замкнутых систем охлаждения судовых энергетических установок. Использование таких систем позволяет получить технические и экологические преимущества при эксплуатации судна. Последнее обеспечивает сохранение рыбных ресурсов морей и континентальных водоемов. Показано, что наилучшие условия теплоотвода имеют место при стоянке судна. При этом теплоотдача от наружной поверхности судовой обшивки к забортной воде осуществляется при свободной конвекции. Данный режим является основным расчетным. В случае движения судна теплоотвод существенно возрастает, поскольку выполняется при вынужденной конвекции. Для случая стоянки судна представлены результаты экспериментальных теплотехнических исследований на модели

площадью 1 м². Показано, что эффективность теплоотвода существенно зависит от ориентации судовой обшивки температурного напора в аппарате. Переход от днищевого расположения аппарата к бортовому, а также увеличение температурного напора обеспечивают большую тепловую эффективность. На основе полученных обобщающих уравнений подобия для случая стоянки судна разработана методика теплотехнического расчета. Достоверность данной методики полностью подтверждена результатами испытания теплообменника площадью 100 м² на самоходном плавкране пр. 15201. При этом показано, что полученные обобщающие уравнения подобия имеют особенности по сравнению с известными вследствие особенности происходящих процессов в таких аппаратах. В случае движения судна также определены обобщающие уравнения подобия. При этом использованы полученные результаты собственных испытаний таких аппаратов на плавкране пр. 15201, а также результаты испытаний других исследователей на различных судах.

Ключевые слова: экология, судовая энергетическая установка, система охлаждения, теплоотдача, теплопередача, стоянка и движение судна.

Для цитирования:

Федоровский К. Ю. Тепловая эффективность экологически безопасных замкнутых систем охлаждения СЭУ / К. Ю. Федоровский, Н. К. Гриненко // Вестник Государственного университета морского и речного флота имени адмирала С. О. Макарова. — 2023. — Т. 15. — № 2. — С. 304–314. DOI: 10.21821/2309-5180-2023-15-2-304-314.

Введение (introduction)

В настоящее время все большее распространение получают замкнутые системы охлаждения (ЗСО) судовых энергетических установок (СЭУ), что подтверждено данными Российского морского регистра судоходства [1]. Такие системы исключают прием судном заборной воды, используемой для охлаждения. По сравнению с широко распространенными двухконтурными разомкнутыми системами охлаждения, потребляющими заборную воду, ЗСО имеют ряд преимуществ. С технической точки зрения такие системы обеспечивают большую надежность эксплуатации СЭУ и судна в целом, особенно в загрязненной акватории. Также имеется возможность сокращения количества контуров системы, что приводит к уменьшению протяженности трубопроводов и количества насосов. Последнее является весьма важным с позиции выполнения требований гл. 4 прил. 6 Международной морской конвенции МАРПОЛ 73/78 в отношении энергоэффективности судов [2], так как обеспечивает снижение энергопотребления.

С экологической точки зрения замкнутые системы охлаждения, по сравнению с разомкнутыми, полностью исключают негативное воздействие на морские ресурсы, проявляющееся в том, что попадающие в систему охлаждения из окружающей акватории планктон, икринки рыб и рыбная молодь практически полностью погибают [3]. В конечном счете это приводит к сокращению рыбных ресурсов морей и континентальных водоемов. В ЗСО отвод теплоты в окружающую судно акваторию может осуществляться с помощью устройств теплоотвода (УТ), имеющих различную конструкцию. Так, в качестве примера на рис. 1 показаны устройства блочного типа, расположенные снаружи судовой обшивки или в специальных выгородках корпуса [4], [5]. Однако такие устройства нарушают обводы корпуса судна, создавая дополнительное сопротивление, и сравнительно легко повреждаемы. Кроме того, существуют сложности с очисткой от загрязнения и обрастания. Указанных недостатков лишены УТ, обеспечивающие передачу теплоты через судовую обшивку [6] — обшивочные теплообменные аппараты (ОТОА) — рис. 2.

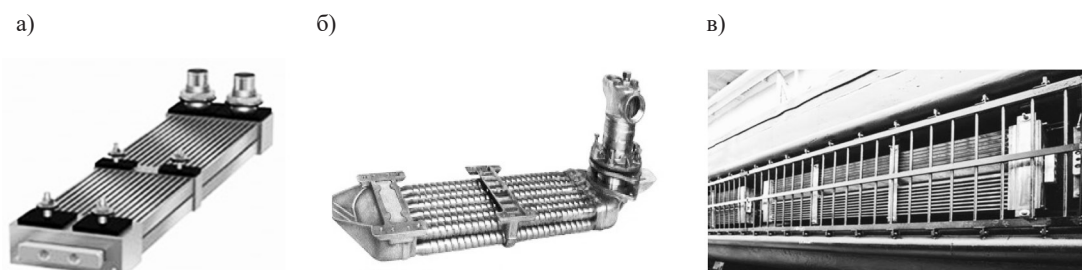


Рис. 1. Устройства теплоотвода блочного типа: с плоскими (а) и круглыми трубками (б), а также их размещение в выгородках корпуса судна (в)

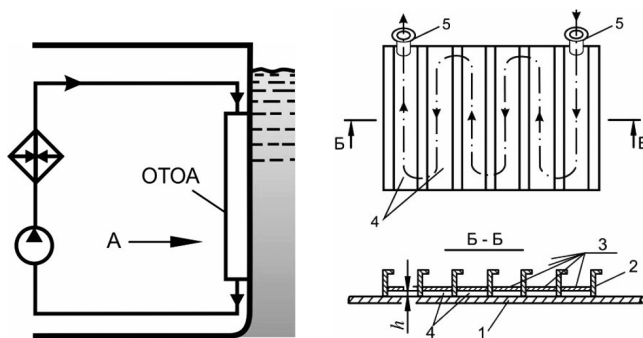


Рис. 2. Обшивочный теплообменный аппарат:
1 — судовая обшивка; 2 — элементы набора корпуса судна; 3 — дополнительные листы;
4 — лабиринтный канал; 5 — патрубки подвода и отвода теплоносителя

В данном случае ОТОА представляет собой лабиринтный канал, размещенный на внутренней поверхности судовой обшивки, сформированный штатными элементами набора, а также дополнительно наваренными параллельно судовой обшивке металлическими листами. Обычно зазор между обшивкой и дополнительными листами составляет примерно 12–25 мм. По данному лабиринтному каналу движется пресная охлаждаемая вода. Изготовление ОТОА не требует использования особых технологий и оборудования и может быть выполнено практически на всех судостроительных и судоремонтных предприятиях. Однако для таких УТ возникают вопросы, связанные с их тепловой эффективностью, соответствующими расчетными зависимостями, методикой расчета и подтверждением ее достоверности результатами натурных испытаний ОТОА на судах. Именно совокупность этих вопросов является предметом дальнейшего рассмотрения.

Методы и материалы (Methods and Materials)

В ОТОА предусмотрено два режима работы. Первый наиболее неблагоприятный режим работы имеет место в случае стоянки судна. При этом теплоотдача от наружной поверхности обшивки корпуса суда к забортной воде происходит при свободной конвекции [7]. Второй режим работы имеет место при движении судна. При этом теплоотдача к забортной воде осуществляется при вынужденной конвекции [8]. Из теории теплопередачи [9] известно, что теплоотдача при свободной конвекции существенно ниже теплоотдачи при вынужденной конвекции. Поэтому основным расчетным режимом работы таких аппаратов является случай, когда судно неподвижно по отношению к забортной воде.

Для случая теплоотдачи при свободной конвекции были проведены экспериментальные теплотехнические исследования на модели ОТОА площадью 1 м². Обеспечивались параметры работы модели, максимально приближенные к реальным. На каждой из сторон теплопередающей стенки модели было зачеканено по шестнадцать термопар, что позволяло определить среднюю температуру стенки. Модель, размещенная в емкости с неподвижной морской водой, имела возможность изменять наклон теплопередающей поверхности, моделируя размещение ОТОА на днище, борту судна и др.

Результаты (Results)

В результате проведенных экспериментальных исследований было определено уравнение подобия, описывающее теплоотдачу в лабиринтном канале. Число Нуссельта определяется по формуле

$$\overline{Nu}_1 = 46 Re^{0.4} Pr_{ж}^{0.4} \left(\frac{Pr_{ж}}{Pr_{c_1}} \right)^{0.25} \left(\frac{d_{эк}}{l_{п}} \right)^{0.9} \left(\frac{t_{ж}}{t_{c_1}} \right)^{-3.0}, \quad (1)$$

где Re — число Рейнольдса;

Pr — число Прандтля;

$d_{эк}$ — эквивалентный диаметр проходного сечения лабиринтного канала;

$l_{\text{п}}$ — длина прямого участка лабиринтного канала;
 $\bar{t}_{\text{ж}}$ — средняя температура жидкости (охлаждаемой пресной воды);
 $\bar{t}_{\text{с1}}$ — средняя температура внутренней поверхности судовой обшивки в районе размещения ОТОА.

Зависимость справедлива при $8000 < \text{Re}_{\text{ж}} < 330\,000$; $2,1 < \text{Pr}_{\text{ж}} < 3,9$; $1,9 \cdot 10^{-2} < d_{\text{эк}}/l_{\text{п}} < 7,8 \cdot 10^{-2}$; $0,8 < \text{Pr}_{\text{ж}}/\text{Pr}_{\text{с1}} < 0,94$; $1,0 < \bar{t}_{\text{ж}}/\bar{t}_{\text{с1}} < 1,2$.

Проведенные экспериментальные исследования показали, что коэффициент теплоотдачи $\bar{\alpha}_2$ от наружной поверхности судовой обшивки к забортной воде в условиях свободной конвекции существенно зависит от температурного напора между поверхностью стенки $t_{\text{с2}}$ и забортной водой t_3 (рис. 3) и мало зависит от скорости v пресной воды в лабиринтном канале.

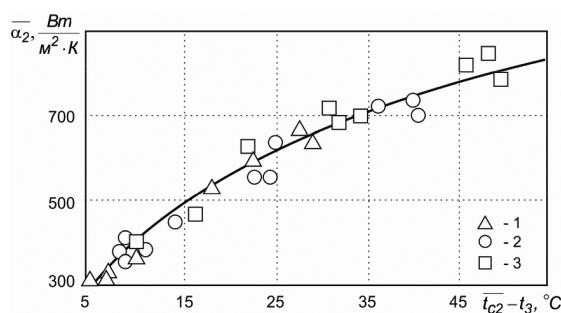


Рис. 3. Зависимость коэффициента теплоотдачи $\bar{\alpha}_2$ от температурного напора $t_{\text{с2}} - t_3$ для вертикального борта судна:
 1 — $v = 0,3-0,35$ м/с; 2 — 1,1–1,2 м/с; 3 — 1,8–1,9 м/с

Другим важнейшим фактором, влияющим на эффективность теплоотвода, является ориентация поверхности судовой обшивки (рис. 4).

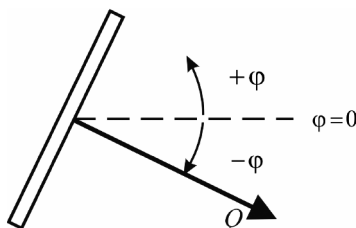


Рис. 4. Изменение ориентации теплоотдающей поверхности относительно горизонтали

Влияние данного фактора, исследованное на экспериментальной модели ОТОА, показано на рис. 5.

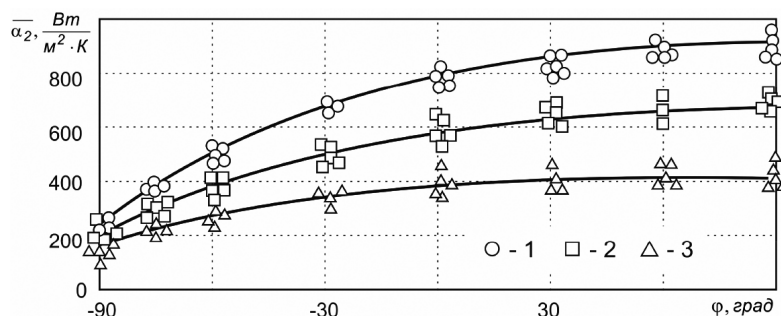


Рис. 5. Зависимость коэффициента теплоотдачи $\bar{\alpha}_2$ от угла наклона аппарата ϕ ($v = 0,35 - 1,9$ м/с):
 1 — $t_{\text{с2}} - t_3 = 45$ °C; 2 — 23 °C; 3 — 7 °C

Наихудшие условия теплоотдачи достигаются при размещении ОТОА на горизонтальном днище корпуса судна (-90°). Увеличение значения φ способствует увеличению $\overline{\alpha}_2$. При стоянке судна значение коэффициента теплопередачи K решающим образом определяется достигаемым значением $\overline{\alpha}_2$, которое, как известно из теории теплопередачи, существенно меньше коэффициента теплоотдачи $\overline{\alpha}_1$ при вынужденной конвекции на внутренней поверхности судовой обшивки. Результаты проведенных экспериментальных теплотехнических исследований на модели ОТОА показаны на рис. 6.

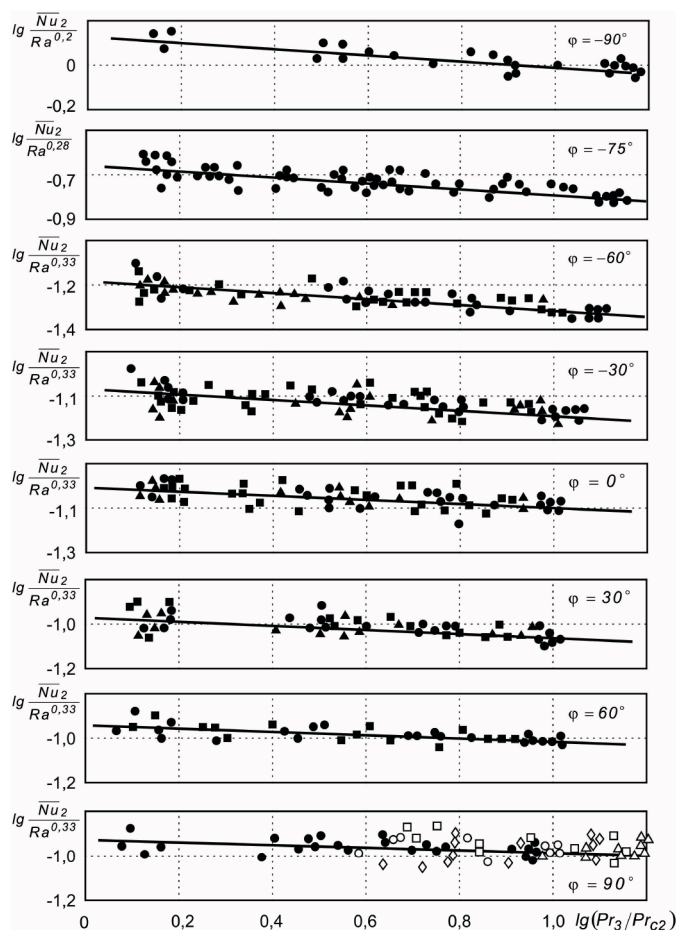


Рис. 6. Зависимость $\lg(\overline{Nu}_2 / Ra^n)$ от $\lg(Pr_3 / Pr_{c2})$

Обработка экспериментальных данных позволила определить уравнения подобия для различных углов наклона φ . Зависимости для расчета числа $\overline{Nu}_2$ приведены в таблице.

Зависимости теплопередачи забортной воды при свободной конвекции

Угол φ , град	Общий вид зависимости
-90	$\overline{Nu}_2 = 1,4Ra^{0,2}(Pr_3/Pr_{c2})^{-0,09}$
-75	$\overline{Nu}_2 = 0,22Ra^{0,28}(Pr_3/Pr_{c2})^{-0,09}$
-60	$\overline{Nu}_2 = 0,065Ra^{0,33}(Pr_3/Pr_{c2})^{-0,09}$
-30	$\overline{Nu}_2 = 0,087Ra^{0,33}(Pr_3/Pr_{c2})^{-0,09}$
0	$\overline{Nu}_2 = 0,1Ra^{0,33}(Pr_3/Pr_{c2})^{-0,09}$
30	$\overline{Nu}_2 = 0,11Ra^{0,33}(Pr_3/Pr_{c2})^{-0,09}$
60	$\overline{Nu}_2 = 0,12Ra^{0,33}(Pr_3/Pr_{c2})^{-0,09}$

Приведенные зависимости могут быть использованы для расчета коэффициента теплопередачи ОТОА — K , Вт/(м²·К):

$$K = \frac{1}{\frac{1}{\alpha_1} + \frac{\delta_c}{\lambda_c} + \frac{1}{\alpha_2} + \frac{\delta_k}{\lambda_k}}, \quad (2)$$

где δ_c и δ_k — соответственно толщина теплопередающей части судовой обшивки и слоя краски, м;
 λ_c и λ_k — соответственно коэффициенты теплопроводности материала судовой обшивки и краски, Вт/(м·К).

Влияние покраски судовой обшивки на теплопередачу достаточно подробно рассмотрено в [10]. На основании зависимостей (1) и (2), а также уравнений подобия, указанных в приведенной на с. 308, таблице разработана методика расчета коэффициента теплопередачи и требуемой площади ОТОА, которая была применена при проектировании замкнутой системы охлаждения самоходного плавкрана пр. 15201 грузоподъемностью 500 т.

ОТОА размещался на горизонтальном днище, его фотография на заключительном этапе сборки приведена на рис. 7. Следует обратить внимание, что такое расположение ОТОА является наиболее неблагоприятным, однако оно обусловлено тем, что корпус плавкрана представляет собой понтон с небольшой высотой борта и большой площадью практически горизонтального днища, для которого $\varphi = -90^\circ$ (см. рис. 4).

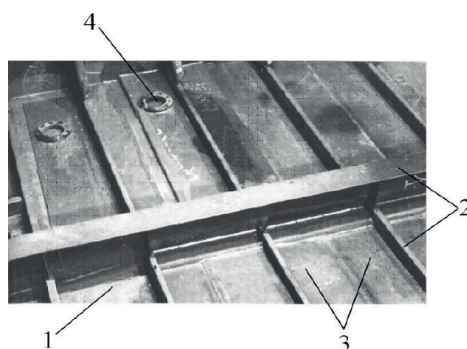


Рис. 7. ОТОА плавкрана пр. 15201:

1 — судовая обшивка; 2 — элементы набора корпуса судна;
3 — дополнительно наваренные листы;

4 — фланец присоединения патрубка подвода (отвода) охлаждаемого теплоносителя

В ходе ходовых испытаний плавкрана была исследована тепловая эффективность ЗСО. На рис. 8 показана зависимость теплопередачи окрашенного ОТОА $K_{кр}$ от температурного напора Δt между пресной и забортной водой.

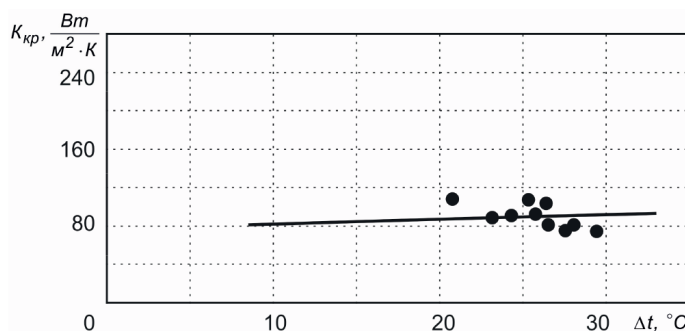


Рис. 8. Результаты натурных испытаний ОТОА плавкрана пр. 15201:

• — результаты, полученные на ходовых испытаниях плавкрана;
— — результаты расчета

В работе [11] представлены результаты натурных испытаний судна Ludwig Franzius, у которого ОТОА размещался на бортовой части судовой обшивки с углом наклона $\varphi = -30^\circ$ (см. рис. 4). При этом в лабиринтном канале теплообменного аппарата обеспечивались скорости пресной воды $v_{\text{ПВ}} = 0,21\text{--}0,35$ м/с и $1,4\text{--}1,5$ м/с. Там же показаны результаты расчета для указанных условий коэффициента теплопередачи с использованием приведенных зависимостей (1), (2) — рис. 9.

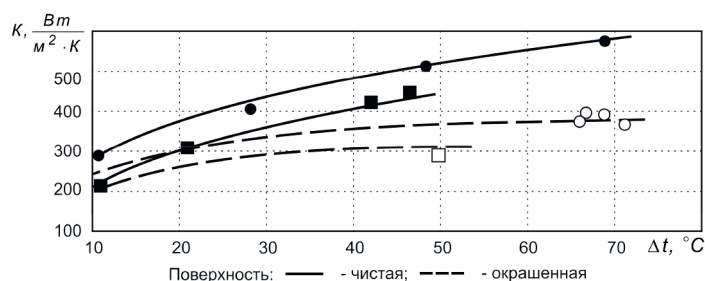


Рис. 9. Сравнение коэффициентов теплопередачи ОТОА при испытаниях судна Ludwig Franzius ($\square, \square$) с результатами расчета (— —) при различных скоростях ($\square$ и $\blacksquare$ — при $v_{\text{ПВ}} = 0,24\text{--}0,35$ м/с; $\circ$ и $\bullet$ — при $v_{\text{ПВ}} = 1,4\text{--}1,5$ м/с)

Приведенные графики соответствуют случаю нахождения судов в неподвижной воде. При этом теплоотдача от наружной обшивки корпуса судна в окружающую акваторию осуществляется при свободной конвекции. Это наихудший режим работы ОТОА, а коэффициент теплоотдачи существенно зависит от ориентации поверхности по углу φ (рис. 4) и температурного напора Δt . Возникает вопрос относительной эффективности теплоотвода в случае движения судна. При этом теплоотдача осуществляется при вынужденной конвекции, а решающее влияние на эффективность теплоотвода оказывает скорость движения судна v_s .

Для ряда судов (землечерпалка Ludwig Franzius, судно BM-500, буксир 190Z, ледокол Josef Langen) для плавкрана пр. 15201 имеются точечные данные эффективности теплоотвода ОТОА при движении судна, обработанные в каждом конкретном случае с учетом существующей специфики. Полученные результаты относительно коэффициента теплопередачи окрашенного ОТОА приведены на рис. 10 ($v_{\text{ПВ}} = 0,5\text{--}1,5$ м/с, количество слоев краски — шесть).

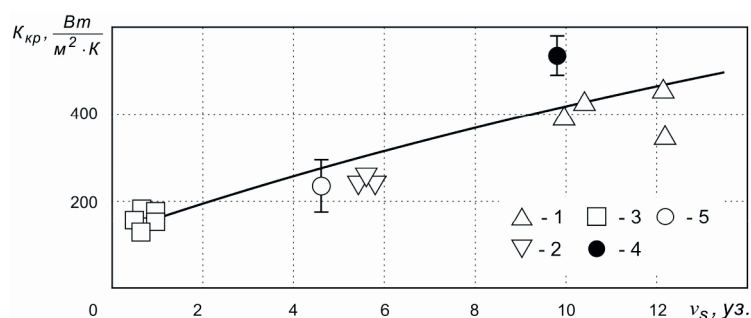


Рис. 10. Зависимость коэффициента теплопередачи $K_{\text{кр}}$ окрашенного ОТОА от скорости движения судна v_s :
1 — судно Ludwig Franzius (Германия); 2 — плавкран пр. 15201;
3 — судно BM-500 (Польша); 4 — ледокол Josef Landen (Германия);
5 — буксир KSB-190 (Германия)

Методика теплотехнического расчета ОТОА позволяет с использованием известных уравнений подобия определить коэффициент теплоотдачи в лабиринтном канале, а также влияние теплопередающей стенки судовой обшивки и нанесенной на поверхность краски. Кроме того, известно, что при вынужденной конвекции теплоотдача забортной воде практически не зависит от ориентации поверхности по углу φ (см. рис. 4). Таким образом, зная коэффициенты теплопередачи $K_{\text{кр}}$

(рис. 11) и температурные напоры, можно определить коэффициенты теплоотдачи заборной воды. С учетом размеров ОТОА на рассматриваемых в работе судах можно задаться численным значением характерного линейного размера, входящего в числа Нуссельта и Рейнольдса. Теплофизические свойства морской воды известны. В ходе выполненных таким образом расчетов определены числа подобия и, в конечном счете, уравнение подобия (рис. 11), описывающее теплоотдачу заборной воде при движении судна.

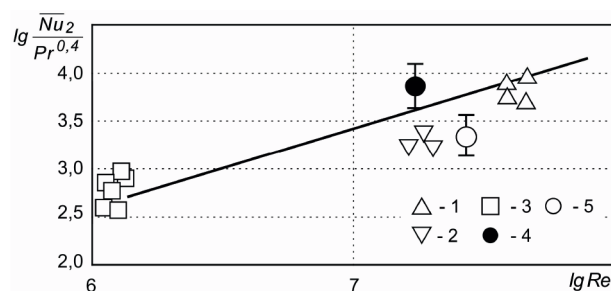


Рис. 11. Зависимость от $\lg(\overline{Nu}_2 / Pr^{0.4})$ от $\lg Re$ чистой неокрашенной поверхности ОТОА:

- 1 — судно Ludwig Franzius (Германия); 2 — плавкран Пр. 15201;
3 — судно «ВМ-500» (Польша); 4 — ледокол Jasef Landen (Германия);
5 — буксир «KSB-190» (Германия)

Искомое уравнение подобия, описывающее теплоотдачу неокрашенной наружной поверхности ОТОА при движении судна, имеет вид

$$\overline{Nu}_2 = 0,007 Re^{0,8} Pr^{0,4}. \quad (3)$$

Уравнение справедливо при $Re = 2 \cdot 10^6 - 4,5 \cdot 10^7$ и $Pr = 3,5 - 10$.

Обсуждение (Discussion)

Экспериментальные исследования, выполненные на модели ОТОА, которые могут работать в режимах стоянки и движения судна, указывают на существенное влияние на коэффициент теплоотдачи $\overline{\alpha}_2$ ориентации поверхности φ и температурного напора Δt . Так, например, при вертикальном расположении ОТОА (см. рис. 4) увеличение температурного напора Δt с 5 до 35 °С увеличивает $\overline{\alpha}_2$ с 300 до 700 Вт/(м²·К). Такое же сильное влияние на коэффициент теплоотдачи $\overline{\alpha}_2$ оказывает ориентация поверхности. Как видно из рис. 5, при $\Delta t = 45$ °С переход от горизонтального положения ОТОА ($\varphi = -90^\circ$) к вертикальному ($\varphi = 0^\circ$) увеличивает $\overline{\alpha}_2$ с 300 до 800 Вт/(м²·К), что указывает на необходимость при проектировании ЗСО в максимально возможной степени использовать бортовые поверхности судна, а также подавать в ОТОА охлаждаемый теплоноситель с максимально возможной температурой.

Анализ приведенных зависимостей показывает, что показатель степени при числе Ra и углах $\varphi < -75^\circ$ оказывается менее 0,33. Из теории тепломассообмена известно, что это указывает на отсутствие автомодельности процесса по отношению к характерному линейному размеру (размеру ОТОА). Это означает, что коэффициент теплоотдачи зависит от размеров поверхности, уменьшаясь с их увеличением. Для вертикальной поверхности ($\varphi = 0^\circ$) уравнение подобия имеет показатель степени при числе Ra, равный 0,1. Данное значение отличается от известного уравнения подобия, описывающего теплоотдачу вертикальной изотермической поверхности при свободной конвекции, в котором этот коэффициент равен 0,15. Указанное отличие объясняется различными граничными условиями теплоотдающей поверхности. В последнем случае это поверхность с постоянной температурой, известная в теории как поверхность с граничными условиями первого рода. В данном случае имеет место неизотермическая поверхность, сформированная вследствие лабиринтного характера движения охлаждаемой пресной воды вдоль судовой обшивки с ее внутренней стороны и возникающих температурных градиентов и перетечек теплоты непосредственно в обшивке.

Существуют также особенности уравнения подобия, описывающего теплоотдачу в лабиринтном канале. В теории теплопередачи хорошо известна зависимость для расчета числа Нуссельта для прямых каналов, в которой показатель степени числа Рейнольдса равен 0,8. В данном случае указанный показатель существенно меньше и равен 0,4, что является следствием лабиринтной формы канала и приводит к дополнительной периодической турбулизации потока. В результате снижается темп прироста теплоотдачи вследствие увеличения скорости показателя степени числа $Re_{ж}$ по сравнению с прямым каналом.

Экспериментальные теплотехнические исследования эффективности ОТОА проводились на модели площадью 1 м². Полученные результаты обобщены уравнениями подобия, описывающими теплоотдачу в лабиринтном канале аппарата и от наружной поверхности к забортной воде. На их основе разработана методика теплотехнического расчета таких аппаратов, а полученные при этом результаты хорошо согласуются с результатами натурных испытаний ЗСО (рис. 8) на плавкране пр. 15201 с площадью ОТОА 100 м². При движении судна ориентация поверхности и температурный напор практически не влияют на коэффициент теплопередачи. Решающим является увеличение скорости. Так, например, для ОТОА с окрашенной поверхностью увеличение v_s с 1 до 9 уз приводит к увеличению $K_{кр}$ примерно в два раза.

Полученное на основании данных рис. 11 уравнение подобия (3) указывает на показатель степени числа Re , равный 0,8. Это хорошо согласуется с известным из теории теплопередачи соответствующим показателем при обтекании плоских поверхностей, что подтверждает достоверность результатов.

Выводы (Summary)

На основе проведенного исследования можно сделать следующие выводы:

1. Определена тепловая эффективность замкнутых систем охлаждения с ОТОА при стоянке и движении судна. В первом случае обеспечиваются наилучшие условия теплоотдачи от наружной поверхности судовой обшивки к неподвижной забортной воде. Процесс проходит посредством свободной конвекции. Данный случай следует считать основным расчетным режимом таких аппаратов, поскольку при движении судна теплоотдача забортной воде осуществляется при вынужденной конвекции, что приводит к существенному увеличению теплоотвода.

2. Для случая стоянки судна проведены экспериментальные исследования на модели ОТОА и получены необходимые зависимости для расчета теплоотвода, а также разработана соответствующая методика теплотехнического расчета, с использованием которой для плавкрана пр. 15201 спроектирована замкнутая система охлаждения с ОТОА. Результаты натурных испытаний данного устройства теплоотвода полностью подтвердили достоверность разработанной методики, что позволяет рекомендовать ее для широкого практического использования.

3. С использованием результатов испытаний ОТОА плавкрана пр. 15201, а также других судов получены соответствующие обобщающие зависимости, позволяющие выполнить расчет при различных скоростях движения судна.

4. Таким образом, обеспечена возможность определения тепловой эффективности и требуемые площади ОТОА замкнутых систем охлаждения СЭУ при различных условиях эксплуатации судна. Создаются условия для широкого внедрения указанных систем в практику судостроения, поскольку для их создания не требуется применение специальных технологий и оборудования.

5. Оснащение судов замкнутыми системами охлаждения СЭУ обеспечит сохранение рыбных ресурсов морей и континентальных водоемов Российской Федерации.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Шурпак В. К. Учет особенностей систем охлаждения при оценке энергетической эффективности судов / В. К. Шурпак // Научно-технический сборник Российского морского регистра судоходства. — 2014. — № 37. — С. 51–55.

2. Международная конвенция по предотвращению загрязнения с судов. — СПб.: ЦНИИМФ, 2009. — 28 с.
3. How power plants kill fish&damage our water ways [Электронный ресурс]. — Режим доступа: <https://blogs.sierraclub.org/compass/2011/08/how-power-plants-kill-fish-damage-our-waterways-.html> (дата обращения: 11.11.2020).
4. Specifying a Trawler [Электронный ресурс]. — Режим доступа: <http://bluewater-trawlers.blogspot.com/2008/11/hull-construction.html> (дата обращения 21.12.2021).
5. Specialty Gridcooler Keel Coolers [Электронный ресурс]. — Режим доступа: <http://www.fernstrum.com/products/gridcooler-keel-cooler/specialty-coolers/> (дата обращения 21.12.2021).
6. Федоровский К. Ю. Теплопередача через обшивку корпуса судна и особенности происходящих процессов / К. Ю. Федоровский // Фундаментальные и прикладные проблемы техники и технологии. — 2018. — № 4–2 (330). — С. 168–172.
7. Клеверова В. Теплообмен при свободной конвекции / В. Клеверова, А. Бакиржанкызы // Global Science and Innovations: Central Asia. — 2021. — Т. 7. — № 1 (12). — С. 111–115.
8. Саньков В. И. Исследование теплообмена при вынужденной конвекции / В. И. Саньков, С. Ж. Иманалиева // Известия Кыргызского государственного технического университета им. И. Раззакова. — 2021. — № 4 (60). — С. 87–91.
9. Барышева О. Б. Тепломассообмен в теории и на практике / О. Б. Барышева, Е. В. Варсегова. — Казань: ООО «Бук», 2021. — 234 с.
10. Федоровский К. Ю. Влияние покраски и биообрастания корпуса судна на теплоотвод замкнутой системы охлаждения энергоустановки / К. Ю. Федоровский, Н. К. Федоровская, В. В. Ениватов, Д. В. Бурков // Вестник Керченского государственного морского технологического университета. — 2021. — № 1. — С. 61–70. DOI: 10.47404/2619-0605_2021_1_6.
11. Федоровский К. Ю. Замкнутые системы охлаждения судовых энергетических установок / К. Ю. Федоровский, Н. К. Федоровская. — М.: Вузовский учебник, 2017. — 160 с.

REFERENCES

1. Shurpyak, V. K. “Uchet osobennostei sistem okhlazhdeniya pri otsenke energeticheskoi effektivnosti sudov.” *Nauchno-tekhnicheskii sbornik Rossiiskogo morskogo registra sudokhodstva* 37 (2014): 51–55.
2. *International convention for prevention of pollution from ships*. SPb.: TsNIIMF, 2009.
3. How power plants kill fish&damage our water ways. Web. 11 Nov. 2020 <<https://blogs.sierraclub.org/compass/2011/08/how-power-plants-kill-fish-damage-our-waterways-.html>>.
4. Specifying a Trawler. Web. 21 Dec. 2021 <<http://bluewater-trawlers.blogspot.com/2008/11/hull-construction.html>>.
5. Specialty Gridcooler Keel Coolers. Web. 21 Dec. 2021 <<http://www.fernstrum.com/products/gridcooler-keel-cooler/specialty-coolers/>>.
6. Fedorovskiy, K. Yu. “Heat transfer through ship’s shell plating and peculiarities of the processes.” *Fundamental’nye i prikladnye problemy tekhniki i tekhnologii* 4–2(330) (2018): 168–172.
7. Kleverova, V., and A. Bakirzhankyzy. “Teploobmen pri svobodnoi konveksii.” *Global Science and Innovations: Central Asia (sm. v knigakh)* 7.1(12) (2021): 111–115.
8. Sankov, Vyacheslav Ivanovich, and Saltanat Zhumamudunovna Imanalieva. “Study of heat exchange with forced convection.” *Proceedings of the Kyrgyz State Technical University named after I. Razzakov* 4(60) (2021): 87–91.
9. Barysheva, O.B., and E. V. Varsegova. *Teplomassoobmen v teorii i na praktike*. Kazan’: Obshchestvo s ogranichennoi otvetstvennost’yu “Buk”, 2021.
10. Fedorovskiy, K. Yu., N. K. Fedorovskaya, V. V. Enivatov, and D. V. Burkov. “The influence of painting and ships hull biofouling on heat sink of the close cooling systems of power plants.” *Bulletin of the Kerch State Marine Technological University* 1 (2021): 61–70.
11. Fedorovskii, K. Yu., and N. K. Fedorovskaya. *Zamknutyie sistemy okhlazhdeniya sudovykh energeticheskikh ustanovok*. M.: Vuzovskii Uchebnik, 2017.

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

Федоровский Константин Юрьевич —
доктор технических наук, профессор
ФГАОУ ВО «Севастопольский государственный
университет»
299053, Российская Федерация, Севастополь,
ул. Университетская, 33
e-mail: fedkonst@rambler.ru
Гриненко Надежда Константиновна —
кандидат технических наук,
ФГАОУ ВО «Севастопольский государственный
университет»
299053, Российская Федерация, Севастополь,
ул. Университетская, 33
e-mail: n.fedorovskaya14@mail.ru

INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Fedorovskiy, Konstantin Yu. —
Dr. of Technical Sciences, professor
Sevastopol State University
33 Universitetskaya Str.,
Sevastopol, 299053,
Russian Federation
e-mail: fedkonst@rambler.ru
Grinenko, Nadezhda K. —
PhD
Sevastopol State University
33 Universitetskaya Str.,
Sevastopol, 299053,
Russian Federation
e-mail: n.fedorovskaya14@mail.ru

*Статья поступила в редакцию 23 декабря 2022 г.
Received: December 23, 2022.*

АВТОМАТИЗАЦИЯ И УПРАВЛЕНИЕ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИМИ ПРОЦЕССАМИ И ПРОИЗВОДСТВАМИ

DOI: 10.21821/2309-5180-2023-15-2-315-326

APPROACHES TO THE INTELLECTUALIZATION OF INFORMATION AND TELECOMMUNICATION NETWORKS SECURITY CONTROL IN TRANSPORT

Yu. I. Starodubtsev¹, Yu. K. Khudainazarov², T. P. Knysh²

¹ — Military Telecommunications Academy, St. Petersburg, Russian Federation

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

The specifics of modern information and telecommunication networks in transport, as an object of information security control, are investigated. The main trends in the development of information and telecommunication network protection technologies (TNPT) have been identified. The presence of the interrelation of the main integrative properties: readiness, mobility, throughput, stealth, accessibility, manageability, which is a consequence of the convergence of information transmission and processing technologies, is noted. A new integrative property of ITCS has become the presence and characteristics of distributed system memory, which allows storing transmitted messages for a certain time. An important feature of modern TNPT is the presence of artificial intelligence, which is formed on the basis of information and algorithmic support of modern TNPT, providing flexibility of the system behavior. These trends indicate the transformation of TNPT into a supersystem, the management tasks of which are insufficiently investigated at present. The purpose of this work is to study new approaches to ensuring the safety management of modern TNPT critical infrastructure, which includes modern systems of sea and river transport, taking into account their features. The object of the study is the information security control system of modern TNPT. The subject of the study is the scientific and methodological support of the TNPT critical infrastructure control. The research objectives are to analyze existing and develop new conceptual frameworks, as well as approaches to improving the TNPT information security control system based on intellectualization methods. The analysis of the existing methodology for managing complex organizational and technical systems and information security control technologies is carried out. The concept of TNPT information security control is formalized schematically. The analysis of the existing approach to the organization of the TNPT information security control process is carried out. The tasks of control intellectualization are defined. The problem of ensuring the efficiency and reliability of the TNPT control is formulated. The main scientific tasks of the development of the TNPT information security control methodology are defined.

Keywords: information and telecommunication network, management concept, information security control, intellectualization, graphodynamics, multi-agent network, control system model.

For citation:

Starodubtsev, Yuri I., Yuri K. Khudainazarov, and Tatiana P. Knysh. "Approaches to the intellectualization of information and telecommunication networks security control in transport." *Vestnik Gosudarstvennogo universiteta morskogo i rechnogo flota imeni admirala S. O. Makarova* 15.2 (2023): 315–326. DOI: 10.21821/2309-5180-2023-15-2-315-326.

УДК: 654

ПОДХОДЫ К ИНТЕЛЛЕКТУАЛИЗАЦИИ КОНТРОЛЯ БЕЗОПАСНОСТИ ИНФОРМАЦИОННО-ТЕЛЕКОММУНИКАЦИОННЫХ СЕТЕЙ НА ТРАНСПОРТЕ

Ю. И. Стародубцев¹, Ю. К. Худайназаров², Т. П. Кныш²

¹ — Военная академия связи имени маршала Советского Союза С. М. Будённого,
Санкт-Петербург, Российская Федерация

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

Исследована специфика современных информационно-телекоммуникационных сетей на транспорте как объекта контроля информационной безопасности. Определены основные тенденции развития технологий защиты информационно-телекоммуникационных сетей. Отмечается наличие взаимосвязи основных интегративных свойств: готовности, мобильности, пропускной способности, скрытности, доступности, управляемости, являющееся следствием конвергенции технологий передачи и обработки информации. Рассмотрено новое интегративное свойство информационно-телекоммуникационных сетей, такое как наличие характеристик распределенной системной памяти, позволяющей в течение определенного периода времени сохранять передаваемые сообщения. Важной особенностью современных информационно-телекоммуникационных сетей является наличие искусственного интеллекта, формируемого на основе их информационно-алгоритмического обеспечения, определяющего гибкость поведения системы. Указанные тенденции свидетельствуют о превращении в суперсистему, задачи управления которой недостаточно исследованы в настоящее время. Целью данной работы является исследование новых подходов к обеспечению управления безопасностью современных информационно-телекоммуникационных сетей критической инфраструктуры, к которой относятся современные системы морского и речного транспорта с учетом их особенностей. Объектом исследования служит система контроля информационной безопасности современных информационно-телекоммуникационных сетей. Предметом исследования является научно-методическое обеспечение контроля критической инфраструктуры. Задачи исследования заключаются в анализе существующих и разработке новых концептуальных основ, а также подходов к совершенствованию системы контроля информационной безопасности информационно-телекоммуникационных сетей на основе методов интеллектуализации. Выполнен анализ существующей методологии управления сложными организационно-техническими системами и технологий контроля информационной безопасности. Формализована схематично концепция контроля информационной безопасности информационно-телекоммуникационных сетей. Выполнен анализ существующего подхода к организации процесса контроля информационной безопасности информационно-телекоммуникационных сетей. Определены задачи интеллектуализации контроля. Сформулирована проблема обеспечения оперативности и достоверности контроля информационной безопасности информационно-телекоммуникационных сетей. Определены основные научные задачи развития методологии контроля информационной безопасности информационно-телекоммуникационных сетей.

Ключевые слова: информационно-телекоммуникационная сеть, концепция управления, контроль информационной безопасности, интеллектуализация, графодинамика, мультиагентная сеть, модель системы контроля.

Для цитирования:

Стародубцев Ю. И. Подходы к интеллектуализации контроля безопасности информационно-телекоммуникационных сетей на транспорте / Ю. И. Стародубцев, Ю. К. Худайназаров, Т. П. Кыш // Вестник Государственного университета морского и речного флота имени адмирала С. О. Макарова. — 2023. — Т. 15. — № 2. — С. 315–326. DOI: 10.21821/2309-5180-2023-15-2-315-326.

Введение (Introduction)

Современные информационно-телекоммуникационные сети (ИТКС) относятся к сложным динамическим социотехническим системам, генерирующим открытое множество информационных услуг, составной незначительной частью которых являются традиционные услуги связи. Принципиальные отличия ИТКС от системы связи заключаются в следующем:

- ИТКС создаются и развиваются в интересах многих систем управления работой флота;
- преобладающим является способ коммутации пакетов, что позволяет формировать виртуальные мультисервисные сети с высокой динамикой изменения структурных параметров;
- организационно-технические границы ИТКС вариативны в зависимости от количества, территориального размаха, количества и типа востребованных информационных услуг, что затрудняет выделение границ объекта контроля и усугубляет задачу определения оптимальных точек подключения средств контроля;
- контроль только состояния элементов ИТКС на технологическом уровне является недостаточным для управления качеством реализуемых процессов;
- подсистема контроля должна обеспечить потребности многих систем управления генерацией информационных услуг;

– существует устойчивая тенденция повышения информативности параметров трафика при сохранении и даже снижении информативности параметров технических средств;

– для большинства существующих ИТКС на организационном уровне затруднена или исключена возможность размещения средств контроля непосредственно на контролируемом объекте, так как элементы принадлежат различным собственникам, подвижны и пространственно распределены, поэтому необходимо совершенствование методов и технологий сетевого контроля;

– с учетом непрерывного совершенствования средств и способов защиты информационных ресурсов существенно затрудняется контроль ряда параметров, что вызывает необходимость разработки средств и способов защиты во взаимосвязи с процессом разработки методов и средств контроля.

Специфика современных ИТКС управления транспортом заключается в наличии тесной взаимной зависимости их основных интегративных свойств: готовности, мобильности, пропускной способности, скрытности, доступности, управляемости. Усиление взаимозависимости основных свойств является следствием конвергенции технологий. Кроме того, новым интегративным свойством ИТКС является наличие и характеристики распределенной системной памяти, позволяющей в течение определенного периода времени сохранять передаваемые сообщения, что существенно отражается на других свойствах сети.

Кроме того, особенность данных систем заключается в наличии агентов естественного и искусственного интеллекта, совокупность которых при определенных условиях образует суперсистему, поведение которой не может быть в полной мере формализовано в рамках классической теории управления. Трудности формализации связаны с высокой степенью неопределенности инфраструктуры и влиянием человеческого фактора в процессе функционирования суперсистемы. Суперсистема отличается виртуальностью функциональной структуры, т. е. существованием элементов (подсистем), которые обладают памятью, могут обмениваться между собой информацией, в определенной степени взаимозаменяемы и в разные моменты времени могут принадлежать к системам, имеющим различный функционал. При этом возможны *конфликты управления системами* (информационные конфликты, конфликты по задачам, ресурсам и времени).

Информационно-алгоритмическое обеспечение современной ИТКС, являясь многоуровневым, включает *фундаментальную* (статическую) и *адаптационную* (динамическую) часть, замена которой обеспечивает новую специализацию элементов. Примером являются технологии *Soft Definition Network (SDN)*, *Network Function Virtualization (NFV)*, *Soft Definition Radio (SDR)*. В связи с этим ИТКС в целом обладает памятью и гибкостью поведения, для устойчивого функционирования которой должно выполняться следующее условие: *скорость адаптации элементов к новым функциональным задачам должна быть выше скорости изменения внешних воздействующих факторов*. В связи с этим актуальной является тематика исследований существующих и разработка новых подходов к обеспечению качественной обратной связи в системе управления безопасностью современных ИТКС критической инфраструктуры, что и составляет *цель данной работы*.

Задачи исследования заключаются в анализе методологии контроля безопасности информации в ИТКС критической инфраструктуры, выявлении противоречий в практике и теории контроля безопасности ИТКС, определении новых требований к результатам контроля информационной безопасности ИТКС, формулировке проблемы интеллектуализации контроля ИБ ИТКС, а также разработке подходов к решению проблемы и построению интеллектуальной системы контроля информационной безопасности ИТКС, обеспечивающей выполнение заданных критериев по качеству управления ИБ ИТКС критической инфраструктуры.

Методы и материалы (Methods and Materials)

Существующая методология управления сложными системами предполагает определение необходимых условий для организации управления [1]: устойчивости в части предсказуемости поведения и полной функции управления системы. Устойчивость обусловлена существованием объективных причинно-следственных связей, а предсказуемость поведения основана на их субъективной интерпретации. Мера достаточности предсказуемости также определяется субъективно,

исходя из интерпретации задачи управления системой по полной функции, в том числе по функциям информационной безопасности (ИБ).

Полная функция управления (ПФУ), представляющая собой иерархически упорядоченную последовательность различных действий, может осуществляться только *интеллектуальной системой* [1]. ПФУ включает следующие этапы (рис. 1):

- 1-й этап — опознание управляемого объекта и факторов среды;
- 2-й этап — формирование модели объекта и факторов среды;
- 3-й этап — формирование вектора целей управления объектом в отношении факторов среды на основе решения задачи об устойчивости в смысле предсказуемости его поведения;
- 4-й этап — формирование концепции управления и частных целевых функций управления на основе решения задачи об устойчивости в смысле предсказуемости поведения объекта для обеспечения требуемого качества управления;
- 5-й этап — организация и реорганизация управляющих структур, несущих целевые функции управления;
- 6-й этап — контроль функционирования структур в процессе управления, координация взаимодействия разных структур;
- 7-й этап — ликвидация управляющих структур в случае необходимости или поддержание их в работоспособном состоянии до следующего использования.

Формирование концепций управления предполагает задание вектора параметров управляющих воздействий и значений параметров ошибки управления в виде разности значений параметров текущего состояния ИТКС и требуемых значений параметров состояния [1]. Однако подобные линейные функции оценки качества управления недостаточны для контроля сложной системы с интегративными свойствами. При наличии зависимости между показателями функционирования суперсистемы оценка качества управления определяется *приоритетами ее частных показателей функционирования, т. е. динамикой*. В зависимости от характера внешних связей суперсистемы со средой возможны задачи управления ИТКС как единым целым, так и ее отдельными фрагментами (элементами). Кроме того, в зависимости от продолжительности воздействия внешних факторов возможно непрерывное управляющее воздействие, регулярно повторяющееся или статистически упорядоченное эпизодическое. Поэтому соответствующие управляющие структуры будут *постоянно действующими, циклически действующими* или *стохастическими*. В зависимости от характера взаимодействий в суперсистеме возможны прямые и обратные связи типа: «человек – человек», «человек – машина», «человек – система», «машина – машина», «система – система».

Контроль, являющийся обратной связью полной функции управления, выполняется дважды (рис. 1): на первом этапе — при опознавании объекта и факторов среды для обоснования структуры системы управления и на последнем этапе — при обеспечении функционирования управляющих структур для анализа и повышения качества взаимодействия разных структур. Организация контроля является самостоятельной задачей, которая решается на основе оптимизации экономических параметров системы при обязательном выполнении задач контроля требуемого качества. Для управления в отношении постоянных, периодических или случайных факторов необходима соответствующая система, которая должна обеспечивать требуемое качество обратной связи и может иметь, соответственно, устойчивую структуру или виртуальный характер.

Существующие в настоящее время технологии сбора и обработки данных контролируемых параметров и событий (*EDR, IRP, SIEM*), управления уязвимостями (*VM*) позволяют сформировать большие базы данных о состоянии ИТКС в близком к реальному масштабу времени. В то же время возникает *проблема унификации форматов представления и обработки больших данных* для обеспечения интегральной оценки состояния ИТКС и интеллектуальной поддержки решений (построения базы знаний) по управлению ИТКС [2].

Большинство существующих форматов представления данных в человеко-машинных системах не эргономичны, а протоколы взаимодействия машин и систем *проприетарны*, поэтому не позволяют в полной мере обеспечивать взаимодействие одновременно по вертикали и горизонтали

и в связи с этим реализовать матричную схему управления (сетевую) не представляется возможным. Таким образом, существуют технологические недостатки, не позволяющие решить задачи взаимодействия и контроля в современных ИТКС.



Рис. 1. Концепция управления сложными системами

К организации контроля относятся [3]:

- стратегия (концепция) контроля;
- схема обслуживания;
- органы контроля и их задачи;
- оборудование (средства) контроля;
- схема централизованной обработки результатов контроля;
- порядок проверки работоспособности, диагностики и восстановления средств контроля.

Концепция контроля — это система взглядов, идей, принципов, определяющих общую методологию контроля, основное содержание которой составляют ответы на вопросы *что, где, когда, как и каким образом* контролировать соответствующую систему управления для обеспечения ее функционирования (рис. 2). Первой составляющей концепции является определение границ контролируемого объекта (процесса) и ограничений с учетом условий внешней среды (внешние воздействующие факторы, характеристики объемлющей системы, пространственные и информационные метрики, взаимосвязи), а также состава векторов контролируемых параметров объекта (процесса), внешних факторов и управляющих воздействий, которые определены *концепцией управления*.

Первая составляющая концепции является метрологической моделью контроля; формализуется в виде модели контролируемого объекта (процесса), каталога задач контроля и вектора контролируемых параметров.

Второй составляющей концепции контроля является определение соотношения функциональных циклов изменения и причинно-следственных взаимосвязей между событиями, характеристиками контролируемых процессов, объектов в пределах указанных ранее ограничений (определение степени устойчивости объекта (процесса) по предсказуемости при заданной концепции управления); формализуется в виде модели процесса контроля и критериев качества результатов контроля.

Третьей составляющей концепции контроля является обоснование структуры системы, выбора форм, методов и способов оценки соответствия состояния объекта (процесса), внешней среды (объемлющей системы), управляющих воздействий в соответствии с заданными критериями качества результатов контроля; формализуется в виде модели системы контроля, отвечающей установленным требованиям.

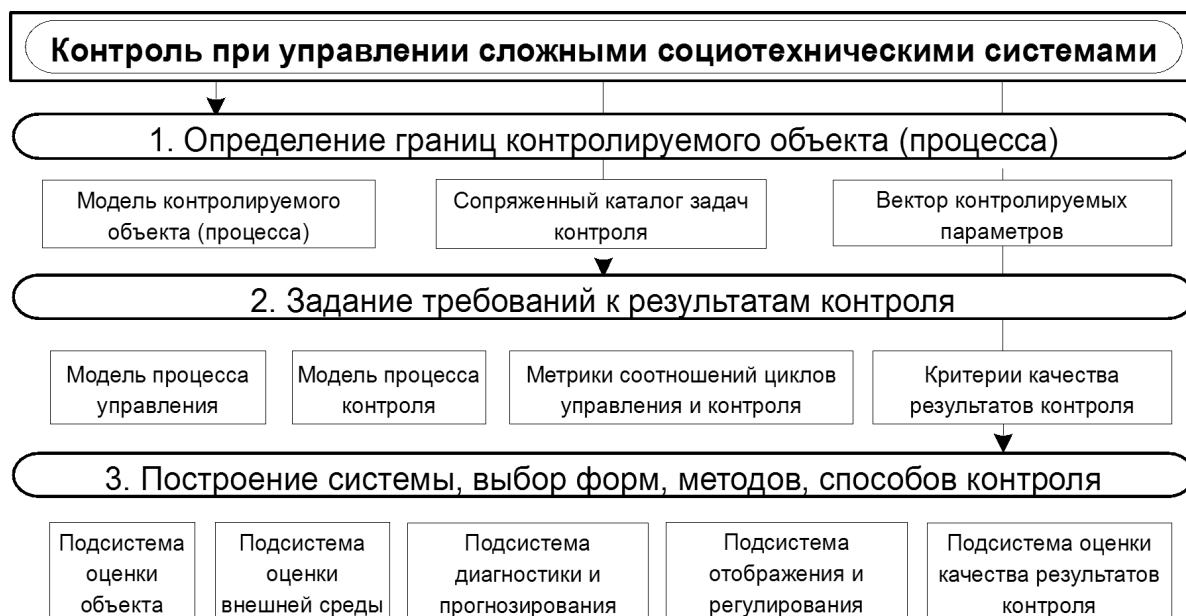


Рис. 2. Концепция контроля при управлении сложными социотехническими системами

Частные концепции контроля определяют методологию контроля для реализации каждой из задач управления свойствами объекта (процесса). Управление информационной безопасностью (ИБ) ИТКС осуществляется в соответствии с частной концепцией ИБ. В условиях преднамеренного информационно-технического воздействия (ИТВ) на ИТКС управления транспортом необходимо рассматривать взаимоотношения среды функционирования и ИТКС в форме *информационного конфликта*. Основной целевой функцией управления ИБ ИТКС на транспорте в условиях информационного конфликта является минимизация времени выявления уязвимости ИТКС, обнаружения деструктивного фактора и достижение требуемого качества управления ресурсами, выделяемыми для его нейтрализации в течение периода конфликтной ситуации. С позиций концепции информационного противоборства сущность информационного конфликта заключается в создании средствами ИТВ угроз нарушения безопасности информации в ИТКС и реагировании их на угрозы (рис. 3).



Рис. 3. Концепция управления информационной безопасностью

Для противодействия ИТВ в ИТКС на транспорте организуется система обеспечения информационной безопасности (СОИБ). Исход информационного конфликта в условиях ИТВ и ограниченных транспортно-вычислительных ресурсов системы защиты ИТКС управления транспортом в существенной степени зависит от качества управления ими. В процессе управления ИТКС для обоснования стратегий, форм, методов и способов целенаправленного поведения СОИБ при информационном конфликте необходимо выявить закономерности поведения систем ИТВ и СОИБ [4].

Результаты (Results)

Для реализации целевой функции контроля ИБ ИТКС необходима разработка соответствующей концепции, формализующей закономерные взаимосвязи процессов возникновения уязвимостей ИТКС, воздействия ИТВ и управления СОИБ ИТКС по критерию минимизации времени обнаружения и обработки инцидентов, а также обоснование критериев своевременности (оперативности) цикла управления функциями безопасности (рис. 4). Модель должна включать модель СОИБ как объекта контроля, модель угроз ИБ ИТКС и модель процесса (системы) контроля информационной безопасности ИТКС.

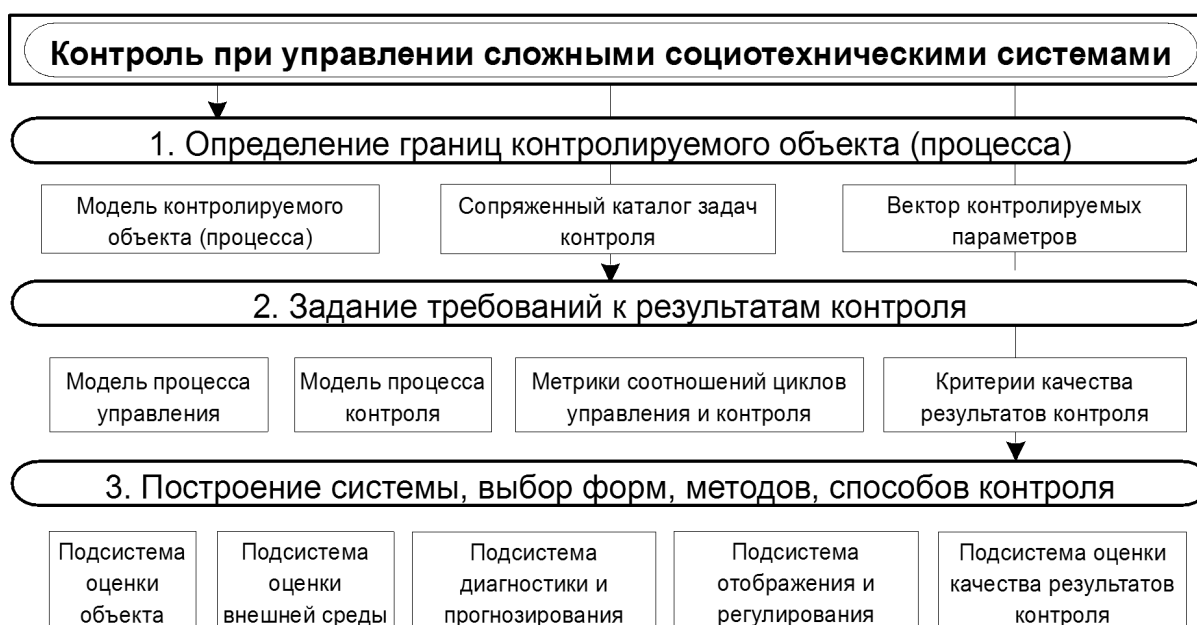


Рис. 4. Концепция контроля информационной безопасности ИТКС

Известные подходы оценки состояния ИТКС на основе вероятностных графов [5] основаны на предположении о марковских свойствах моделируемых процессов и достаточности статистических данных для перехода к вероятностным характеристикам событий. В связи с этим метод вероятностных графов ограничен статическими свойствами оцениваемого объекта, не позволяя в полной мере обеспечивать близкий к реальному масштабу времени контроль.

Статистика уязвимостей и инцидентов безопасности объектов ИТКС на транспорте показывает низкую эффективность существующих подходов к организации системы и применяемых методов контроля ИБ. Известные методы обработки больших данных в настоящее время являются недостаточно эффективными, что, в частности, обусловлено снижением содержательности обрабатываемых данных вследствие упрощения алгоритмов оценки частных и обобщенных показателей ИБ ИТКС и снижением критериев оценки ИБ для повышения оперативности контроля.

Традиционная схема контроля ИБ ИТКС в настоящее время (рис. 5) предполагает централизованную обработку данных контроля, которые передаются в центр управления безопасностью (*Security Operation Centre*) по основным информационным каналам в виде неприоритетного трафика.



Рис. 5. Традиционная схема процесса контроля ИБ ИТКС.

Необходимыми условиями обеспечения полноты, достоверности и своевременности контроля ИБ являются:

- энтропия (количество степеней свободы) системы контроля ИБ должна быть не меньше энтропии ИТКС;
- скорость (частота) изменения (адаптации) агентов контроля должна быть не меньше скорости изменения ИТКС.

Обсуждение (Discussion)

Гипотеза данного исследования заключается в том, что для обеспечения качественного управления ИБ интеллектуальной ИТКС необходимо развитие существующих подходов к контролю ИБ на основе *интеллектуализации соответствующей системы контроля ИБ* и увеличение за счет этого количества ее степеней свободы (гибкости). Гибкость в данном случае предполагает возможность обоснованного выбора критериев качества контроля ИБ ИТКС, а также самоорганизации системы контроля ИБ.

Интеллект, обеспечивающий управление суперсистемой, называется *сопряженным* и может быть внешним по отношению к суперсистеме, внутренним или порождаться самой суперсистемой [1]. Интеллектуализация на этапах полной функции управления обеспечивает опознавание воздействующих факторов и определение целевой функции управления, а также формулирование соответствующих частных концепций управления в отношении каждого из воздействующих факторов.

Интеллектуализация контроля безопасности информации в ИТКС предполагает решение *задачи самоорганизации системы* (выбора форм, методов и способов) для обеспечения заданного качества контроля в условиях высокой динамичности ИТКС, а также при поддержке решений по координации вычислительных и транспортных ресурсов ИТКС, выделяемых для обеспечения контроля ИБ: биллинговой системы, системы управления качеством обслуживания QoS, ресурсов гибких коммутаторов (контроллеров), COPM, DLP [6]. Известные системы управления ИТКС используют *модели ситуационного управления*, в которых интеллектуализация контроля обеспечивается искусственными нейронными сетями (ИНС).

Качественную шкалу возрастания потенциала решения задач управления с помощью интеллектуализации можно представить следующим образом: программное управление; управление с обратной связью; ситуационное управление; адаптивное управление; интеллектуальное управление (без целеполагания); интеллектуальное управление (с целеполаганием) [7]. Концепция ИНС предполагает модель *базового процессорного элемента* (рис. 6) и различные варианты структуры многослойных сетей, адаптируемых для решения конкретной задачи с помощью *методов машинного обучения* [8]. Требования к объему обучающей выборки и времени обучения для адаптации к изменяющимся условиям функционирования объекта контроля являются одним из недостатков данной технологии [9].

Существующие подходы и методы машинного обучения искусственных нейронных сетей ограничены предположением о репрезентативности обучающей выборки событий, однако в современных условиях высокой динамики угроз ИБ данное предположение делает необходимыми обоснование и контроль адекватности модели обучающей выборки. Широкое применение находит *агентно-ориентированный подход* к построению распределенных систем контроля состояния ИТКС.



Рис. 6. Обобщенная архитектура методологии управления ИБ ИТКС

Задача координации ресурсов, разделяемых между процессами при управлении мультягентной сетью контроля ИБ ИТКС, является одной из проблем организации распределенных и параллельных вычислений в условиях многопротокольности взаимодействия и многоформатности данных. Кроме того, современные системы мониторинга ИТКС генерируют бесконечный поток событий безопасности, которые для обеспечения полноты охвата контролем и обеспечения режима реального времени настроены на фиксацию изменений параметров каждого из элементов системы без детализации его состояния. По этой причине возникает переизбыток сообщений и недостаток их контекста, что усложняет для ЛПП задачу идентификации состояния безопасности и требует дополнительных проверок, следовательно, снижается оперативность реагирования на инциденты безопасности. Таким образом, возникает задача обработки в режиме, близком к реальному времени, большого потока сообщений о событиях безопасности без потери их содержательности. Для решения этой задачи целесообразно исследование феномена *афферентного синтеза* применительно к задачам оценки ИБ ИТКС [10] и дополнение существующей нейросетевой модели системы контроля моделью иерархической параллельной обработки данных контроля.

Графодинамическое представление процесса сбора и обработки данных о контролируемых параметрах ИБ позволяет организовать параллельную обработку больших данных контроля с учетом малоинформативных контролируемых параметров в масштабе времени, близком к реальному. Известные подходы исчисления древовидных структур позволяют существенно снизить трудоемкость программирования в ресурсах глобальных ИТКС путем построения *унифицированных функций отображения* [11]. Однако в настоящее время прикладные аспекты теории графодинамики и исчисления древовидных структур, применимые для решения задач организации контроля

ИБ ИТКС, недостаточно исследованы. Следовательно, требуется разработка методов и моделей, для формализации процесса контроля ИБ и возможности комбинирования постоянных, периодически формируемых и стохастически самоорганизующихся (виртуальных) структур системы контроля ИБ с учетом важности (приоритетности) контролируемых параметров ИБ ИТКС, а также обеспечивающих унификацию протоколов взаимодействия и форматов представления данных.

В связи с динамичностью и неопределенностью границ между виртуальными системами, а также их структуры, неопределенностью описания человеческого фактора возникает необходимость использования нечеткой логики при моделировании процессов в ИТКС. Существующие модели нечетких семантических сетей недостаточно исследованы в аспекте формализации критериев оценки ИБ ИТКС.

Таким образом, интенсивность нарастания энтропии современной ИТКС при ее функционировании такова, что контролировать состояние и управлять ИБ ИТКС в реальном масштабе времени в рамках существующей концепции и методологии невозможно вследствие невыполнения условия достаточной предсказуемости ее поведения. Приведенные недостатки в практике, а также в теории контроля ИБ ИТКС свидетельствуют о существовании проблемы, заключающейся в том, что известные модели и методы управления ИБ ИТКС (см. рис. 6), базирующиеся на существующих концепциях и научных подходах, не позволяют разрешить противоречия в теории контроля ИБ ИТКС [12].

Заключение (Conclusion)

Проведенный анализ подходов и методов контроля состояния ИТКС позволяет выдвинуть гипотезу о том, что повышение качества управления ее ИБ возможно за счет синтеза интеллектуальной системы контроля ИБ ИТКС на основе теории функциональных систем и формализации процесса афферентного синтеза. Сокращение цикла контроля ИБ возможно на основе нового подхода к обеспечению самоорганизации системы контроля ИБ по заданным критериям качества результатов контроля путем автоматической генерации заданий (профилей) контроля и самосинхронизации мультиагентной сети контроля. Повышение достоверности результатов контроля возможно путем разработки метода унификации форматов представления данных и протоколов обмена данными в мультиагентной сети контроля на основе моделей графодинамики и древовидных структур. Каждый уровень декомпозиции ИТКС (инфраструктуры, услуг, приложений) может контролироваться соответствующим слоем синтезированной сети агентов, что позволяет создать универсальную технологическую платформу. В связи с этим в рамках развития методологии контроля ИБ ИТКС актуальным является решение следующих научных задач [13]:

1. Разработка графодинамической модели системы контроля ИБ ИТКС с сетевым управлением мультиагентной сетью агентов контроля ИБ.
2. Разработка метода логического вывода иерархического дерева задач контроля (профилей контроля) для каждого типа контролируемых объектов с учетом данных о текущем состоянии ИТКС, внешних условий и доступности ресурсов системы контроля ИБ на основе исчисления древовидных структур.
3. Разработка метода обработки данных контроля и свертки частных показателей ИБ в виде нечеткой семантической сети.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Достаточно общая теория управления (ДОТУ). — Вторая редакция 2003–2004 гг. — М.: НОУ «Академия управления», 2011. — 416 с.
2. *Лепешкин О. М.* Концепция интеллектуализации контроля безопасности связи в информационно-телекоммуникационной сети специального назначения / О. М. Лепешкин, Ю. К. Худайназаров // Состояние и перспективы развития современной науки по направлению «Информационная безопасность»: сб. статей III Всеросс. науч.-техн. конф. — Анапа: Военный инновационный технополис «ЭРА», 2021. — С. 697–709.

3. Евланов Л. Г. Контроль динамических систем / Л. Г. Евланов. — 2-е изд., перераб. доп. — М.: Наука (Главная редакция физико-математической литературы), 1979. — 432 с.
4. Жидко Е. А. Модель подсистемы безопасности и защиты информации системы связи и управления критически важного объекта / Е. А. Жидко, С. Н. Разиньков // Системы управления, связи и безопасности. — 2018. — № 1. — С. 122–135.
5. Аллакин В. В. Идентификация состояния узлов информационно-телекоммуникационных сетей общего пользования подсистемой мониторинга информационной безопасности / В. В. Аллакин, Н. П. Будко // Техника средств связи. — 2020. — № 3 (151). — С. 58–65.
6. Шуравин А. С. Анализ применимости DLP-систем для мониторинга безопасности распределенных сетей связи специального назначения / А. С. Шуравин // Актуальные проблемы защиты и безопасности / Труды XXIII Всеросс. науч.-практ. конф. РАРАН. — М.: РАРАН, 2020. — Т. 1. — С. 278–281.
7. Чинакал В. О. Интеллектуальные системы и технологии: учеб. пособие / В. О. Чинакал. — М.: РУДН, 2008. — 303 с.
8. Терехов В. А. Нейросетевые системы управления / В. А. Терехов, Д. В. Ефимов, И. Ю. Тюкин, В. Н. Антонов. — СПб: Изд-во СПб. ун-та, 1999. — 265 с.
9. Худайназаров Ю. К. Интеллектуализация разрешения неопределенности информации при синтезе и анализе системы обеспечения безопасности критически важного объекта / Ю. К. Худайназаров, П. А. Новиков, А. С. Шуравин, К. Н. Киселев // Нейрокомпьютеры и их применение / XVII Всеросс. науч. конф.: тез. докл. — М.: МГППУ, 2019. — С. 62–64.
10. Анохин П. К. Биология и нейрофизиология условного рефлекса / П. К. Анохин. — М.: Медицина, 1968. — 546 с.
11. Затуливетер Ю. С. Графодинамические системы с сетевым управлением в математически однородном поле компьютерной информации / Ю. С. Затуливетер, Е. А. Фищенко // Управление большими системами: сб. тр. — 2010. — № 30–1. — С. 567–604.
12. Лепешкин О. М. Проблема контроля и мониторинга информационной безопасности информационно — телекоммуникационной сети специального назначения / О. М. Лепешкин, Ю. К. Худайназаров // Вопросы оборонной техники. Серия 16: Технические средства противодействия терроризму. — 2020. — № 7–8 (145–146). — С. 49–55.
13. Худайназаров Ю. К. Задачи системы интеллектуального мониторинга информационной безопасности инфотелекоммуникационной сети / Ю. К. Худайназаров, А. С. Пермяков, Е. О. Лепешкин // Нейрокомпьютеры и их применение / XVIII Всеросс. науч. конф.: тез. докл. — М.: МГППУ, 2020. — С. 198–200.

REFERENCES

1. *Dostatochno obshchaya teoriya upravleniya. (Vtoraya redaktsiya 2003–2004 gg.)*. M.: NOU «Akademiya upravleniya», 2011.
2. Lepeshkin, O. M., and Yu. K. Khudainazarov. “Kontseptsiya intellektualizatsii kontrolya bezopasnosti svyazi v informatsionno-telekommunikatsionnoi seti spetsial’nogo naznacheniya.” *Sostoyanie i perspektivy razvitiya sovremennoi nauki po napravleniyu «Informatsionnaya bezopasnost’*». *Sbornik statei III Vserossiiskoi nauchno-tekhnicheskoi konferentsii*. Anapa: Federal’noe gosudarstvennoe avtonomnoe uchrezhdenie “Voennyi innovatsionnyi tekhnopolis “ERA”, 2021. 697–709.
3. Evlanov, L. G. *Kontrol’ dinamicheskikh sistem*. 2nd ed. M.: Nauka. Glavnaya redaktsiya fiziko-matematicheskoi literatury, 1979.
4. Zhidko, Elerna Aleksandrovna, and Sergey Nikolaevich Razinkov. “Model of security and information protection subsystem of a communication and control system of a critical object.” *Systems of Control, Communication and Security* 1 (2018): 122–135.
5. Allakin, V. V., and N. P. Budko “Identification of the state of nodes of public information and telecommunications networks by the information security monitoring subsystem.” *Means of communication equipment* 3(151) (2020): 58–65.
6. Shuravin, A. S. “Analiz primenimosti DLP-sistem dlya monitoringa bezopasnosti raspredelennykh setei svyazi spetsial’nogo naznacheniya.” *Aktual’nye problemy zashchity i bezopasnosti. Trudy XXIII Vserossiiskoi nauchno-prakticheskoi konferentsii RARAN*. Vol. 1. M.: Rossiiskaya akademiya raketnykh i artilleriiskikh nauk, 2020. 278–281.
7. Chinakal, V. O. *Intellektual’nye sistemy i tekhnologii*. M.: RUDN, 2008.

8. Terekhov, V. A., D. V. Efimov, I. Yu. Tyukin, and V. N. Antonov. *Neirosetevye sistemy upravleniya*. SPb: Izd. S-Peterburgskogo universiteta, 1999.
9. Khudainazarov, Yu. K., P. A. Novikov, A. S. Shuravin, and K. N. Kiselev. "Intellectualizatsiya razresheniya neopredelennosti informatsii pri sinteze i analize sistemy obespecheniya bezopasnosti kriticheski vazhnogo ob"ekta." *Neirokomp'yutery i ikh primeneniye. XVII Vserossiiskaya nauchnaya konferentsiya. Tezisy dokladov*. M.: Moskovskii gosudarstvennyi psikhologo-pedagogicheskii universitet, 2019. 62–64.
10. Anokhin, P. K. *Biologiya i neurofiziologiya uslovnogo refleksa*. M.: Meditsina, 1968.
11. Zatuliveter, Yurii Semenovich, and Elena Alekseevna Fischenko. "Graph-dynamics systems with network-centric control in mathematically uniform field of computer information." *Large-Scale Systems Control* 30–1 (2010): 567–604.
12. Lepechkin, Oleg Mihailovich, and Yurj Kahramonovich Khudajnazarov. "The problem of the checking and monitoring to information safety information — telecommunication network of the special purpose." *Defense Engineering Problems. Series 16. Technical means of combating terrorism* 7–8(145–146) (2020): 49–55.
13. Khudainazarov, Yu. K., A. S. Permyakov, and E. O. Lepeshkin. "Zadachi sistemy intellektual'nogo monitoringa informatsionnoi bezopasnosti infotelekkommunikatsionnoi seti." *Neirokomp'yutery i ikh primeneniye. XVIII Vserossiiskaya nauchnaya konferentsiya. Tezisy dokladov*. M.: Moskovskii gosudarstvennyi psikhologo-pedagogicheskii universitet, 2020. 198–200.

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

Стародубцев Юрий Иванович —
доктор военных наук, профессор
Военная академия связи имени маршала
Советского Союза С. М. Будённого
193064, Российская Федерация, Санкт-Петербург,
Тихорецкий проспект, 3
e-mail: starodub@mail.ru

Худайназаров Юрий Кахрамонович —
кандидат технических наук
ФГБОУ ВО «ГУМРФ имени адмирала
С. О. Макарова»
198035, Российская Федерация, Санкт-Петербург,
ул. Двинская, 5/7
e-mail: yu-78@ya.ru

Кныш Татьяна Петровна —
кандидат физико-математических наук, доцент
ФГБОУ ВО «ГУМРФ имени адмирала
С. О. Макарова»
198035, Российская Федерация, Санкт-Петербург,
ул. Двинская, 5/7
e-mail: knyshhp@gumrf.ru

INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Starodubtsev, Yuri I. —
Dr. of Military Sciences, professor
Military Telecommunications Academy
3 Tikhoretsky Ave.,
St. Petersburg, 193064,
Russian Federation
e-mail: starodub@mail.ru

Khudainazarov, Yuri K. —
PhD
Admiral Makarov State University of Maritime
and Inland Shipping
5/7 Dvinskaya Str., St. Petersburg, 198035,
Russian Federation
e-mail: yu-78@ya.ru

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

Статья поступила в редакцию 6 февраля 2023 г.
Received: February 6, 2023.

Научное периодическое издание

**Вестник Государственного университета морского
и речного флота имени адмирала С. О. Макарова**

Том 15. № 2

2023 год

Выпускающий редактор *Н. А. Карамзина*
Дизайн и верстка *М. Н. Евсюткина*

Подписано в печать с оригинал-макета 28.04.23. Формат 60×90/8
Гарнитура Times New Roman. Усл. печ. л. 21,75. Тираж 500 экз. Заказ № 220/23

Государственный университет морского и речного флота имени адмирала С. О. Макарова
198035, Санкт-Петербург, ул. Двинская, 5/7