

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 9. № 1

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

**САНКТ-ПЕТЕРБУРГ
2017**

Вестник Государственного университета морского и речного флота имени адмирала С. О. Макарова. — СПб.: ГУМРФ имени адмирала С. О. Макарова, 2017. — Т. 9. — № 1. — 221 с.

ISSN (print) 2309-5180.

ISSN (online) 2500-0551

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

В Вестнике публикуются материалы оригинальных научных исследований и основных результатов диссертаций на соискание ученой степени доктора и кандидата наук по основным группам специальностей в соответствии с Номенклатурой специальностей научных работников: **05.22.00 «Транспорт»** в разделах: «Эксплуатация водного транспорта, судовождение», «Водные пути сообщения и гидрография»; **05.08.00 «Кораблестроение»** в разделах: «Судостроение и судоремонт», «Судовые энергетические установки, системы и устройства»; **05.09.00 «Электротехника»** в разделе «Электротехнические комплексы и системы»; **05.13.00 «Информатика, вычислительная техника и управление»** в разделе «Информационные технологии и автоматизация на транспорте».

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

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

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



ISSN 2309-5180



© Государственный университет морского и речного флота имени адмирала С. О. Макарова, 2017

РЕДАКЦИОННЫЙ СОВЕТ

Гл. редактор

С. О. Барышников,

д.т.н., проф.

rector@gumrf.ru

Зам. гл. редактора

А. П. Нырклов,

д.т.н., проф.

NyrkowAP@gumrf.ru

С. Гуцма —

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

Г. В. Егоров —

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

Ф. В. Кармазинов —

координатор стратегических
программ ГУП «Водоканал
СПб», д.т.н., проф.

Р. Качиньски —

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

А. И. Пошивай —

заместитель руководителя
Федерального агентства
морского и речного транспорта

А. Е. Сазонов —

д.т.н., проф.,
чл.-кор. РАН

Р. М. Юсупов —

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

РЕДАКЦИЯ:

E-mail: journal@gumrf.ru

http://journal.gumrf.ru

ЭКСПЛУАТАЦИЯ ВОДНОГО ТРАНСПОРТА, СУДОВОЖДЕНИЕ 7

Сазонов А. Е., Осипов Г. С. Лингвистическая оценка уровня совершенства
системы управления безопасностью судоходных компаний 7*Ершов А. А., Петухов П. И.* Рекомендации по действиям в чрезвычайных
ситуациях в ледовых условиях плавания 17*Темникова А. А., Рубан А. Р.* Определение скорости ледоколов на «чистой» воде,
эксплуатируемых на Северном Каспии 27*Кузнецов А. Л., Галин А. В., Горынцев М. Н.* Методика оценки доходности
контейнерных терминалов при их недогрузке 37*Щербакова-Слюсаренко В. Н., Погодин В. А., Ткаченко А. С.* Разработка
функциональной модели контейнерного терминала типа «сухой порт»
и принципов ее использования в технологическом проектировании 48*Китаев М. В., Дорожко В. М.* Оценка устойчивости контура морского судна
к опрокидыванию уединенной волной 61*Киселёв В. С.* Обоснование интеграции процедуры обязательного
декларирования веса грузовой партии 74

ВОДНЫЕ ПУТИ СООБЩЕНИЯ И ГИДРОГРАФИЯ 81

Афонин А. Б., Тезиков А. Л. Концепция развития судоходных трасс акватории
Северного морского пути 81*Королев И. Ю.* Проверка методики оценки допустимого отклонения судна
от высокоширотной трассы Северного морского пути 88*Козлов Р. В., Ли В., Моргунов К. П.* Использование современных средств
измерения деформаций при исследовании сооружений
Волгоградского гидроузла 95

СУДОСТРОЕНИЕ И СУДОРЕМОНТ 111

Лебедева М. П., Айзинов С. Д., Лебедев А. О. Методика оценки безопасного
движения судов в стесненной акватории 111*Макарчук А. В., Макарчук Н. В., Старцев В. Н.* Разработка математической
модели многопроходной дуговой сварки 121*Крыжевнич Г. Б., Петров А. А.* Исследование применимости сварных штевней
взамен литых на ледоколах и судах ледового плавания 132*Веселков В. В., Афанасьев Н. А., Жмуренков А. Г.* Разработка
высокопроизводительных технологий лазерной сварки и наплавки
для современного судостроения 143*Нго Ж. В., Сахно К. Н.* Исследование компенсационных возможностей
проектной трассировки трубопроводов судовых систем 157СУДОВЫЕ ЭНЕРГЕТИЧЕСКИЕ УСТАНОВКИ,
СИСТЕМЫ И УСТРОЙСТВА 165*Андреианов Е. Н., Иванов А. Н.* Исследование свойств дифференциальных
механизмов с точки зрения функционирования в специальных судовых
и крановых приводах 165

**Члены
редколлегии:**

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

<i>Костенко А. В.</i> Синтез структуры функционально-ориентированного процесса изготовления цилиндрических втулок на основе анализа работы судовых дизелей.....	176
<i>Иванов И. А.</i> Исследование взаимодействия отстаивания и центробежной сепарации.....	187
<i>Туркин А. В.</i> Исследование кислородной генерации озона для очистки отработавших газов судового двигателя.....	193

ЭЛЕКТРОТЕХНИЧЕСКИЕ КОМПЛЕКСЫ И СИСТЕМЫ..... 201

<i>Кулинич А. И., Припотнюк А. В., Устинов Ю. М.</i> Судовые ВЧ-радиостановки — единственное средство дальней связи в морском районе А4 ГМССБ (Арктическом бассейне России).....	201
--	-----

**ИНФОРМАЦИОННЫЕ ТЕХНОЛОГИИ И АВТОМАТИЗАЦИЯ
НА ТРАНСПОРТЕ..... 211**

<i>Сахаров В. В., Чертков А. А., Сабуров С. В.</i> Алгоритм наблюдателя пониженного порядка системы управления курсом судна для оценки возмущений и шумов измерений.....	211
--	-----

OPERATION OF WATER TRANSPORT, NAVIGATION 7

<i>Sazonov A. E., Osipov G. S.</i> Linguistic assessment of the perfection level of safety management system of shipping companies.....	7
<i>Ershov A. A., Petuhov P. I.</i> Recommendations for emergency response in ice conditions of navigation.....	17
<i>Temnikova A. A., Ruban A. R.</i> Determination of the icebreakers' speed in ice free water operated in the Northern Caspian Sea.....	27
<i>Kuznetsov A. L., Galin A. V., Goryntsev M. N.</i> Method of assessing the profitability of container terminals within their underloading.....	37
<i>Shcherbakova-Slyusarenko V. N., Pogodin V. A., Tkachenko A. S.</i> The development of the functional model for the "dry port" type container terminal and principles of its use in the technologic design.....	48
<i>Kitaev M. V., Dorozhko V. M.</i> Evaluation of stability of sea vessel contour to capsizing due to solitary wave.....	61
<i>Kiselev V. S.</i> The substantiation of mandatory declaration cargo shipment.....	74

WATERWAYS AND HYDROGRAPHY 81

<i>Afonin A. B., Tezikov A. L.</i> The concept of development of shipping routes along the Northern sea route.....	81
<i>Korolev I. Ju.</i> Verification of methods for assessment of the permissible vessel variation from the high-latitude Northern sea route.....	88
<i>Kozlov R. V., Li V., Morgunov K. P.</i> The use of modern means of strain measuring at research of installations of Volgograd hydroelectric complex.....	95

SHIPBUILDING AND SHIP REPAIR 111

<i>Lebedeva M. P., Aizinov S. D., Lebedev A. O.</i> Technique of assessment of the safe navigation in the «constrained» water area.....	111
<i>Makarchuk A. V., Makarchuk N. V., Startsev V. N.</i> Mathematical model elaboration of multi-pass arc welding.....	121
<i>Kryzhevich G. B., Petrov A. A.</i> Research of applicability of the welded stems and stems instead of cast ones on icebreakers and ice-class ships.....	132
<i>Veselkov V. V., Afanasev N. A., Zhmurenkov A. G.</i> Development of high-efficient laser welding and cladding technologies for the current shipbuilding.....	143
<i>Ngo G. V., Sakhno K. N.</i> The study of compensatory possibilities of routing pipelines project of ship systems.....	157

SHIP POWER PLANTS, SYSTEMS AND DEVICES..... 165

<i>Andrianov E. N., Ivanov A. N.</i> The study of differential mechanisms from the point of view of functioning in the ship and crane drives.....	165
<i>Kostenko A. V.</i> Synthesis structure of functionally-oriented process of cylinder liners manufacturing based on the analysis of marine diesel engines work.....	176

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

Deputy Editor-in-Chief

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

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

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

F. V. Karmazinov —
Strategic Program Coordinator of SUE "Vodokanal of St. Petersburg", doctor of technical Sciences, Prof.

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

A. I. Poshivay —
Deputy Head of the Federal Agency of Sea and River Transport

A. Ye. Sazonov —
doctor of technical Sciences, Prof., corresponding member of the Russian Academy of Sciences

M. Yusupov —
director of "St. Petersburg Institute for Informatics and Automation of RAS", doctor of technical Sciences, Prof., corresponding member of the Russian Academy of Sciences

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

Editorial Collegium:

O. K. Bezyukov,
doctor of technical Sciences
A. T. Bekker,
doctor of technical Sciences
N. I. Vatin,
doctor of technical Sciences
V. V. Veselkov,
doctor of technical Sciences
P. A. Garibin,
doctor of technical Sciences
D. P. Goloskokov,
doctor of technical Sciences
V. A. Zhukov,
doctor of technical Sciences
Y. M. Iskanderov,
doctor of technical Sciences
O. G. Karatayev,
doctor of technical Sciences
V. V. Karetnikov,
doctor of technical Sciences
A. V. Kirichenko,
doctor of technical Sciences
M. N. Kirsanov,
doctor of phys.-math. Sciences
T. A. Klepikova,
doctor of philosophical Sciences
M. A. Kolosov,
doctor of technical Sciences
Ye. A. Koroleva,
doctor of economic Sciences
I. I. Kostylev,
doctor of technical Sciences
A. L. Kuznetsov,
doctor of technical Sciences
Ye. A. Lavrentyeva,
doctor of economic Sciences
A. Yu. Lastovtsev,
candidate of technical Sciences
V. A. Loginovskiy,
doctor of technical Sciences
G. V. Makarov,
doctor of technical Sciences
V. Ye. Marley,
doctor of technical Sciences
A. M. Nikitin,
doctor of technical Sciences
T. A. Pantina,
doctor of economic Sciences
L. I. Pogodayev,
doctor of technical Sciences
V. I. Reshnyak,
doctor of technical Sciences
V. V. Romanovskiy,
doctor of technical Sciences
A. A. Sikarev,
doctor of technical Sciences
S. V. Smolentsev,
doctor of technical Sciences
A. L. Stepanov,
doctor of technical Sciences
M. V. Sukhoterin,
doctor of technical Sciences
Ye. G. Trunin,
candidate of economic Sciences,
General Director
of FSI Russian River Register
A. L. Tezikov,
doctor of technical Sciences
V. I. Chernenko,
doctor of technical Sciences
V. B. Chistov,
doctor of technical Sciences

<i>Ivanov I. A.</i> Research of interaction of sedimentation and centrifugal separation	187
<i>Turkin A. V.</i> Research of oxygen generation of ozone for marine engines exhaust gas cleaning	193

ELECTRICAL EQUIPMENT AND SYSTEMS..... 201

<i>Kulinich A. I., Pripotnyuk A. V., Ustinov Yu. M.</i> Marine HF radio installations are the only means of remote communications in sea area A4 for GMDSS (Arctic basin of Russia)	201
---	-----

INFORMATION TECHNOLOGY AND AUTOMATION IN TRANSPORT..... 211

<i>Saharov V. V., Chertkov A. A., Saburov S. V.</i> Reduced-order observer algorithm course management system of the ship to assess disturbance and noise measurements	211
--	-----

ЭКСПЛУАТАЦИЯ ВОДНОГО ТРАНСПОРТА, СУДОВОЖДЕНИЕ

DOI: 10.21821/2309-5180-2017-9-1-7-16

LINGUISTIC ASSESSMENT OF THE PERFECTION LEVEL OF SAFETY MANAGEMENT SYSTEM OF SHIPPING COMPANIES

A. E. Sazonov, G. S. Osipov

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

The article discusses the important, urgent and practically important problem of estimating of the perfection level of the safety management system of shipping companies to ensure compliance with the requirements of the International management code for the safe operation of ships and pollution prevention. The basis for the implementation of the study was developed earlier by the order of Russian Maritime register of shipping methods of self-assessment of the perfection level of safety management systems. The analysis of intellectual information support of available and advising expert systems in the field of ensuring of the safety requirements for operation of complex transport systems was showed in the work. The necessity was showed and the concept of linguistic variables using for evaluation of safety factors was proposed. The methodology of factual synthesis of the fuzzy knowledge base about the subject area was developed. The core of this methodology is fuzzy estimates set by experts. New theory of databases and knowledge bases based on two-level fuzzy sets was built where values of membership functions are fuzzy sets. The problem of constructing integral evaluation of the level of security in case when many factors and levels of their significance are presented by linguistic assessments was investigated and solved. For the formalization of linguistic assessments the possibility and expediency of use of fuzzy trapezoidal numbers, the semantic meaning of which is close to the statements in natural language were justified.

The feasibility and the relevancy of the concept of the use of linguistic variables for the problem solving for the construction of advanced expert systems of ensuring of the navigation safety were shown. The conclusion about expediency of application of fuzzy expert estimates to formalize and solve the problem of estimation of perfection level of safety management systems of shipping companies was made.

Keywords: fuzzy variables, linguistic expert evaluation, the level of perfection of safety management systems.

For citations:

Sazonov, Anatoly E., and Gennady S. Osipov. "Linguistic assessment of the perfection level of safety management system of shipping companies." *Vestnik Gosudarstvennogo universiteta morskogo i rechnogo flota imeni admirala S.O. Makarova* 9.1 (2017): 7–16. DOI: 10.21821/2309-5180-2017-9-1-7-16.

УДК 656.611.2: 519.816: 004.891

ЛИНГВИСТИЧЕСКАЯ ОЦЕНКА УРОВНЯ СОВЕРШЕНСТВА СИСТЕМЫ УПРАВЛЕНИЯ БЕЗОПАСНОСТЬЮ СУДОХОДНЫХ КОМПАНИЙ

А. Е. Сазонов, Г. С. Осипов

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

В статье рассмотрена важная, актуальная и практически значимая задача оценки уровня совершенства системы управления безопасностью судоходных компаний с целью обеспечения соответствия требованиям Международного кодекса по управлению безопасной эксплуатацией судов и предотвращением загрязнения (МКУБ). Основой для выполнения исследования явилась разработанная ранее по заказу Российского морского регистра судоходства методика проведения самооценки уровня совершенства систем управления

безопасностью. В работе приведен анализ интеллектуального информационного обеспечения существующих экспертных и советующих систем в области обеспечения требований к безопасности функционирования сложных транспортных систем. Обоснована необходимость и предложена концепция использования лингвистических переменных для оценки факторов обеспечения безопасности. Разработана методология синтеза нечеткой фактуальной базы знаний о предметной области, ядром которой являются нечеткие оценки, задаваемые экспертами. Построена новая теория синтеза баз данных и баз знаний на основе двухуровневых нечетких множеств, значениями функций принадлежности которых являются нечеткие множества. Исследована и решена задача построения интегральной оценки уровня безопасности в случае, когда и множество факторов, и уровни их значимости представлены лингвистическими оценками. Обоснована возможность и целесообразность использования для формализации лингвистических оценок нечетких трапецевидных чисел, семантический смысл которых близок к высказываниям на естественном языке.

Показана практическая реализуемость и значимость разработанной концепции использования лингвистических переменных для решения задачи построения перспективных экспертных систем обеспечения безопасности мореплавания. Сделан вывод о целесообразности применения нечетких экспертных оценок для формализации и решения проблемы оценки уровня совершенства систем управления безопасностью судоходных компаний.

Ключевые слова: нечеткие переменные, экспертные лингвистические оценки, уровень совершенства систем управления безопасностью.

Для цитирования:

Сазонов А. Е. Лингвистическая оценка уровня совершенства системы управления безопасностью судоходных компаний / А. Е. Сазонов, Г. С. Осипов // Вестник Государственного университета морского и речного флота имени адмирала С. О. Макарова. — 2017. — Т. 9. — № 1. — С. 7–16. DOI: 10.21821/2309-5180-2017-9-1-7-16.

Введение

Основой обеспечения безопасности мореплавания является регулярное освидетельствование систем управления безопасностью (СУБ) (*Safety Management System (SMS)*) судоходных компаний на соответствие их требованиям Международного кодекса по управлению безопасной эксплуатацией судов и предотвращением загрязнения (МКУБ).

К настоящему времени по заказу Российского морского регистра судоходства (РМРС) разработана методика проведения самооценки уровня совершенства системы управления безопасностью (СУБ) судоходных компаний [1]. В соответствии с этой методикой факторы, определяющие уровень безопасности, структурированы на шесть ключевых областей, каждой из которых присвоен уникальный экспертный уровень значимости (вес):

- А. Политика и ответственность Компании (разд. 1 – 3 МКУБ).
- В. Персонал и ресурсы (разд. 4 – 6 МКУБ).
- С. Безопасность ключевых операций (разд. 7 МКУБ).
- Д. Готовность к аварийным ситуациям (разд. 8 МКУБ).
- Е. Несоответствия и техническое обслуживание (разд. 9, 10 МКУБ).
- Ф. Документация и анализ эффективности СУБ Компании (разд. 11 – 13 МКУБ).

Каждая ключевая область содержит по 10 факторов, зафиксированных их описанием, уровнем значимости, а также рекомендациями по оценке и обеспечению безопасности.

Методика самооценки легла в основу экспертной системы «Оценка уровня совершенства СУБ судоходной компании», которая внедрена в РМРС и размещена на официальном сайте <http://www.rs-class.org/ru/register/services/ism/> в разделе «Освидетельствование систем управления безопасностью».

В разработанной программе задача экспертов сводится к заданию (вводу) оценок факторов для каждой из ключевых областей по десятибалльной (*четкой*) шкале. На рис. 1 представлена форма для ввода исходных данных, которая позволяет избежать возможных ошибок при наборе чисел с клавиатуры.

Ключевые области

А : Политика и ответственность Компании
a1 a2 a3 a4 a5 a6 a7 a8 a9 a10
4 9 8 9 8 7 10 10 6 1

В : Персонал и Ресурсы
b1 b2 b3 b4 b5 b6 b7 b8 b9 b10
7 9 5 1 9 4 5 1 1 5

С : Безопасность ключевых операций
c1 c2 c3 c4 c5 c6 c7 c8 c9 c10
5 6 1 7 6 5 9 5 6 7

Д : Готовность к аварийным ситуациям
d1 d2 d3 d4 d5 d6 d7 d8 d9 d10
4 7 7 8 6 6 7 7 6 6

Е : Несоответствия и техническое обслуживание
e1 e2 e3 e4 e5 e6 e7 e8 e9 e10
1 1 4 4 3 4 10 4 5 7

Ф : Документация и анализ эффективности СУБ Компании
f1 f2 f3 f4 f5 f6 f7 f8 f9 f10
9 7 8 4 6 4 6 7 4 2

Описание факторов
a1 – Статус судоходной Компании, форма собственности и управления Компанией, ответственность закреплены юридически и способствуют развитию Компании и безопасной эксплуатации судов.

Рис. 1. Форма для ввода экспертных оценок факторов

Уровень совершенства СУБ Компании представлялся как цифровой величиной (например, 5,72 на рис. 2), так и в форме принадлежности к лингвистической переменной «Уровень совершенства СУБ».

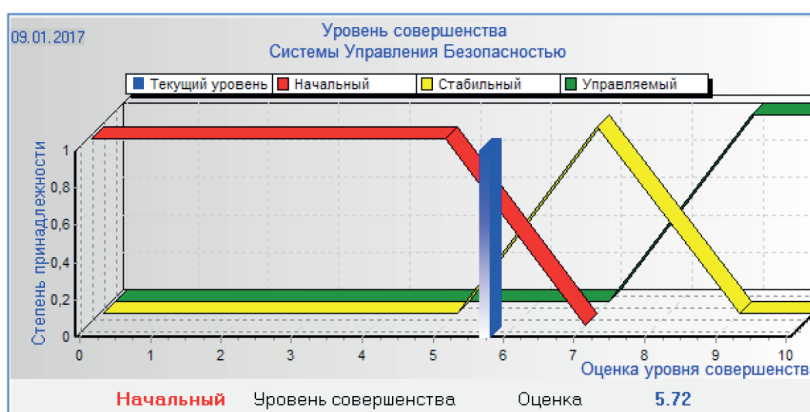


Рис. 2. Представление решения в виде нечетких множеств

В экспертной системе лингвистическая переменная «Уровень совершенства СУБ» состояла из трёх терм-множеств (нечетких переменных, или лингвистических оценок): «Начальный уровень совершенства», «Стабильный уровень совершенства» и «Управляемый уровень совершенства». На рис. 2 представлены соответствующие нечеткие множества (их функции принадлежности).

Кроме того, разработанная программа позволяет получить подробную аналитическую информацию об уровнях оценок факторов каждой из ключевых областей, рекомендации по повышению уровня совершенства СУБ и т. д.

Логическим продолжением выполненного исследования по разработке методики проведения самооценки уровня совершенства СУБ судоходных компаний и внедрению в РМРС экспертной системы является формирование концепции оценки уровня совершенства СУБ с позиций единого подхода, предусматривающего использование для представления баз данных и баз знаний формируемых экспертами *лингвистических оценок*, семантически близких к высказываниям экспертов на естественном языке.

Синтез такой концепции и ее адаптация к специфике проблем обеспечения безопасности сложных транспортных и техногенных объектов позволит задействовать практически значимый и интуитивно понятный аппарат нечетких множеств, нечетких отношений и мягкого интеллектуального моделирования.

Теоретической базой для разработки послужили как классические издания [2] – [5], так и современные актуальные исследования в области разработки экспертных и советующих систем с применением аппарата нечетких вычислений, рассуждений и логических выводов, а также мягких методов оптимизации применительно к рассматриваемым предметным и проблемным областям, связанным с обеспечением безопасности транспортно-технологических объектов [6] – [10].

1. Постановка задачи

Объектом исследования являются судоходные компании. Задача заключается в оценке уровня совершенства СУБ судоходных компаний на основе структуры факторов, определяемой экспертами. Оценки факторов и уровень их значимости формулируются в терминах лингвистических переменных. Таким образом, на основании сложно структурированных по ключевым областям лингвистических оценок отдельных факторов требуется синтезировать *сводный показатель*, который можно представить в виде обобщенной лингвистической оценки уровня совершенства СУБ компании.

Разработчиком *метода сводных показателей* по праву считается акад. А. Н. Крылов, который предложил метод построения «формулы сравнительной оценки» проектов линкоров [11] – [13]. Суть этого метода состоит в «свертке» многих оценок исследуемого объекта в одну сводную (глобальную, интегральную, обобщенную, генеральную, синтетическую) оценку, синтезирующую отдельные (локальные, дифференциальные, частные, аналитические) показатели качества объекта. С помощью метода сводных показателей можно сравнивать и оценивать качества разного рода (эффективность, надежность, предпочтительность, полезность) сложных многопараметрических систем.

2. Метод решения

Введем следующие обозначения:

U — множество судоходных компаний, для которых выполняется анализ уровня совершенства СУБ;

F — двухуровневая (плоская) структура факторов;

C — множество ключевых областей, на которые разделены факторы.

Решается проблема оценки уровня совершенства СУБ из U на двухуровневой структуре факторов F , задаваемых в виде лингвистических оценок. Все ключевые области и составляющие их факторы имеют свой лингвистический уровень значимости (вес).

2.1. Синтез исходной фактуальной базы знаний

Очевидно любому эксперту (начиная со школьного учителя) проще и предпочтительнее делать заключение о степени успешности исследуемого объекта, свойства или субъекта в виде высказывания на естественном языке типа «Хорошо», «Удовлетворительно» и т. п., т. е. в виде лингвистической оценки.

Введем лингвистическую переменную «Оценка» (рис. 3). Отдельные терм-множества лингвистической переменной «Оценка» являются нечеткими переменными (лингвистическими оценками): «Очень высокая (ОВ)», «Высокая (В)» и т. д., которые можно представить нечеткими мно-

жествами, определяемыми уникальными функциями принадлежности. В качестве таких функций принадлежности для простоты выбраны трапециевидные нечеткие числа, что не умаляет универсальности концепции построения лингвистической оценки уровня совершенства СУБ.

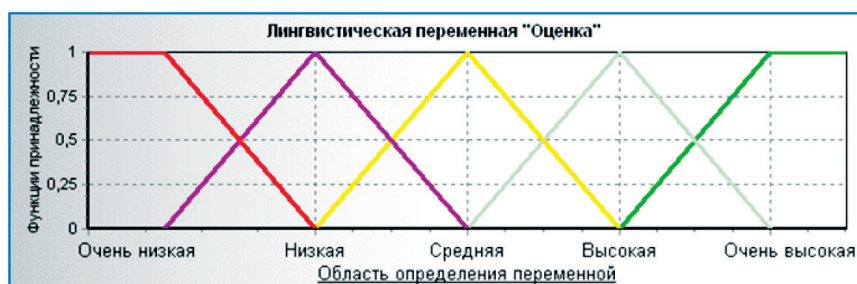


Рис. 3. Терм-множества лингвистической переменной «Оценка»

Все факторы, определяющие уровень совершенства, структурированы в виде совокупности ключевых областей, имеющих свой уровень значимости (вес). Поэтому также вводится лингвистическая переменная «Уровень значимости ключевой области» с лингвистическими оценками, представленными на рис. 4.

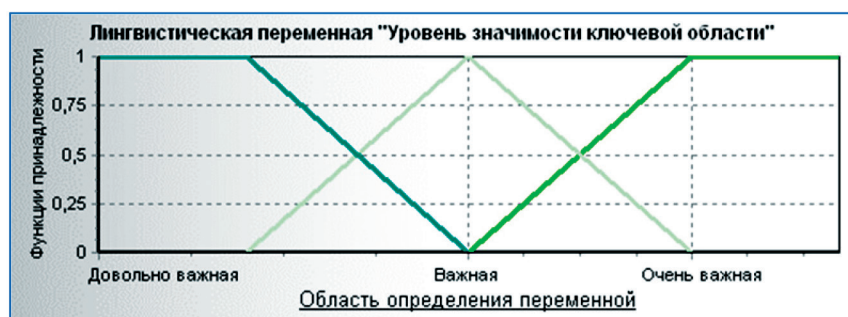


Рис. 4. Терм-множества для «Уровня значимости ключевых областей»

Каждый из факторов, входящих во все ключевые области, также обладает своим уровнем значимости (рис. 5).

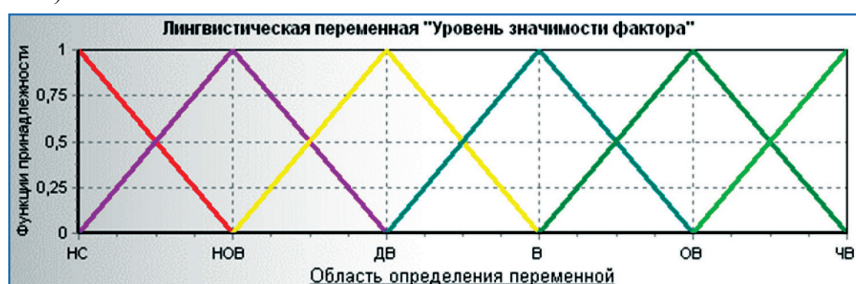


Рис. 5. Уровень значимости (веса) факторов

Условные обозначения: НС — «Несущественный»; НОВ — «Не очень важный»;
ДВ — «Довольно важный»; В — «Важный»;
ОВ — «Очень важный»; ЧВ — «Чрезвычайно важный»

Сохраняя предложенную ранее методологию решения задачи оценки уровня совершенства СУБ [1], соответствующая лингвистическая переменная синтезирована на базе трех нечетких переменных: «Начальный уровень совершенства (Н)», «Стабильный уровень совершенства (С)» и «Управляемый уровень совершенства (У)» с уникальными функциями принадлежности, представленными на рис. 6.



Рис. 6. Терм-множества переменной «Уровень совершенства СУБ»

Очевидно, что такая переменная может быть представлена в виде

$$\tilde{A} = \int_X \frac{\mu_{\tilde{A}}(x)}{x},$$

где X — область определения (универсальное множество); $\mu_{\tilde{A}}(x)$ — значения функции принадлежности ($\forall x \in X$).

2.2. Формализация базы данных

Уровни значимости ключевых областей можно представить в виде нечетких множеств $\tilde{P}$:

$$\tilde{P} = \int_C \frac{\mu_{\tilde{P}}(c)}{c}.$$

Полученное множество является двумерным, так как значения функции принадлежности $\mu_{\tilde{P}}(c)$ являются нечеткими множествами, т. е. представимы в форме

$$\tilde{P} = \int_C \frac{\int_X \frac{\mu_{\tilde{P}}(x)}{x}}{c},$$

где X — область определения.

Аналогично, уровень значимости факторов можно представить в виде

$$\tilde{W} = \int_{C \times F} \frac{\mu_{\tilde{W}}(f)}{f} = \int_{C \times F} \frac{\int_Y \frac{\mu_{\tilde{W}}(y)}{y}}{f}.$$

Оценки Компаний по факторам:

$$\tilde{Q} = \int_{F \times C \times U} \frac{\mu_{\tilde{Q}}(u)}{u} = \int_{F \times C \times U} \frac{\int_Z \frac{\mu_{\tilde{Q}}(z)}{z}}{u}.$$

Решение задачи по каждой из Компаний находится как свертка: $\tilde{D} = \tilde{P} \circ \tilde{W} \circ \tilde{Q}$, которая, очевидно, является нечетким множеством (уже не с трапециевидной функцией принадлежности).

Сравнительный анализ уровня совершенства Компаний может быть выполнен на основе величин средних значений полученных нечетких чисел из $\tilde{D}$:

$$m(\tilde{A}) = \int_0^1 \frac{a(\alpha) + b(\alpha)}{2} d\alpha,$$

где $a(\alpha)$; $b(\alpha)$ — соответственно левая и правая границы интервалов α -уровней чисел.

Окончательно множество решений представляется в виде

$$\tilde{D} = \int_U \frac{\mu_{\tilde{D}}(u)}{u}.$$

Здесь $\mu_{\tilde{D}}(u)$ — ранг Компании u на базе нечетких оценок из множества $\tilde{D}$.

Степень принадлежности Компаний к термам из $\tilde{A}$ находится как пересечение среднего значения нечетких чисел с соответствующими графиками нечетких переменных, входящих в лингвистическую переменную «Уровень совершенства СУБ».

3. Практическая реализация

Исследуется уровень совершенства СУД трех компаний: «Альфа», «Дельта», «Омега»:

$$U = (u_1 \mid u_2 \mid u_3).$$

Факторы представлены в виде структуры

$$F = (f_i^k \mid c_k)_{i=1,10}^{k=\overline{1,6}}.$$

На основании (априорных из базы знаний) экспертных заключений сформированы следующие массивы оценок:

– веса ключевых областей:

$$\tilde{P} = \left(\frac{ОВ}{c_1} \mid \frac{В}{c_2} \mid \frac{ДВ}{c_3} \mid \frac{В}{c_4} \mid \frac{В}{c_5} \mid \frac{В}{c_6} \right) =$$

$$= \left(\frac{(0,5;0,8;1)}{c_1} \mid \frac{(0,2;0,5;0,8)}{c_2} \mid \frac{(0;0;0,2;0,5)}{c_3} \mid \frac{(0,2;0,5;0,5;0,8)}{c_4} \mid \frac{(0,2;0,5;0,5;0,8)}{c_5} \mid \frac{(0,2;0,5;0,5;0,8)}{c_6} \right);$$

– веса факторов по ключевым областям:

$$\tilde{W} = \left(\begin{array}{c|cccccccccccc} c_1 & В & ДВ & НОВ & ДВ & НОВ & В & ДВ & НОВ & ДВ & ЧВ \\ c_2 & В & НОВ & В & НОВ & В & ДВ & ОВ & В & В & В \\ c_3 & ЧВ & НОВ & НС & ДВ & НОВ & ДВ & ОВ & НС & ДВ & ОВ \\ c_4 & В & ДВ & ОВ & ДВ & НОВ & В & ДВ & ДВ & ДВ & ДВ \\ c_5 & НОВ & В & В & НОВ & ДВ & ДВ & ОВ & В & НОВ & ДВ \\ c_6 & В & ДВ & НОВ & ДВ & НОВ & В & ЧВ & НОВ & ДВ & В \\ \hline \ddots & f_1 & f_2 & f_3 & f_4 & f_5 & f_6 & f_7 & f_8 & f_9 & f_{10} \end{array} \right).$$

База данных (оценки по каждой Компании):

$$\tilde{Q} = \left(\begin{array}{c|cccccccccccc} c_1 & С & ОН & ОН & ОН & ОН & С & ОН & ОН & ОН & ОН \\ c_2 & ОН & Н & ОН & ОН & Н & Н & Н & ОН & ОН & С \\ c_3 & ОН & Н & ОН & ОН & ОН & ОН & Н & С & Н & ОН \\ c_4 & ОН & Н & ОН & ОН & Н & Н & ОН & Н & ОН & Н \\ c_5 & ОН & Н & ОН & Н & ОН & ОН & С & ОН & С & ОН \\ c_6 & Н & ОН & ОН & С & Н & ОН & ОН & ОН & Н & ОН \\ \hline \ddots & f_1 & f_2 & f_3 & f_4 & f_5 & f_6 & f_7 & f_8 & f_9 & f_{10} \end{array} \right) u_1 \oplus$$

$$\oplus \left(\begin{array}{c|cccccccccccc} c_1 & ОВ & ОВ & С & ОВ & С & ОВ & ОВ & С & ОВ & С \\ c_2 & С & В & В & С & В & Н & В & В & С & В \\ c_3 & С & В & В & С & С & В & С & В & С & С \\ c_4 & В & ОВ & С & ОВ & С & В & С & С & ОВ & С \\ c_5 & ОВ & В & ОВ & В & ОВ & ОВ & В & ОВ & В & Н \\ c_6 & С & В & В & С & В & С & В & В & С & В \\ \hline \ddots & f_1 & f_2 & f_3 & f_4 & f_5 & f_6 & f_7 & f_8 & f_9 & f_{10} \end{array} \right) u_2 \oplus$$

$$\oplus \left(\begin{array}{c|cccccccccc} c_1 & \text{ОВ} & \text{С} & \text{Н} & \text{С} & \text{Н} & \text{В} & \text{С} & \text{Н} & \text{С} & \text{Н} \\ c_2 & \text{Н} & \text{ОН} & \text{Н} & \text{Н} & \text{ОН} & \text{Н} & \text{ОН} & \text{Н} & \text{Н} & \text{Н} \\ c_3 & \text{Н} & \text{ОН} & \text{С} & \text{ОН} & \text{С} & \text{Н} & \text{ОН} & \text{С} & \text{ОН} & \text{Н} \\ c_4 & \text{В} & \text{С} & \text{Н} & \text{Н} & \text{С} & \text{В} & \text{Н} & \text{Н} & \text{В} & \text{С} \\ c_5 & \text{Н} & \text{Н} & \text{Н} & \text{Н} & \text{Н} & \text{Н} & \text{Н} & \text{Н} & \text{Н} & \text{Н} \\ c_6 & \text{Н} & \text{ОН} & \text{Н} & \text{Н} & \text{ОН} & \text{Н} & \text{ОН} & \text{Н} & \text{Н} & \text{ОН} \\ \hline \cdot & f_1 & f_2 & f_3 & f_4 & f_5 & f_6 & f_7 & f_8 & f_9 & f_{10} \end{array} \right) u_3.$$

Исходные данные в задаче являются значениями соответствующих нечетких переменных, т. е. трапециевидные числа, поэтому и решение (их двухуровневая свертка) также представляет собой совокупность нечетких чисел (рис. 7).

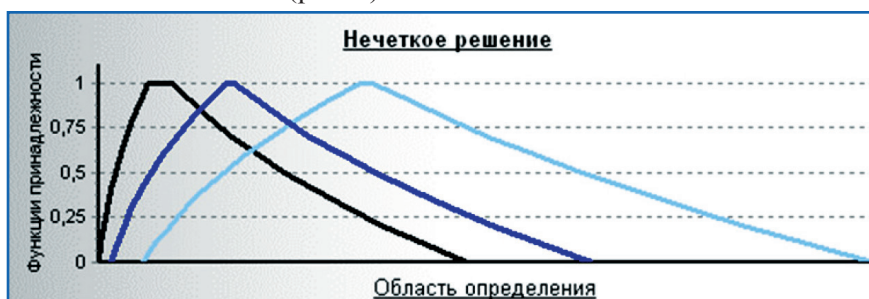


Рис. 7. Итоговые нечеткие оценки уровней совершенства

Сравнение Компаний по уровню совершенства СУБ представлено на рис. 8.



Рис. 8. Сравнение (ранжирование) Компаний

В данном случае

$$\tilde{D} = \left(\begin{array}{ccc} \boxed{0,35} & \boxed{1,00} & \boxed{0,57} \\ u_1 & u_2 & u_3 \end{array} \right).$$

На рис. 9 представлены степени принадлежности каждого из проектов нечетким множествам из $\tilde{A}$. Элементами построенных нечетких множеств $\tilde{A}_i$ ($i = \overline{1,3}$) являются нечеткие множества (получены нечеткие множества второго уровня).

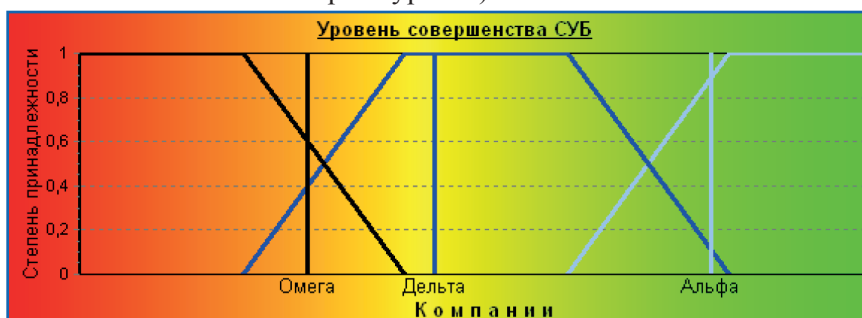


Рис. 9. Уровни совершенства СУБ

Например, для Компании «Омега»

$$\tilde{A}_1 = \left(\frac{0,6}{H} \quad \frac{0,4}{C} \right),$$

т. е. степень принадлежности уровня совершенства СУБ Компании «Омега» множеству «Начальный уровень совершенства» составляет 0,6, а множеству «Стабильный уровень совершенства» — 0,4.

Выводы

1. Предложенная концепция использования лингвистических переменных, основанная на использовании экспертных нечетких оценках факторов и ключевых областей обеспечения безопасности, позволяет упростить решение проблемы оценки уровня совершенства СУБ судоходных компаний. Разработанная методология позволяет производить многоуровневую свертку лингвистических оценок для получения обобщенного нечеткого показателя уровня совершенства.

2. Выполненная практическая апробация представленного теоретического и методического материала позволяет сделать вывод о целесообразности использования разработанной методики, что позволит повысить значимость использования экспертных заключений в виде нечетких чисел, семантически близких высказываниям на естественном языке.

3. Исходная формализация базы знаний может быть выполнена, например, на основании метода парных сравнений по шкале Саати [5], [6], [8] путем ее приведения к лингвистическим высказываниям.

4. Перспективные исследования направлены на использование в экспертных системах по обеспечению безопасности мореплавания нечеткого логического вывода и аппарата решения оптимизационных задач на базе мягких вычислений.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Sazonov A. E.* Expert system for evaluation of shipping company's SMS perfection level/ A. E. Sazonov, V. D. Klimenko, G. S. Osipov, A. A. Zakharov // Information on Ships: International symposium ISIS September 21 – 22, 2006. — Hamburg, Germany, 2006. — 12 p.
2. *Ротштейн А. П.* Нечеткий многокритериальный анализ вариантов с применением парных сравнений / А. П. Ротштейн, С. Д. Штовба // Известия Российской академии наук. Теория и системы управления. — 2001. — № 3. — С. 150.
3. *Беллман Р.* Принятие решений в расплывчатых условиях / Р. Беллман, Л. Заде // Вопросы анализа и принятия решений. — М.: Мир, 1976. — 46 с.
4. *Фишберн П.* Теория полезности для принятия решений / П. Фишберн. — М.: Наука, 1978. — 352 с.
5. *Саати Т. Л.* Взаимодействие в иерархических системах / Т. Л. Саати // Техническая кибернетика. — 1979. — № 1. — С. 68–84.
6. *Сазонов А. Е.* Использование метода экспертных отношений предпочтения для оценки уровня совершенства системы управления безопасностью морского судна / А. Е. Сазонов, Г. С. Осипов, В. Д. Клименко // Вестник Государственного университета морского и речного флота имени адмирала С. О. Макарова. — 2013. — № 3(19). — С. 94–104.
7. *Айзинов С. Д.* Использование теории нечетких множеств для оценки эффективности тренажеров / С. Д. Айзинов, В. Д. Клименко, Г. С. Осипов, А. Е. Сазонов // Эксплуатация морского транспорта. — 2007. — № 2. — С. 31–33.
8. *Осипов Г. С.* Нечеткий рейтинг акций морских пароходств / Г. С. Осипов, Е. И. Распутин // Эксплуатация морского транспорта. — 2007. — № 2. — С. 10–13.
9. *Осипов Г. С.* Нечеткая экспертная система оценки уровня безопасности судоходных компаний / Г. С. Осипов, А. Е. Сазонов // European research. — 2016. — № 3 (14). — С. 10–11. DOI: 10.20861/2410-2873-2016-14-002.
10. *Osipov G. S.* Multi-criteria analysis of systems at fuzzy criteria / G. S. Osipov // Austrian Journal of Technical and Natural Sciences. — 2016. — № 3–4. — Pp. 82–84. DOI: 10.20534/AJT-16-3.4-82-84.
11. *Крылов А. Н.* Собр. тр. / А. Н. Крылов. — М.-Л., 1951. — 551 с. — Т. I. — Ч. I.

12. Соломенко Н. С. Академик Алексей Николаевич Крылов — выдающийся математик, механик и кораблестроитель // Вестник Академии наук СССР. — 1988. — Т. 58. — № 12. — С. 70–79.
13. Осипов Г. С. «Свертка» показателей деятельности судоходных компаний / Г. С. Осипов // Эксплуатация морского транспорта. — 2007. — № 2. — С. 33–36.

REFERENCES

1. Sazonov, A. E., V. D. Klimenko, G. S. Osipov, and A. A. Zakharov. "Expert system for evaluation of shipping company's SMS perfection level." *Information on Ships: International symposium ISIS September 21-22, 2006*. Hamburg, Germany, 2006.
2. Rotshtein, A. P., and S. D. Shtovba. "Nechetkii mnogokriterial'nyi analiz variantov s primeneniem parnykh sravnenii." *Izvestiya Rossiiskoi akademii nauk. Teoriya i sistemy upravleniya* 3 (2001): 150.
3. Bellman, R., and L. Zade. "Prinyatie reshenii v rasplyvchatykh usloviyakh." *Voprosy analiza i prinyatiya reshenii*. M.: Mir, 1976.
4. Fishbern, P. *Teoriya poleznosti dlya prinyatiya reshenii*. M.: Nauka, 1978.
5. Saati, T. L. "Vzaimodeistvie v ierarkhicheskikh sistemakh." *Tekhnicheskaya kibernetika* 1 (1979): 68–84.
6. Sazonov, A. E., G. S. Osipov, and V. D. Klimenko. "Using expert preference relations to assess the perfection level of ships safety management system." *Vestnik Gosudarstvennogo universiteta morskogo i rechnogo flota imeni admirala S. O. Makarova* 3(19) (2013): 94–104.
7. Aizinov, S. D., V. D. Klimenko, G. S. Osipov, and A. E. Sazonov. "Ispol'zovanie teorii nechetkikh mnozhestv dlya otsenki effektivnosti trenazherov." *Ekspluatatsiya morskogo transporta* 2 (2007): 31–32.
8. Osipov, G. S., and E. I. Rasputina. "Nechetkii reiting aktsii morskikh parokhodstv." *Ekspluatatsiya morskogo transporta* 2 (2007): 10–13.
9. Osipov, Gennadiy Sergeevich, and Anatoliy Efimovich Sazonov. "Fuzzy expert system of shipping companies safety assessment." *European research* 3(14) (2016): C. 10–11. DOI: 10.20861/2410-2873-2016-14-002
10. Osipov, G. S. "Multi-criteria analysis of systems at fuzzy criteria." *Austrian Journal of Technical and Natural Sciences* 3–4 (2016): 82–84. DOI: 10.20534/AJT-16-3-4-82-84.
11. Krylov, A. N. *Sobr. tr.* Vol. I. Part I. M.; L., 1951.
12. Solomenko, N. S. "Akademik Aleksei Nikolaevich Krylov – vydayushchiysya matematik, mekhanik i korablestroitel'." *Herald of the Russian Academy of Sciences* 58.12 (1988): 70–79.
13. Osipov, G. S. "«Svertka» pokazatelei deyatelnosti sudokhodnykh kompanii." *Ekspluatatsiya morskogo transporta* 2 (2007): 33–36.

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

Сазонов Анатолий Ефимович —
доктор технических наук,
член-корреспондент РАН, профессор
ФГБОУ ВО «ГУМРФ имени
адмирала С. О. Макарова»
198035, Российская Федерация, Санкт-Петербург,
ул. Двинская, 5/7
e-mail: sazonst@yandex.ru, kaf_avt@gumrf.ru

Осипов Геннадий Сергеевич —
доктор технических наук
ФГБОУ ВО «ГУМРФ имени
адмирала С. О. Макарова»
198035, Российская Федерация, Санкт-Петербург,
ул. Двинская, 5/7
e-mail: GSOsipov@mail.ru

INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Sazonov, Anatoly E. —
Dr. of Technical Sciences, Corresponding Member
of the Russian Academy of Sciences, professor
Admiral Makarov State University
of Maritime and Inland Shipping
5/7 Dvinskaya Str., St. Petersburg, 198035, Russian
Federation
e-mail: sazonst@yandex.ru, kaf_avt@gumrf.ru

Osipov, Gennady S. —
Dr. of Technical Sciences
Admiral Makarov State University
of Maritime and Inland Shipping
5/7 Dvinskaya Str., St. Petersburg, 198035, Russian
Federation
e-mail: GSOsipov@mail.ru

Статья поступила в редакцию 9 января 2017 г.

Received: January 9, 2017.

DOI: 10.21821/2309-5180-2017-9-1-17-26

RECOMMENDATIONS FOR EMERGENCY RESPONSE IN ICE CONDITIONS OF NAVIGATION

A. A. Ershov, P. I. Petuhov

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

The article discusses ways of implementing the requirements of the International polar code, which entered into force on 1 January 2017, one of the main requirements to the requirements of the International polar code is a Polar Ship Certificate, to which each ship should be developed Polar Water Operational Manual (PWOM). When creating this document, it is necessary to develop recommendations on cooperation of specific court-emergency services for trauma in conditions of ice navigation. In this article the development of these recommendations it is proposed to use methods of deliberate creation the hitch ships with emergency ships and other rescue vessels to improve its stability, conducting reparation works, rescue of passengers and crew on the transition from emergency vessel to other ships. The proposed methods intentional create the hitch ships can be used on all ships of ice navigation in polar waters, thereby fulfilling two main objectives: fast, self-straightening of the vessel and prevent further water penetration through hole, as well as reduce the likelihood of environmental pollution in the process of this activity is to prevent or reduce the likelihood of water entry of polluted substances from the hull. Based on the results of the calculations proposed in this work, the conclusion about the effectiveness of creating variants of hitch ships of the vessels with emergency ships and the possibility of using these techniques in existing and future ships of ice navigation. It is shown that the use of different types of capture vessels after injury in ice conditions will allow us to meet the requirements of the International Polar Code. The article of the shown that the methods of straightening of the ship with the extraction holes from the water and the subsequent creation of various hitch ships can be used to develop practical recommendations for ships of various types sailing in different ice conditions. They can be offered to the global Maritime community as the primary method for solving problems of the struggle for survival in ice conditions, especially the interaction of the ship with the emergency services, to develop recommendations for various types of vessels and convoys, training of navigators to sail in ice conditions.

Keywords: International Polar code, ice-class vessels, ships, interaction with emergency services.

For citation:

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.

УДК 655.62.052.4

РЕКОМЕНДАЦИИ ПО ДЕЙСТВИЯМ В ЧРЕЗВЫЧАЙНЫХ СИТУАЦИЯХ В ЛЕДОВЫХ УСЛОВИЯХ ПЛАВАНИЯ

А. А. Ершов, П. И. Петухов

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

В статье рассматриваются способы реализации требований Международного полярного кодекса, который вступил в силу с 1 января 2017 г. Ключевым требованием для выполнения требований Международного полярного кодекса является Свидетельство судна полярного плавания, для получения которого для каждого судна должны быть разработаны Наставления по эксплуатации судов в полярных водах. При создании данного документа необходимо разработать рекомендации по взаимодействию конкретного судна со службами спасения при получении им повреждений в условиях ледового плавания. В настоящей статье для разработки данных рекомендаций предлагается использовать методы намеренного создания сцепки спасательных и иных судов с аварийным судном для повышения его остойчивости, проведения ремонтных работ, спасения пассажиров и экипажа путем пересадки с аварийного на другие суда. Предложенные в статье методы намеренного создания сцепки судов позволяют использовать их на всех судах, осущест-

являющих ледовое плавание в полярных водах, обеспечивая тем самым выполнение двух важнейших задач: быстрое, самостоятельное спрямление судна и предотвращение дальнейшего поступления воды через пробоину, а также снижение вероятности экологического загрязнения в процессе проведения этих мероприятий за счет предотвращения или снижения вероятности поступления в воду загрязненных веществ из корпуса судна. На основании результатов расчетов, предложенных в настоящей работе, сделан вывод об эффективности создания различных вариантов намеренной сцепки судов с аварийным судном, а также подтверждена возможность использования данных методов на существующих и перспективных судах ледового плавания. Показано, что применение различных вариантов сцепки судов после получения повреждений в ледовых условиях позволит выполнить требования Международного полярного кодекса. В статье показано, что методы спрямления судна с извлечением пробоины из воды и последующего создания различных вариантов сцепки судов могут быть использованы для разработки практических рекомендаций для судов разных типов, плавающих в различных ледовых условиях. Эти варианты могут быть предложены мировому морскому сообществу как основной метод для решения вопросов борьбы за живучесть в условиях ледового плавания по взаимодействию конкретного судна со службами спасения, разработке рекомендаций для судов различных типов и конструкций, а также при подготовке судоводителей к плаванию в конкретных ледовых условиях.

Ключевые слова: Международный полярный кодекс, ледовое плавание судов, взаимодействие судна со службами спасения.

Для цитирования:

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.

Введение

В настоящее время безопасность плавания в полярных водах регулируется основными конвенциями в этой области: Международной конвенцией по охране человеческой жизни на море 1974 года (СОЛАС-74), Международной конвенцией о подготовке и дипломировании моряков и несении вахты 1978 года (ПДНВ-78), Международной конвенцией о грузовой марке и др., а аспекты предотвращения загрязнения — Международной конвенцией МАРПОЛ 73/78 и Международной конвенцией о контроле за вредными противообрастающими системами на судах. Ожидается вступление в силу Международной конвенции о контроле судовых балластных вод и осадков и управлении ими.

С 1 января 2017 г. международное судоходство, в дополнение к указанным конвенциям, должно отвечать требованиям Международного кодекса для судов, эксплуатирующихся в полярных водах (МПК) [1], являющегося обязательным документом в соответствии с конвенциями СОЛАС - 74 и МАРПОЛ 73/78 [2] – [4]. Требования МПК к безопасности не распространяются на суда, совершающие рейсы между портами только Российской Федерации, такие суда являются предметом Кодекса торгового мореплавания РФ и иных применимых отечественных нормативно-правовых документов.

Плавание судов в акватории Северного морского пути (СМП) регулируется «Правилами плавания», введенными Приказом Минтранса России от 17.01.2013 г. № 7 [5]. Применение данного приказа предусматривает предоставление разрешения на плавание в акватории СМП на основании заявок, подтверждающих техническую подготовку судна к плаванию, готовность экипажа и характер перевозимого груза.

С вводом в действие МПК в состав внесенных в заявку документов в общем случае следует включить Свидетельство судна полярного плавания и Наставления по эксплуатации судов в полярных водах (НЭПВ), на основании которых Администрация СМП будет выносить решения о выдаче или отклонении разрешений на плавание в акватории СМП. Кроме того, наличие на судне и содержание НЭПВ будет проверяться службами портового контроля, которые будут контролировать соответствие НЭПВ требованиям МПК.

Реализация требований МПК, включая разработку НЭПВ, означает переход к новым процедурам обеспечения безопасности и предотвращения загрязнения в полярных водах, предписываемым МПК [1].

Основная часть

В МПК имеется инструкция о разработке НЭПВ, в которую включено подробное изложение требований к различным разделам, составляющим его содержание. Так, разд. 3.1 «Реагирование на чрезвычайную ситуацию на судне» и разд. 3.2 «Спасение имущества / грузов» гл. 3 «Взаимодействие со службами поиска и спасания» [1, с. 60] содержат следующие рекомендации: *«НЭПВ должно включать процедуры, которым надлежит следовать при подготовке к рейсу, и в случае происшествий».*

Таким образом, меры, предусматриваемые НЭПВ, должны включать процедуры, которые необходимо рассматривать как при подготовке к рейсу, так и в случае чрезвычайной ситуации. При этом характер чрезвычайной ситуации может быть различным, но обязательно требующим спасения имущества и грузов, что наиболее вероятно при угрозе затопления судна. При этом характер предусмотренных действий и процедуры по подготовке к ним МПК оставляет в сфере ответственности компании-судовладельца, однако он должен включать в себя взаимодействие со службами поиска и спасания. В качестве иллюстрации отсутствия этого взаимодействия, приведшей к гибели судна, может служить авария лайнера «Эксплорер», произошедшая в Антарктиде в 2007 г. Эта катастрофа, которая явилась толчком к принятию МПК, происходила в непосредственной близости от других судов, прибывших к месту аварии и выполняющих спасательные операции по приему на свой борт пассажиров и экипажа с «Эксплорера», до этого уже находившихся на спасательных шлюпках и плотках (рис. 1).



Рис. 1. Лайнер «Эксплорер» после ледового повреждения, наблюдаемый с других судов

Лайнер «Эксплорер» затонул почти через двое суток в непосредственной близости от судов, пришедших ему на помощь (рис. 2).



Рис. 2. Гибель лайнера «Эксплорер»

Отсутствие взаимодействия с другими судами явилось одной из причин гибели «Эксплорера», что впоследствии привело к принятию МПК международным морским сообществом. Впервые теоретические основы такого взаимодействия между судами были исследованы в работе [6] и относились к минимизации опасных последствий столкновений судов. Заложенные в этой работе принципы могут быть применены в случае ледовых аварий.

Теоретические основы для разработки информации (заполнения) данного раздела НЭПВ могут быть сформулированы следующим образом: *поддержание остойчивости аварийного судна при аварии в полярных водах и наличии поблизости других судов и / или судов спасателей может быть осуществлено путем создания жесткой (при помощи специальных сцепных устройств) или гибкой (с использованием швартовных тросов) сцепки с аварийным судном по рассмотренным далее схемам.*

Схема 1. Создание сцепки под углом 90° по отношению к поврежденному в ледовых условиях (аварийному) судну 1. Для создания сцепки под углом 90° спасательное или иное судно 2 подходит к поврежденному борту аварийного судна и упирается в него своей носовой частью (носом), после чего швартуется к аварийному судну, создавая условия для жесткой или гибкой сцепки (рис. 3). В этом случае появляется возможность увеличить остойчивость аварийного судна и создать условия для пересадки пассажиров и членов экипажа аварийного судна 1 на спасательное (поддерживающее) судно 2, минуя водную или ледовую стадию пересадки.

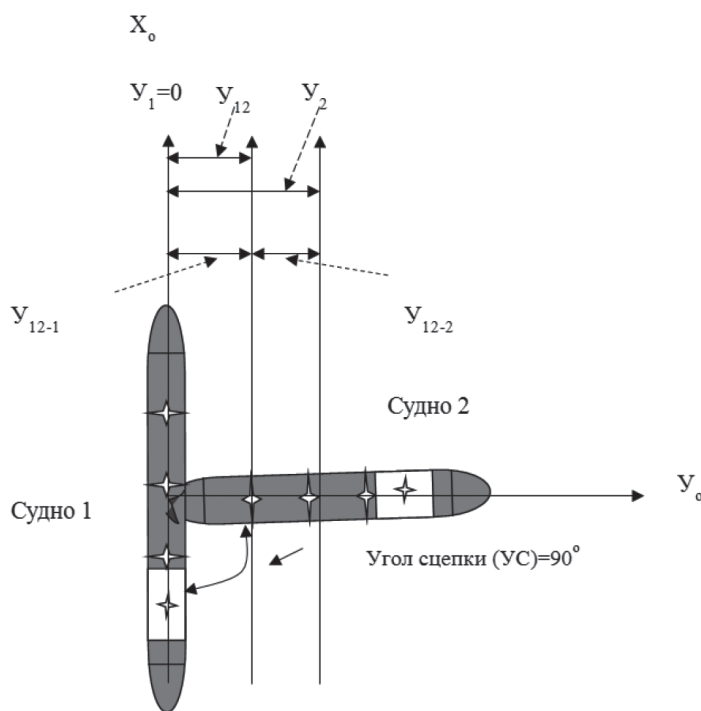


Рис. 3. Создание сцепки судов под углом 90°

Основные параметры водоизмещения и остойчивости обоих судов в этом случае могут быть получены по методике [6]. В качестве одного из показателей остойчивости жестко сцепленных судов можно использовать величину поперечного метацентрического радиуса общей сцепки судов, сопоставляя его величину с величиной поперечного метацентрического радиуса аварийного судна до ледовой аварии.

С этой целью расположим оси X_0 , Y_0 сцепки судов таким образом, чтобы они совпадали с осями X , Y аварийного судна 1 (на рис. 3 слева). Определим отстояние центра тяжести площади ватерлинии сцепки судов от оси X_0 (определим расстояние Y_{12}). Согласно теореме Эйлера

$$Y_{12} = (Y_1 S_1 + Y_2 S_2) / (S_1 + S_2), \quad (1)$$

где Y_1 — отстояние от оси X_0 ЦТ площади ватерлинии судна 1, м; Y_2 — отстояние от оси X_0 ЦТ площади ватерлинии судна 2, м; S_1 — площадь ватерлинии судна 1, м; S_2 — площадь ватерлинии судна 2.

Поперечный метацентрический радиус сцепки судов после столкновения может быть определен, согласно [6], в виде

$$r_{12} = (J_{x1} + S_1 Y_{12-1}^2 + J_{y2} + S_2 Y_{12-2}^2) / (V_1 + V_2), \quad (2)$$

где r_{12} — поперечный метацентрический радиус сцепки судов, м; J_{x1} — момент инерции площади ватерлинии судна 1 относительно собственной оси X , м⁴; J_{y2} — момент инерции площади ватерлинии судна 2 относительно собственной оси Y , м⁴; Y_{12-1} — отстояние ЦТ площади ватерлинии сцепки судов от оси X судна 1 (см. рис. 3), м; Y_{12-2} — отстояние ЦТ площади ватерлинии сцепки судов от оси Y судна 2 (см. рис. 3), м; V_1 — объемное водоизмещение судна 1, м³; V_2 — объемное водоизмещение судна 2, м³.

При рассмотрении в качестве основного показателя остойчивости начальной метацентрической высоты расчет остойчивости сцепленных судов [7] может производиться в соответствии со следующим выражением:

$$h_{12} = z_c + r_{12} - z_g, \quad (3)$$

где h_{12} — начальная метацентрическая высота сцепленных судов, м; z_c — аппликата центра величины сцепленных судов, м; z_g — аппликата центра тяжести сцепленных после столкновения судов, м.

Схема 2. Создание сцепки под углом 0° по отношению к поврежденному в ледовых условиях (аварийному) судну 1. Для создания сцепки под углом 0 градусов спасательное или иное судно 2 подходит к поврежденному борту аварийного судна своим бортом, после чего швартуется к аварийному судну бортом, создавая условия для жесткой или гибкой сцепки (рис. 4). В этом случае появляется возможность увеличить остойчивость аварийного судна и создать условия для пересадки пассажиров и членов экипажа аварийного судна 1 на спасательное (поддерживающее) судно 2, минуя водную или ледовую стадию пересадки. Очевидно, что при данной схеме условия пересадки людей с судна 1 на судно 2 могут быть организованы с большей эффективностью, чем при схеме, приведенной на рис. 3.

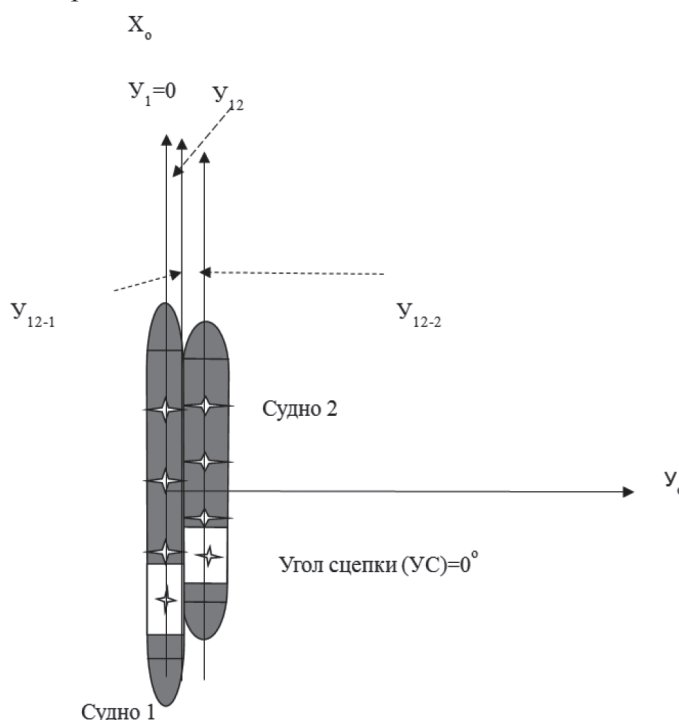


Рис. 4. Создание сцепки судов под углом 0°

Величина Y_{12} при расположении судов лагом может быть определена в соответствии с выражением (1), а поперечный метацентрический радиус сцепки судов после столкновения может быть рассчитан по следующей зависимости:

$$r = (J_{x1} + S_1 Y_{12-1}^2 + J_{x2} + S_2 Y_{12-2}^2) / (V_1 + V_2), \quad (4)$$

где J_{x2} — момент инерции площади ватерлинии судна 2 относительно собственной оси X , m^4 .

Величины Y_{12-1} и Y_{12-2} , входящие в выражение (4), определяются в соответствии с рис. 4.

Схема 3. Суда после столкновения расположены под углом 90° друг к другу и не представляют абсолютно жесткую сцепку, они взаимодействуют только через передачу восстанавливающих и кренящих моментов. Эта ситуация может возникнуть в том случае, когда ледовые условия не позволяют обеспечить эффективную швартовку и создать жесткую сцепку судов.

Количественно дополнительный восстанавливающий момент может иметь различные величины в зависимости от положения судов после столкновения и действий капитана поддерживающего судна. Выполним расчет минимального значения дополнительного восстанавливающего момента при отсутствии жесткой сцепки поддерживающего судна под углом 90° к аварийному судну после столкновения (рис. 5).

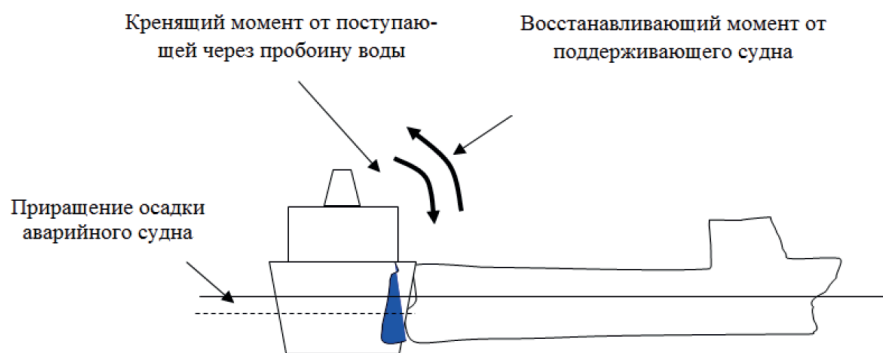


Рис. 5. Возникновение дополнительного восстанавливающего момента при отсутствии жесткой сцепки

Для аварийного судна изменение его поперечной метацентрической высоты в результате поступления воды через пробоину до полного затопления помещения может быть рассчитано по следующей формуле [7]:

$$\delta h_a = (m_a / (\Delta_a + m_a)) (d_a + \delta d_a / 2 - z_a + h_a) - \rho i x_a / (\Delta_a + m_a), \quad (5)$$

где δh_a — приращение поперечной метацентрической высоты аварийного судна, м; m_a — масса воды, поступившей через пробоину аварийного судна, т; Δ_a — водоизмещение аварийного судна, т; d_a — средняя осадка аварийного судна до ледового повреждения, м; δd_a — приращение средней осадки аварийного судна после ледового повреждения в результате поступления забортной воды, м; z_a — положение центра тяжести поступившей воды в корпус аварийного судна по вертикальной оси, м; h_a — поперечная метацентрическая высота аварийного судна до повреждения, м; $i x_a$ — момент инерции площади свободной поверхности отсека, в который поступает вода на аварийном судне, m^4 .

В том случае, если вода поступает в несколько помещений аварийного судна, приращение его поперечной метацентрической высоты может быть рассчитано следующим образом:

$$\delta h_a = \sum \delta h_{ai}, \quad (6)$$

где δh_{ai} — приращение поперечной метацентрической высоты аварийного судна в результате поступления воды в i -е судовое помещение, м.

Поперечная метацентрическая высота аварийного судна после начала поступления воды через пробоину может быть получена следующим образом:

$$hl_a = h_a + \delta h_a, \quad (7)$$

где hl_a — поперечная метацентрическая высота аварийного судна после начала поступления воды через пробоину, м.

Поперечный восстанавливающий момент аварийного судна может быть получен как

$$M_{в.а} = P_a hl_a \sin \theta_a, \quad (8)$$

где $M_{в.а}$ — поперечный восстанавливающий момент аварийного судна после начала поступления воды через пробоину, кН·м; P_a — весовое водоизмещение аварийного судна после начала поступления воды через пробоину, кН; θ_a — угол крена аварийного судна, град.

Продольный восстанавливающий момент поддерживающего судна может быть получен в виде

$$M_{в.п} = P_{п} H_{п} \sin \psi_{п}, \quad (9)$$

где $M_{в.п}$ — продольный восстанавливающий момент поддерживающего судна, кН·м; $P_{п}$ — весовое водоизмещение поддерживающего судна, кН; $H_{п}$ — продольная метацентрическая высота поддерживающего судна, м; $\psi_{п}$ — угол дифферента поддерживающего судна, град.

Под углом дифферента будем понимать приращение угла дифферента по сравнению с тем, который был у судна в соответствии с его конструкцией и первоначальной загрузкой.

Суммарный восстанавливающий момент на аварийном судне при расположении поддерживающего судна под углом 90° (рис. 5) может быть определен в виде

$$M_{в\Sigma а} = M_{в.а} + M_{в.п} = P_a hl_a \sin \theta_a + P_{п} H_{п} \sin \psi_{п}. \quad (10)$$

Для обеспечения жесткой сцепки аварийного и поддерживающего судна может быть использована работа гребного винта поддерживающего судна на упор в сторону аварийного судна [6]. В этом случае на корпусе аварийного судна возникает дополнительный восстанавливающий момент. Величина дополнительного восстанавливающего момента от работы гребного винта «сцепленного» после столкновения поддерживающего судна может быть определена по формуле

$$M_{в.ГВп} = Pe(z_{pe} - z_r) \cos \theta, \quad (11)$$

где Pe — тяга гребного винта поддерживающего судна, кН; z_{pe} — точка приложения силы от работы гребного винта поддерживающего судна на корпусе аварийного судна, м; z_r — координата равнодействующей приложения гидродинамических сил на корпусе аварийного судна, м; θ_a — угол крена аварийного судна, град.

Суммарный восстанавливающий момент на аварийном судне при расположении поддерживающего судна под углом 90° и работы его гребного винта на упор в сторону аварийного судна может быть определен в виде

$$M_{в\Sigma а} = M_{в.а} + M_{в.п} + M_{в.ГВп} \quad (12)$$

или

$$M_{в\Sigma а} = P_a hl_a \sin \theta_a + P_{п} H_{п} \sin \psi_{п} + Pe(z_{pe} - z_r) \cos \theta. \quad (13)$$

В том случае, когда для поддержания устойчивости аварийного судна используются другие суда, которые также находятся в сцепке с аварийным судном, расположены под углом 90° и работают на упор в сторону аварийного судна, суммарный восстанавливающий момент на аварийном судне определяется по формуле

$$M_{в\Sigma а} = P_a hl_a \sin \theta_a + P_{п} H_{п} \sin \psi_{п} + Pe(z_{pe} - z_r) \cos \theta + \sum (P_{ni} H_{ni} \sin \psi_{ni} + Pe_i(z_{pei} - z_r) \cos \theta), \quad (14)$$

где $\sum (P_{ni} H_{ni} \sin \psi_{ni} + Pe_i(z_{pei} - z_r) \cos \theta)$ — суммарная величина дополнительных восстанавливающих моментов поддерживающих судов, кН·м.

Расчеты по уравнениям (1) – (14) показывают, что все варианты сцепки судов имеют свои преимущества в различных вариантах ледовых повреждений аварийного судна в полярных водах.

Вариант сцепки 1 позволяет подойти к поврежденному судну носом в условиях ограничения водного пространства в ледовых условиях, совершить сцепку под углом 90° практически в любом месте борта поврежденного судна, создать совместно с корпусом аварийного судна максимально устойчивую конструкцию, которая позволит осуществлять долговременную безопасную спасательную операцию, обеспечить спасение пассажиров и экипажа, спасение имущества и самого аварийного судна, минуя водную и ледовую стадию спасения.

Вариант сцепки 2 может применяться при наличии достаточного свободного от ледяного покрова пространства, позволяет использовать для сцепки все штатные швартовные устройства обоих судов, облегчает пересадку большого количества пассажиров и экипажа, что прежде всего актуально для спасения пассажирского судна в ледовых условиях.

Вариант сцепки 3 позволяет оперативно использовать несколько судов для спасения аварийного судна, что было бы актуально при гибели «Эксплорера», и кроме того, предложенный вариант может использоваться для буксировки аварийного судна в безопасное место [6].

Как показывают расчеты, наиболее эффективным способом обеспечения безопасности в чрезвычайных ситуациях, связанных с повреждением корпуса в ледовых условиях, является комбинация действий, связанных с перекачкой жидкости и извлечением пробоины аварийного судна из воды [8], а также последующей сцепкой судов с аварийным судном, как это предлагается в настоящей статье. Эти мероприятия позволяют долговременно и эффективно обеспечивать проведение операций, связанных с ремонтом судна, а также эвакуацией пассажиров и экипажа аварийного судна, минуя водную и / или ледовую стадию спасения, что может стать наиболее быстрым и безопасным способом спасения людей при авариях в ледовых условиях.

В работе [8] показано, что для этой операции потребуется совсем немного времени, но опасность затопления судна и экологического загрязнения будет ликвидирована согласно существующим требованиям Международного полярного кодекса [1]. Опыт произошедших аварий и способов их предотвращения, рассмотренный в работах [9] – [11], подтверждает возможность применения указанных методов в ледовых условиях.

Таким образом, на основании материалов настоящей статьи для каждого типа судна могут быть подобраны необходимые мероприятия, осуществляемые в чрезвычайных ситуациях, по взаимодействию со спасательными и другими судами в соответствии с требованиями к НЭПВ [1].

Выводы

1. Использование различных вариантов сцепки судов после спрямления судна с извлечением пробоины из воды в случае получения ледовых повреждений, рассмотренных в данной статье, может быть предложено всем судам отечественных и иностранных судоходных компаний как основной метод борьбы за живучесть, удовлетворяющий требованиям Международного полярного кодекса в отношении взаимодействия с судами-спасателями и / или другими судами при ледовых авариях.

2. Рассмотрены основные преимущества предлагаемых вариантов сцепки, которые заключаются в том, что они могут быть использованы при всех видах ледовых повреждений, не требуют больших временных или иных затрат, могут самостоятельно выполняться на любом судне после или во время перекачки жидкости с одного борта на другой борт, способствуют быстрой ликвидации опасности затопления судна, экологических загрязнений, дают возможность быстрого и безопасного спасения людей с аварийного судна, минуя водную и/или ледовую стадию спасения.

3. Получены расчетные зависимости и результаты, которые подтвердили преимущества предлагаемых вариантов сцепки и могут быть использованы при проведении расчетов на конкретных судах, совершающих плавание в полярных водах.

4. Судоводители всего мира уже в настоящее время могут использовать данные варианты сцепки при получении ледовых повреждений. В перспективе данные варианты сцепки в чрезвычайных ситуациях при ледовых авариях могут использоваться в виде типовых схем действий после получения информации о повреждении в результате ледового плавания.

5. Следует учитывать, что после операции по спрямлению судна с извлечением пробоины из воды и создания различных вариантов сцепки аварийного судна с другими суднами или судами спасателями необходимо как можно скорее связаться с государственными структурами оказания помощи и спасения для их информирования и вызова необходимой помощи, как это предусмотрено МПК [1].

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Международный кодекс для судов, эксплуатирующихся в полярных водах (Полярный кодекс). Резолюция ИМО MSC.385(94), 2014.
2. Поправки к Международной конвенции по охране человеческой жизни на море 1974 года с поправками. Резолюция ИМО MSC.386(94), 2014.
3. Международная Конвенция по охране человеческой жизни на море 1974 года с поправками (СОЛАС-74).
4. Международная конвенция о предотвращении загрязнения с судов 1973 года, измененная протоколом 1978 г. к ней с поправками (МАРПОЛ 73/78).
5. Правила плавания в акватории Северного морского пути: утв. Приказом Министерства транспорта Российской Федерации от 17.01.2013 г., № 7.
6. Ершов А. А. Разработка системы интеллектуальной поддержки судоводителя для снижения опасности столкновений судов: дис. ... д-ра техн. наук: 05.22.19; защищена 19.11.2012; утв. 20.05.2013 / Андрей Александрович Ершов. — СПб., 2012. — 366 с.
7. Ершов А. А. Теория судна. Статика: учеб. пособие / А. А. Ершов, Б. П. Коротков [и др.]. — СПб.: ГМА им. адм. С. О. Макарова, 2009. — 186 с.
8. 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.
9. Ершов А. А. От «Титаника» до «Costa Concordia» неиспользованные возможности для спасения: монография / А. А. Ершов. — Saarbrücken, Deutschland: LAP LAMBERT Academic Publishing, 2013. — 146 с.
10. 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.
11. 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. Mezhdunarodnyj kodeks dlja sudov, jekspluatirujushhihsja v poljarnyh vodah. Rezoljucija IMO MSC.385(94). 2014.
2. Popravki k Mezhdunarodnoj konvencii po ohrane chelovecheskoj zhizni na more 1974 goda. Rezoljucija IMO MSC.386(94). 2014.
3. Mezhdunarodnaja Konvencija po ohrane chelovecheskoj zhizni na more 1974 goda (SOLAS-74) s popravkami.
4. Mezhdunarodnaja konvencija o predotvrashhenii zagraznjenja s sudov 1973 goda, izmenennaja protokolom 1978 g. k nej s popravkami (MARPOL 73/78).
5. Russian Federation. Order of the Ministry of Transport of the Russian Federation from 17.01.2013 № 7. Pravila plavanija v akvatorii Severnogo morskogo puti.
6. Ershov, A. A. Razrabotka sistemy intellektualnoj podderzhki sudovoditelja dlja snizhenija opasnosti stolknovenij sudov. Dr. diss. SPb., 2012.
7. Ershov, A. A., B. P. Korotkov, et al. *Teorija sudna. Statika: uchebnoe posobie*. SPb.: GMA im. adm. S. O. Makarova, 2009.
8. 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.

9. Ershov, A. A. *Ot «Titanika» do «Costa Concordia» neispolzovannye vozmozhnosti dlja spa-senija: monografija*. Saarbrucken, Deutschland: LAP LAMBERT Academic Publishing, 2013.
10. Ershov, A. A., and V. I. Nikolskij. *Nekotorye avarii i katastrofy otechestvennyh i inostrannyh sudov: monografija*. SPb.: GUMRF im. adm. S. O. Makarova, 2013.
11. 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

Петухов Павел Игоревич — аспирант

Научный руководитель:

Ершов Андрей Александрович

ФГБОУ ВО «ГУМРФ имени

адмирала С. О. Макарова»

198035, Российская Федерация, Санкт-Петербург,

ул. Двинская 5/7

e-mail: sevarus89@gmail.com

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

Petuhov, Pavel I. — postgraduate

Supervisor:

Ershov, Andrey A.

Admiral Makarov State University

of Maritime and Inland Shipping

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

Russian Federation

e-mail: sevarus89@gmail.com

Статья поступила в редакцию 20 декабря 2016 г.

Received: December 20, 2016.

DOI: 10.21821/2309-5180-2017-9-1-27-36

DETERMINATION OF THE ICEBREAKERS' SPEED IN ICE FREE WATER OPERATED IN THE NORTHERN CASPIAN SEA

A. A. Temnikova, A. R. Ruban

Astrakhan State Technical University,
Astrakhan, Russian Federation

While designing icebreakers and icegoing vessels' propulsion systems it is important to consider the speed in ice-free water, which is known to be one of the main ship's characteristics. In the article, the method was developed for determining the rate of open water at the given calculations, the movement of the ship in ice, having a set of initial data points. The standard practice to determine the rate in the "clean" water for icebreakers is to define the curve crossing of the ship's towing capacity in a "clean" water with a maximum towing capacity of the line, made by a vessel in the ice. The given article deals with the method, which does not deviate from the standard one, but explains how to use this standard procedure working with a set of initial data for the further design of this range of values that can be useful for selecting the optimal ship's characteristics for different conditions. Such steps are considered: determination the area of the calculated values of the ice resistance, icebreaker's calculation towing capacity in ice conditions, determination bandwidth reduction of speed range in ice free on the ship-prototype, calculation of ship's resistance in ice free for the selected speed range, the towing vessel capacity range calculation in ice free and bandwidth reduction of speed range, the definition of the intersection of the ranges and the determination in ice free water of vessel's speed range. Also it is confirmed and checked the correctness of the calculations by the given method of the characteristics of prototype ships operating in the fixed area of navigation. The error is revealed, it is less than ten percent, which is acceptable in the early stages of design. In conclusion, the article shows the structure of the method that is applicable for the design of both icebreakers and icegoing vessels.

Keywords: ice resistance, propulsion complex, icebreaker, speed in ice, speed in ice free, tow-rope horsepower, ship-prototype.

For citation:

Temnikova, Alena A., and Anatoliy R. Ruban. "Determination of the icebreakers' speed in ice free water operated in the Northern Caspian sea." *Vestnik Gosudarstvennogo universiteta morskogo i rechnogo flota imeni admiral S.O. Makarova* 9.1 (2017): 27–36. DOI: 10.21821/2309-5180-2017-9-1-27-36.

УДК [629.5.016.5/.018.713:629.561.5]:656.61.052.5

ОПРЕДЕЛЕНИЕ СКОРОСТИ ЛЕДОКОЛОВ НА «ЧИСТОЙ» ВОДЕ, ЭКСПЛУАТИРУЕМЫХ НА СЕВЕРНОМ КАСПИИ

А. А. Темникова, А. Р. Рубан

ФГБОУ ВО «Астраханский государственный технический университет»,
Астрахань, Российская Федерация

При проектировании пропульсивных комплексов ледоколов и судов ледового плавания важное значение имеет скорость на «чистой» воде, которая является одной из основных характеристик судна. В статье разработана методика определения скорости ледоколов на «чистой» воде при заданных расчетных показателях движения судна во льдах для совокупности множества точек исходных данных. Стандартная методика определения скорости на «чистой» воде для ледоколов представляет собой определение пересечения кривой буксировочной мощности судна на «чистой» воде с прямой максимальной буксировочной мощности, достигаемой судном во льдах. Приведенная в статье методика не отходит от стандартной, но объясняет, как использовать стандартную методику при работе со множеством исходных данных, чтобы при дальнейшем проектировании из этого диапазона значений можно было выбрать оптимальные характеристики судна для различных условий. Рассмотрены такие этапы, как определение области расчетных значений ледового сопротивления, расчет буксировочной мощности ледокола в ледовых условиях, определение диапазона скоростей на тихой воде по судам-прототипам, расчет сопротивления судна на «чистой» воде для выбранного диапазона скоростей, расчет диапазона буксировочных мощностей суд-

на на «чистой» воде и сужение диапазона скоростей, определение пересечения диапазонов и определение диапазона скоростей судна на «чистой» воде. Также в подтверждение корректности расчетов по предложенной методике осуществляется проверка значений по характеристикам судов-прототипов, которые эксплуатируются в рассматриваемом районе плавания. Выявлена погрешность меньше десяти процентов, которая допустима на начальных этапах проектирования. В заключение статьи приведена структура методики, которая применима для проектирования как ледоколов, так и судов ледового плавания.

Ключевые слова: ледовое сопротивление, пропульсивный комплекс, ледокол, скорость во льдах, скорость на «чистой» воде, буксировочная мощность, судно-прототип.

Для цитирования:

Темникова А. А. Определение скорости ледоколов на «чистой» воде, эксплуатируемых на Северном Каспии / А. А. Темникова, А. Р. Рубан // Вестник Государственного университета морского и речного флота имени адмирала С. О. Макарова. — 2017. — Т. 9. — № 1. — С. 27–36. DOI: 10.21821/2309-5180-2017-9-1-27-36.

Введение

Основным расчетным режимом работы главного двигателя на ледоколах в большинстве случаев является работа в тяжелых условиях, когда скорость движения судна составляет 2 ... 5 уз, т. е. примерно 15 ... 20 % от скорости хода на «чистой» воде. Существует множество методов определения ледового сопротивления ледоколов, предложенных В. И. Каштеляном [1], Ю. Н. Алексеевым и К. Е. Сазоновым [2], [3], А. А. Добродеевым [4], [5], Е. М. Грамузовым [6] и И. Н. Шкановым [7], О. С. Тестовой [8] и др. Помимо отечественных специалистов разработки в данном направлении предлагали и зарубежные исследователи, среди которых Е. Энkvист, Х. Доргелох, Г. Линдквист [9] и др. На основании этих методов была выполнена работа [10] и выбран расчетный случай ледового сопротивления ледоколов для рассматриваемого района плавания (Северный Каспий и Волго-Каспийский морской судоходный канал).

При проектировании энергетических комплексов ледоколов и судов ледового плавания также важное значение имеет скорость на «чистой» воде, которая является одной из основных характеристик судна. Определение этой величины производится по мощности энергетической установки, рассчитанной для основного режима работы ледокола, т. е. во льдах.

В случае, когда исходные характеристики судна заданы не конкретными значениями, а областью значений, возникают сложности определения достижимой скорости хода из-за разброса этих величин. В настоящее время разработаны общие методики проектирования и способы оптимизации, известные под названиями «метод вариаций», «метод сопоставления вариантов» и др., рассмотренные в работах В. В. Ашика [11], В. М. Пашина [12], А. В. Бронникова [13] и др., в частности, в методику, где рассматривается вопрос, связанный с неопределенностью исходных данных и использованием баз данных, вклад внесли М. Г. Шайдуллин [14] и М. Э. Францев [15]. Однако все эти методы рассматриваются для начальных этапов проектирования и в результате дают один расчетный вариант исходных данных (например, главные размерения) или несколько вариантов для сравнения, при этом остальные отбрасываются и не участвуют на дальнейших этапах проектирования.

Для выбора проектных решений используют критерии оптимизации, и при отбрасывании вариантов на начальных этапах проектирования существует вероятность исключить из рассмотрения проектные решения, оптимальность которых выявляется на последующих этапах проектирования. Таким образом, появляется необходимость рассматривать множество проектных решений на всех этапах проектирования, уменьшая рассматриваемую область значений ступенчато в зависимости от последовательно вводимых критериев оптимизации. Следовательно, на стадии определения скорости судна на «чистой» воде, в данном случае ледоколов, исходные данные для расчета могут быть заданы областью с бесконечным множеством значений. В этом случае появляется необходимость в разработке методики определения скорости хода не для одного судна с конкретными размерениями, а для совокупности множества точек исходных данных (главных размерений ледоколов). Данная методика рассмотрена на примере ледоколов, эксплуатируемых в Волго-Каспийском морском судоходном канале и на Северном Каспии.

Основная часть

1. Определение области расчетных значений ледового сопротивления

Перед тем как приступить к расчету скорости на «чистой» воде, необходимо определить с совокупностью множества точек исходных данных. При определении скорости ледоколов и судов ледового плавания как во льду, так и на «чистой» воде необходимо уделять особое место выбору оптимальных решений. Для оптимизации проектных решений рассматривается диапазон значений ледового сопротивления согласно работе [10], который соответствует следующим пределам главных размерений: длина судна между перпендикулярами $L_{\text{пп}} = (71 \dots 94)$ м; ширина судна $B = (16 \dots 20)$ м; осадка судна $T \leq 4,2$ м. С учетом особенностей района эксплуатации в указанной работе рассчитываются значения сопротивления ледоколов в сплошном льду, в мелкобитом льду и на мелководье для заданного диапазона значений главных размерений с оптимальными характеристиками формы корпуса судна.

При определении сопротивления в мелкобитом льду учтена различная балльность сплоченности льда. С целью определения буксировочной мощности судна были выбраны расчетные значения ледового сопротивления путем сравнения всех видов сопротивления судна во льду. Расчетный диапазон ледового сопротивления, согласно работе [10], соответствует сопротивлению в мелкобитых льдах при сплоченности льда 8 баллов. Данный выбор обоснован с практической и эксплуатационной точки зрения, расчетные значения сопоставлены со значениями ледового сопротивления ледоколов, эксплуатируемых в заданном районе плавания.

2. Расчет буксировочной мощности ледокола в ледовых условиях, исходя из скорости движения судна во льдах

Принятая скорость движения судна во льдах $v_{\text{л}}$ равна 2 уз. На основании этих данных можно построить расчетный диапазон значений буксировочной мощности ледоколов (рис. 1). Также на рисунке указаны проекции расчетного диапазона на плоскости системы координат.

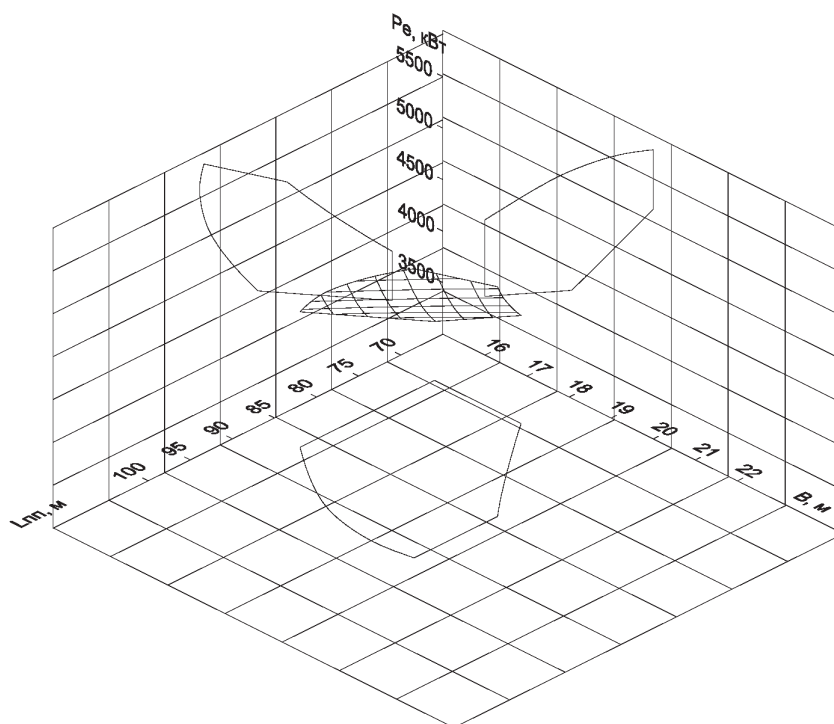


Рис. 1. Расчетная буксировочная мощность ледокола при движении во льду $P_e(L_{\text{пп}}, B)$

3. Определение диапазона скоростей на «чистой» воде по судам-прототипам

Для определения скорости ледокола на «чистой» воде v необходимо задаться диапазоном скоростей, в пределах которых лежат искомые значения. Если рассматривать близкие по главным

размерениям прототипы судов, то ориентировочные скорости ледоколов должны составлять от 12 до 15 уз (см. таблицу). Для расчета сопротивления на «чистой» воде принимается диапазон скоростей от 10 до 20 уз с шагом 1 уз.

Скорости на «чистой» воде ледоколов-прототипов

№ п.п.	Год ввода судна в эксплуатацию	Название судна	Длина судна $L_{\text{м}}$, м	Ширина судна B , м	Осадка судна T , м	Скорость на «чистой» воде v , уз
1	1959	Camsell	62,36	14,19	4,88	13,50
2	1959	Sir Humphrey Gilbert	65,00	14,60	4,90	13,50
3	1970	Griffon	65,43	14,49	4,73	13,50
4	1976	Профессор Водяницкий	63,03	12,40	4,20	12,00
5	1977	Капитан Плахин	70,89	16,00	3,89	14,00
6	1978	Капитан Букаев	71,00	16,00	3,50	14,00
7	1979	Профессор Штокман	63,18	12,40	4,21	13,50
8	1984	Капитан Мецайк	73,73	16,30	2,44	13,51
9	1988	Hesperides	75,69	13,87	4,42	14,70
10	2004	Arkona	63,35	14,07	4,50	13,00
11	2011	Louhi	65,50	14,07	5,00	15,00

4. Расчет сопротивления судна на «чистой» воде для выбранного диапазона скоростей

Сопротивление судна в «чистой» воде находится по методике, представленной в источнике [16]:

$$R = C \frac{\rho v^2}{2} \Omega, \quad (1)$$

где C — безразмерный коэффициент буксировочного сопротивления; $\rho = 1,013$ — плотность воды, т/м³; v — скорость движения судна, м/с; Ω — площадь смоченной поверхности судна, м² (принимается из работы [10]).

Коэффициент буксировочного сопротивления C является функцией формы корпуса судна, чисел Рейнольдса и Фруда [16]:

$$C = C_{F0} + C_R + C_{AP} + C_A + C_{AA}, \quad (2)$$

где $C_{F0} = 0,455 / \lg \text{Re}^{2,85}$ — коэффициент сопротивления трения эквивалентной гладкой пластины; C_R — коэффициент остаточного сопротивления; C_{AP} — коэффициент сопротивления шероховатости, изменяется в диапазоне $(0,3 - 0,4) \cdot 10^{-3}$ при длине судна 50 – 150 м; $C_A = 0,45 \cdot 10^{-3}$ — коэффициент выступающих частей; C_{AA} — коэффициент воздушного сопротивления (составляет 2 % от общего коэффициента сопротивления судна).

Коэффициент остаточного сопротивления рассчитывается по методике Дубровина, изложенной в работе [1]. Определение коэффициента остаточного сопротивления проектируемого судна выполняется по формуле

$$C_R = C_{R0} k_{L/B} k_{B/T} k_{\delta}, \quad (3)$$

где C_{R0} — коэффициент остаточного сопротивления судна-прототипа, характеристики которого указаны в источнике [1]; $k_{L/B}$; $k_{B/T}$; k_{δ} — коэффициенты влияния, учитывающие отличие величин L/B , B/T и δ рассматриваемого судна и судна-прототипа.

Коэффициенты $k_{L/B}$; $k_{B/T}$; k_{δ} находятся по отношениям:

$$k_{L/B} = \frac{x_{L/B}}{(x_{L/B})_0}; \quad k_{B/T} = \frac{x_{B/T}}{(x_{B/T})_0}; \quad k_{\delta} = \frac{x_{\delta}}{(x_{\delta})_0}. \quad (4)$$

Значения $x_{L/B}$; $x_{B/T}$ и x_{δ} определяются с помощью графиков, приведенных в источнике [1].

При расчете сопротивления учитывается наличие носовых винтов (остаточное сопротивление ледокола, из-за наличия в носу двух выкружек гребных валов, увеличивается на 25 % согласно [1]). Диапазоны значений коэффициента сопротивления рассчитываются по формуле (2), сопротивление судна определяется по формуле (1).

5. Расчет диапазона буксировочных мощностей судна на «чистой» воде и сужение диапазона скоростей

Как видно из источника [10], осадка практически не влияет на изменение ледового сопротивления. Так как основным расчетным режимом главного двигателя является работа ледокола во льдах, поверхность значений ледового сопротивления будет использоваться для определения значений буксировочной мощности.

Буксировочная мощность равна произведению сопротивления судна и скорости судна на «чистой» воде. При расчете буксировочной мощности для каждого значения диапазона скоростей было выявлено, что часть данных значительно превышает или, наоборот, они слишком малы для расчетной совокупности множества значений буксировочной мощности при движении судна во льдах. Опираясь на значения, приведенные на рис. 1, можно уменьшить интервал скорости на «чистой» воде с 10 ... 20 уз до 14 ... 17 уз.

6. Определение пересечения диапазонов

Для нахождения скорости на «чистой» воде необходимо найти пересечение диапазона значений буксировочных мощностей при движении судна во льду с диапазонами значений буксировочных мощностей при движении в «чистой» воде. На рис. 2, а приведены диапазоны значений бук-

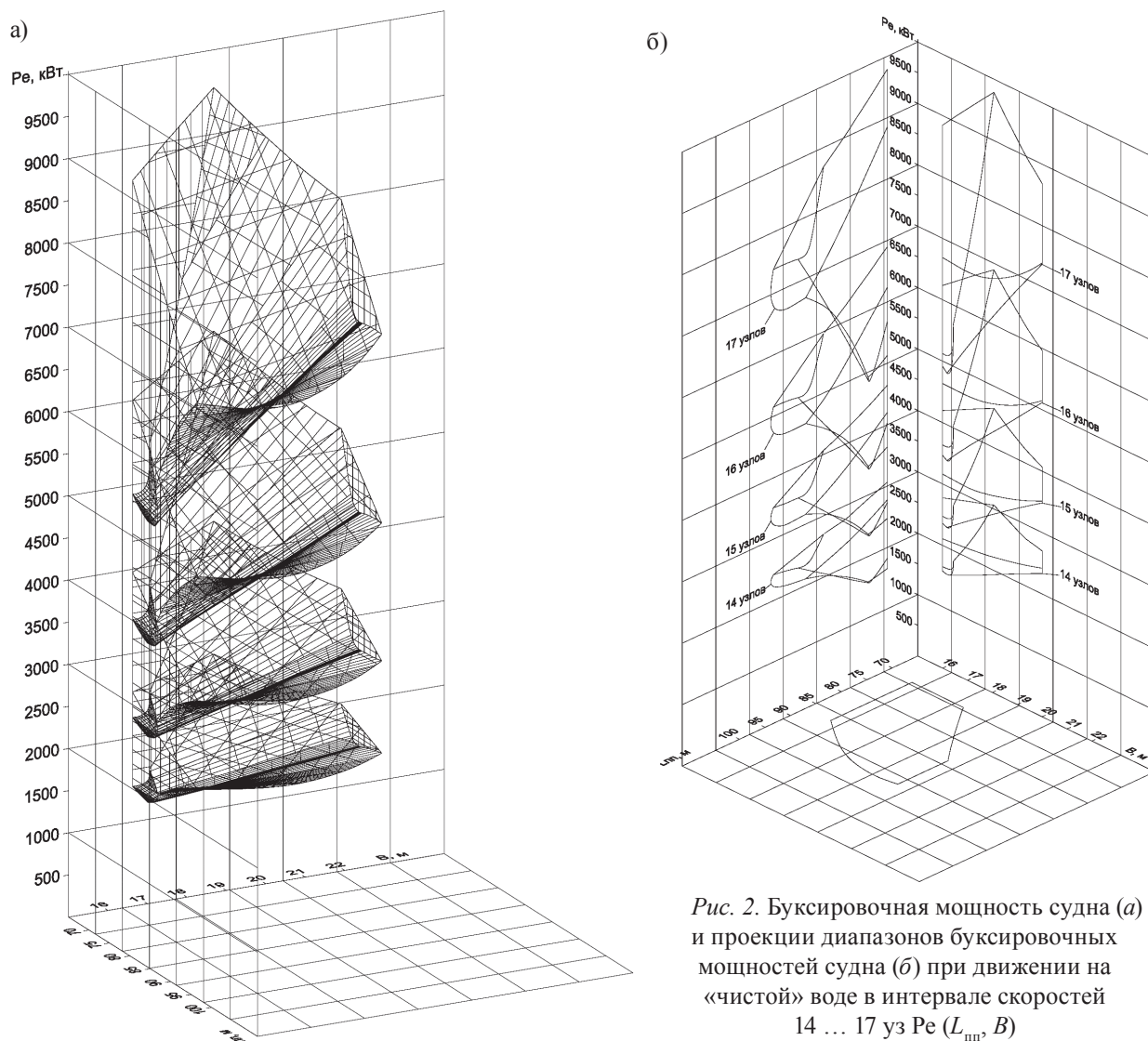


Рис. 2. Буксировочная мощность судна (а) и проекции диапазонов буксировочных мощностей судна (б) при движении на «чистой» воде в интервале скоростей 14 ... 17 уз $Pe(L_{\text{пл}}, B)$

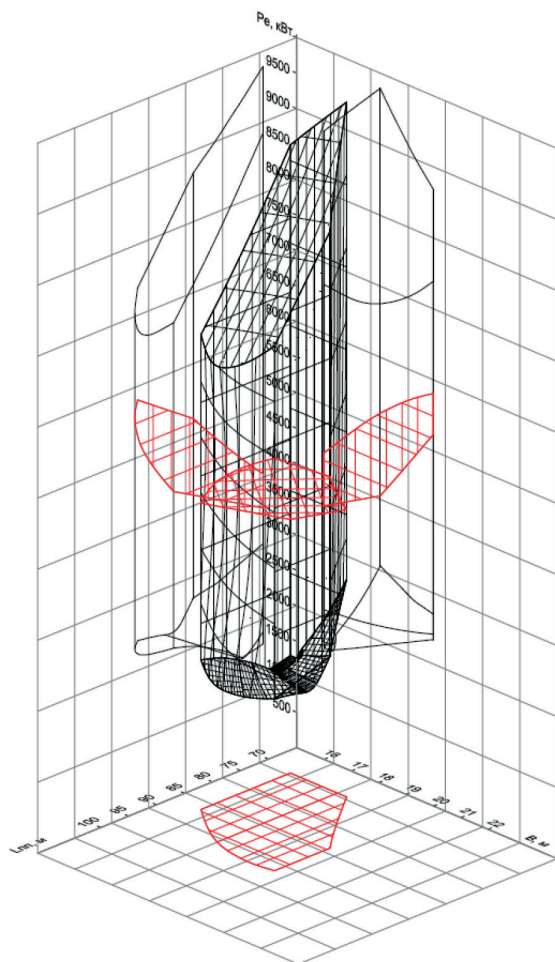


Рис. 3. Пересечение диапазонов значений буксировочных мощностей при движении на «чистой» воде и во льдах $Pe(L_{пн}, B)$

(«Капитан Чечкин», «Капитан Букаев») и ледокол пр. 1191 («Капитан Мецайк»).

При рассмотрении пр. 1105 после подставления значений главных размерений (из таблицы на с. 30) в функцию $f(v, L_{пн}, B, T)$, сегмент которой показан на рис. 4, получен полином:

$$0,17v^5 - 1,14v^4 + 3,16v^3 - 2523,02 = 0. \quad (5)$$

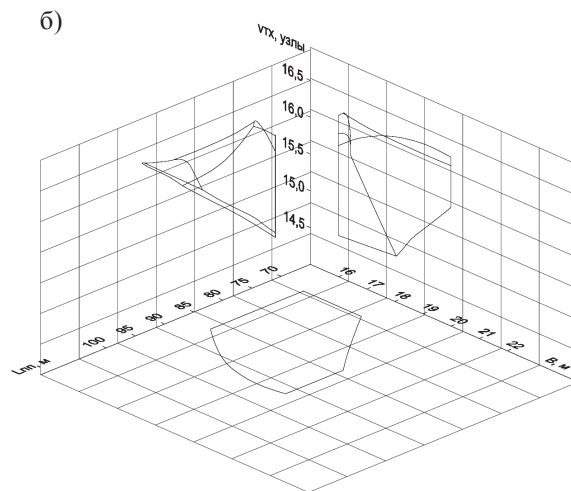
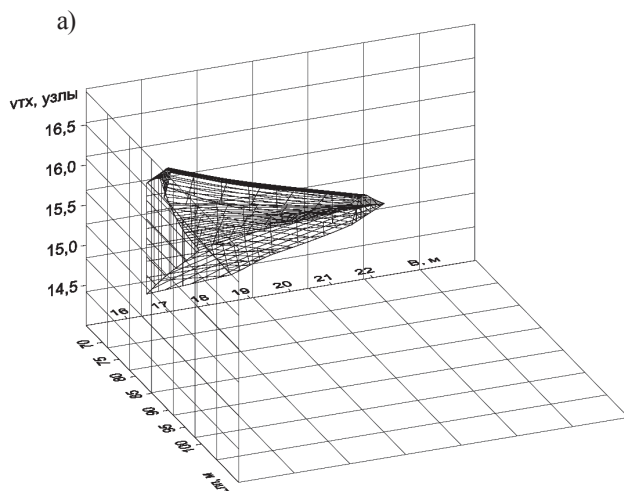


Рис. 4. Расчетная область скоростей судна на тихой воде $v_{тх}(L_{пн}, B)$:
а — трехмерная область; б — проекции на плоскости координат

сировочных мощностей судна при движении на «чистой» воде для скоростей 14 ... 17 уз. Для наглядности на рис. 2, б приведены проекции расчетных диапазонов значений буксировочных мощностей судна при движении на «чистой» воде на плоскости системы координат.

Диапазоны значений буксировочных мощностей при движении на «чистой» воде для скоростей 14 ... 17 уз представляются в виде общего расчетного диапазона, в котором определяется пересечение плоскости значений буксировочных мощностей судна при движении во льдах (рис. 3).

7. Определение диапазона скоростей судна на «чистой» воде

По полученным значениям пересечения диапазонов можно построить расчетную область скоростей судна на «чистой» воде (рис. 4).

Проверка полученных данных.

Для проверки объективности данных, полученных из расчетов по предложенной методике, необходимо подставить реальные эксплуатационные данные судов-прототипов в функцию зависимости скорости на «чистой» воде от главных размерений судна ($L_{пн}$, B , T). В данном случае выбираются наиболее близкие суда-прототипы, которые эксплуатируются в выбранном районе плавания. К таким судам относятся ледоколы проекта 1105

Для определения корней полинома в диапазоне значений $0 \dots 10$ м/с, строится график (рис. 5) функции $f(v) = 0,17v^5 - 1,14v^4 + 3,16v^3 - 2523,02$.

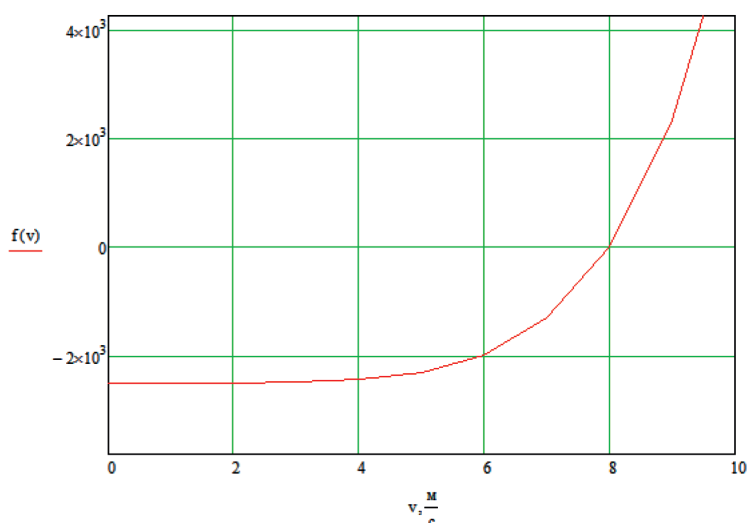


Рис. 5. Определение скорости судна пр. 1105 на «чистой» воде

Из рис. 5 видно, что корень уравнения (5) соответствует скорости 7,98 м/с, или 15,26 уз. Данное значение на 9 % отличается от спецификационной скорости, равной 14 уз.

При рассмотрении пр. 1191 после подстановки значений главных размерений, выбранных из таблицы, в функцию $f(v, L_{\text{пп}}, B, T)$ получен полином:

$$0,13v^5 - 0,93v^4 + 2,72v^3 - 3238,2 = 0. \quad (6)$$

Для определения корней полинома в диапазоне значений $0 \dots 10$ м/с строится график (рис. 6) функции $f(v) = 0,13v^5 - 0,93v^4 + 2,72v^3 - 3238,2$, откуда видно, что корень уравнения (6) соответствует скорости 8,81 м/с, или 17,14 уз. Данное значение почти на 27 % отличается от спецификационной скорости 13,51 уз.

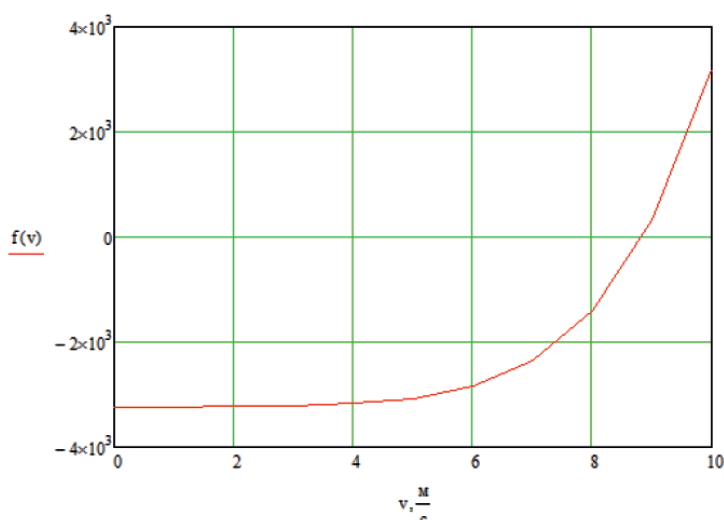


Рис. 6. Определение скорости судна пр. 1191 на «чистой» воде

Данные отклонения обусловлены использованием, во-первых, различных прототипов в расчетах, а во-вторых, различных коэффициентов обводов корпуса судна. Причем меньшая погрешность для пр. 1105 (традиционная форма обводов носовой оконечности) по сравнению с пр. 1191 («ложкообразная» форма носовой оконечности) связана с формой обводов носовой оконечности,

характеристики которой близки к рассматриваемому судну (усовершенствованная традиционная форма) в отличие от пр. 1191. Корректировки по форме носовой оконечности также при необходимости можно внести в расчет. В целом погрешность меньше десяти процентов допустима на начальных этапах проектирования.

Заключение

Таким образом, на примере ледоколов, эксплуатируемых в Северном Каспии и Водно-Каспийском морском судоходном канале, была разработана методика для определения скорости на «чистой» воде, которая имеет следующую структуру:

- определение области расчетных значений ледового сопротивления;
- расчет буксировочной мощности ледокола в ледовых условиях, исходя из скорости движения судна во льдах;
- определение диапазона скоростей на «чистой» воде по судам-прототипам;
- расчет сопротивления судна на «чистой» воде для выбранного диапазона скоростей;
- расчет диапазона буксировочных мощностей судна на «чистой» воде и сужение диапазона скоростей;
- определение пересечения диапазонов;
- определение диапазона скоростей судна на «чистой» воде.

В данной методике главным образом отображается сложность работы с трехмерными диапазонами значений, для которых нельзя построить двухмерный график и найти пересечение между двумя кривыми, как в классической методике. Одним из преимуществ данного метода является графический способ отображения результатов расчета, что делает расчет более наглядным по сравнению с использованием множества чисел, получаемых в ходе расчетов.

Представленная методика определения скорости хода судна позволяет произвести расчеты не для одного судна с конкретными размерениями, а для совокупности множества точек исходных данных. Это позволяет выполнить дальнейшее проектирование без ущерба задаче оптимизации. При этом появляется возможность учитывать все возможные варианты проектных решений и вводить критерии оптимизации ступенчато по ходу проектирования.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Каштелян В. И.* Ледоколы / В. И. Каштелян, А. Я. Рывлин, О. В. Фадеев, В. Я. Ягодкин. — Л.: Судостроение, 1972. — 287 с.
2. *Апполонов Е. М.* Особенности эксплуатации ледоколов на мелководье / Е. М. Апполонов, К. Е. Сазонов, А. В. Рыжков // Мореходство и морские науки-2011: избр. докл. Третьей Сахалинской региональной морской науч.-техн. конф. (15 – 16 февраля 2011 г.) / под ред. В. Н. Храмушина. — Южно-Сахалинск: СахГУ, 2011. — С. 103–108.
3. *Бокатова Е. А.* Расчет скорости движения судна по ледяному каналу в условиях сжатия при частичном взаимодействии бортов с его кромками / Е. А. Бокатова, К. Е. Сазонов // Труды ЦНИИ им. акад. А. Н. Крылова. — 2012. — № 66. — С. 43–46.
4. *Добродеев А. А.* Разработка метода расчета ледового сопротивления судна при движении в крупнобитых льдах и обломках ледяных полей и его применение для оценки различных способов проводки крупнотоннажных судов: дис. ... канд. техн. наук: 05.08.01 / А. А. Добродеев. — СПб., 2016. — 114 с.
5. *Добродеев А. А.* Механика движения судна в крупнобитых льдах и обломках ледяных полей / А. А. Добродеев, К. Е. Сазонов // Сибирский журнал чистой и прикладной математики. — 2012. — Т. 12. — № 4. — С. 53–58.
6. *Грамузов Е. М.* Метод учета влияния снега на сопротивление ледокола за счет приведенной толщины сплошного ледяного покрова / Е. М. Грамузов, Н. Е. Тихонова // Труды НГТУ им. Р. Е. Алексеева. — 2011. — № 4 (89). — С. 178–183.
7. *Шканов И. Н.* Прогнозирование влияния мелководья на сопротивление льда при проектировании формы корпуса речного ледокола: дис. ... канд. техн. наук / спец. 05.08.01 и 05.08.03 / И. Н. Шканов. — Нижний Новгород, 2003. — 269 с.

8. Тестова О. С. Исследование влияния мелководья на движение ледокола / О. С. Тестова // Сб. материалов XIII Межд. молодежной науч.-техн. конф. «Будущее технической науки». — Н.Новгород: НГТУ им. Р. Е. Алексеева, 2012. — С. 250–251.

9. Lindqvist G. A Straightforward Method for Calculation of Ice Resistance of Ships / G. Lindqvist // 10th Intl Conference, Port and Ocean Engineering under Arctic Conditions, 12-16 June 1989. — POAC, 1989. — Vol. 2. — Pp. 722–735.

10. Темникова А. А. Определение расчетного диапазона значений ледового сопротивления ледоколов, эксплуатируемых в Волго-Каспийском морском судоходном канале и на Северном Каспии / А. А. Темникова // Вестник Астраханского государственного технического университета. Серия: Морская техника и технология. — 2015. — № 4. — С. 45–57.

11. Ашик В. В. Проектирование судов / В. В. Ашик. — Л.: Судостроение, 1985. — 320 с.

12. Пашин В. М. Оптимизация судов / В. М. Пашин. — Л.: Судостроение, 1983. — 296 с.

13. Бронникова А. В. Проектирование судов / А. В. Бронников. — Л.: Судостроение, 1991. — 320 с.

14. Шайдуллин М. Г. Решение задачи внешнего проектирования судна в условиях неопределенности / М. Г. Шайдуллин, В. С. Булаткин // Труды НГТУ им. Р. Е. Алексеева. — 2013. — № 4 (101). — С. 214–221.

15. Францев М. Э. Использование параметрических методов на ранних этапах разработки проекта судна из композитных материалов / М. Э. Францев // Вестник Астраханского государственного технического университета. Серия: Морская техника и технология. — 2014. — № 1. — С. 33–42.

16. Слижевский Н. Б. Расчет ходкости надводных водоизмещающих судов: учебное пособие / Н. Б. Слижевский, Ю. М. Король, М. Г. Соколин, В. Ф. Тимошенко; под общ. ред. проф. Н. Б. Слижевского. — Николаев: НУК, 2004. — 192 с.

REFERENCES

1. Kashteljan, V. I., A. Ja. Ryvlin, O. V. Fadeev, and V. Ja. Jagodkin. *Ledokoly*. L.: Sudostroenie, 1972.
2. Appolonov, E. M., K. E. Sazonov, and A. V. Ryzhkov. "Osobennosti jekspluatacii ledokolov na melkovod'e." *Morehodstvo i morskije nauki – 2011: izbrannye doklady Tret'ej Sahalinskoj regional'noj morskoy nauchno-tehnicheskoy konferencii (15–16 fevralja 2011 g.)*. Edited by V. N. Hramushin. Juzhno-Sahalinsk: SahGU, 2011: 103–108.
3. Bokatova, E. A., and K. E. Sazonov. "Raschet skorosti dvizheniya sudna po ledyanomu kanalu v usloviyakh szhatiya pri chastichnom vzaimodeistvii bortov s ego kromkami." *Trudy TsNII im. akad. A. N. Krylova* 66 (2012): 43–46.
4. Dobrodeev, A. A. Razrabotka metoda rasheta ledovogo soprotivleniya sudna pri dvizhenii v krupnobytykh l'dakh i oblomkakh ledyanykh polei i ego primeneniye dlya otsenki razlichnykh sposobov provodki krupnotonnazhnykh sudov. PhD diss. (Tech.). SPb., 2016.
5. Dobrodeev, A. A., and K. E. Sazonov. "Mechanics of ships movement in small and medium floes." *Sibirskii zhurnal chistoi i prikladnoi matematiki* 12.4 (2012): 53–58.
6. Gramuzov, E. M., and N. E. Tihonova. "Method of accounting for the influence of snow on the resistance icebreaker due reduced thickness solid ice cover." *Transactions of NNSTU n.a. R. E. Alekseev* 4(89) (2011): 178–183.
7. Shkanov, I. N. Prognozirovanie vliyaniya melkovod'ya na soprotivlenie l'da pri pro-ektirovanii formy korpusa rechnogo ledokola. PhD diss. (Tech.). Nizhnii Novgorod, 2003.
8. Testova, O. S. "Issledovanie vliyaniya melkovod'ya na dvizhenie ledokola." *Sbornik materialov XIII Mezh-dunarodnoi molodezhnoi nauchno-tekh. konf. "Budushchee tekhnicheskoi nauki"*. Nizhnii Novgorod: NGTU im. R. E. Alekseeva, 2012: 250–251.
9. Lindqvist, G. "A Straightforward Method for Calculation of Ice Resistance of Ships." *10th Intl Conference, Port and Ocean Engineering under Arctic Conditions, 12-16 June 1989*. POAC, 1989. Vol. 2. 722–735.
10. Temnikova, Alyona Aleksandrovna. "Determination of the calculated range of the values of ice resistance of the icebreakers operated in the Volga-Caspian seaway canal and in the Northern Caspian." *Vestnik of Astrakhan State Technical University. Series: Marine Engineering and Technologies* 4 (2015): 45–57.
11. Ashik, V. V. *Proektirovanie sudov*. L.: Sudostroenie, 1985.
12. Pashin, V. M. *Optimizatsiya sudov*. L.: Sudostroenie, 1983.
13. Bronnikova, A. V. *Proektirovanie sudov*. L.: Sudostroenie, 1991.
14. Shaydullin, M. G., and V. S. Bulatkin. "Vessel external design solution under conditions of uncertainty." *Transactions of NNSTU n.a. R. E. Alekseev* 4(101) (2013): 214–221.

15. Frantsev, Mikhail Ernstovich. "The use of the parametric methods at the early stages of development of the vessel project from composites." *Vestnik of Astrakhan State Technical University. Series: Marine Engineering and Technologies* 1 (2014): 33–42.

16. Slizhevskii, N. B., Yu. M. Korol', M. G. Sokolin, and V. F. Timoshenko. *Raschet khodkosti nadvodnykh vodoizmeshchayushchikh sudov: uchebnoe posobie*. Edited by N. B. Slizhevskii. Nikolaev.: NUK, 2004.

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

Темникова Алена Александровна —
старший преподаватель
ФГБОУ ВО «Астраханский государственный
технический университет»
414056, Российская Федерация, Астрахань,
ул. Татищева 16
e-mail: awe_12@mail.ru

Рубан Анатолий Рашидович —
кандидат технических наук, доцент
ФГБОУ ВО «Астраханский государственный
технический университет»
414056, Российская Федерация, Астрахань,
ул. Татищева 16
e-mail: a.ruban1974@mail.ru

INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Temnikova, Alena A. —
Senior lecturer
Astrakhan State Technical University
16 Tatishcheva Str., Astrakhan, 414056,
Russian Federation
e-mail: awe_12@mail.ru

Ruban, Anatoliy R. —
PhD, associate professor
Astrakhan State Technical University
16 Tatishcheva Str., Astrakhan, 414056,
Russian Federation
e-mail: a.ruban1974@mail.ru

Статья поступила в редакцию 23 декабря 2016 г.

Received: December 23, 2016.

DOI: 10.21821/2309-5180-2017-9-1-37-47

METHOD OF ASSESSING THE PROFITABILITY OF CONTAINER TERMINALS WITHIN THEIR UNDERLOADING

A. L. Kuznetsov¹, A. V. Galin¹, M. N. Goryntsev²

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

2 — LENMORNIIPROEKT JSC, St. Petersburg, Russian Federation

Effective performance of transportation and logistics network depends on the quality of functioning of its constituent parts, including seaports. It is very important that the estimated turnover of the ports have to match the actual traffic passing through the port. The discrepancy between the estimated and actual turnover leads to additional costs in the cargo delivery, adversely affecting the ultimate cost of products delivery. Particularly relevant this question is for containerizing goods, as most of the finished products and consumer goods moves from the producer to the consumer in containers. Container terminals of the Gulf of Finland are the major gates for export and import containerized cargo flow of foreign trade enterprises of the Russian Federation. That is why the article discussed in detail the situation in the Russian cluster of container terminals in the Finnish Gulf: "Mobi-Dik", "Petrolesport", "Container terminal St.Petersburg", "First Container Terminal", "Sea Fishing port", "Ust Luga Container terminal", port "Bronka". The analysis, carried out in this article, reveals imbalances between the technical capabilities of the terminals and the existing traffic, as well as existing trend to increase this imbalance. To determine the cluster development program of the maritime container terminals becomes obvious the need to develop a fair tool for assessing the profitability of container terminals within their underloading. This article describes a method developed by the authors, which allows to calculate the profitability of container terminals at different options for the development of traffic and to rationalize the concept of cluster development of maritime container ports for maximum profitability under future scenarios of traffic.

Keywords: cluster of maritime containers terminals, container cargo flow, logistics cargo delivery network.

For citation:

Kuznetsov, Aleksandr L., Aleksandr V. Galin, and Mikhail N. Goryntsev. "Method of assessing the profitability of container terminals within their underloading." *Vestnik Gosudarstvennogo universiteta morskogo i rechnogo flota imeni admirala S. O. Makarova* 9.1 (2017): 37–47. DOI: 10.21821/2309-5180-2017-9-1-37-47.

УДК 656.615

МЕТОДИКА ОЦЕНКИ ДОХОДНОСТИ КОНТЕЙНЕРНЫХ ТЕРМИНАЛОВ ПРИ ИХ НЕДОГРУЗКЕ

А. Л. Кузнецов¹, А. В. Галин¹, М. Н. Горынцев²

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

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

Эффективная работа транспортно-логистической сети зависит от качества функционирования составляющих ее звеньев, в том числе и морских портов. Очень важно, чтобы расчетный грузооборот портов соответствовал фактическому грузопотоку, проходящему через порт. Несоответствие расчетного и действительного грузооборотов ведет к дополнительным расходам в доставке грузов, негативно сказывающимся на конечной себестоимости перемещаемой продукции. Особенно актуальным этот вопрос является для контейнеризированных грузов, так как большинство готовой продукции и товаров народного потребления перемещается от производителя к потребителю именно в этой форме. Контейнерные терминалы Финского залива являются основными «воротами» для экспортного и импортного грузопотоков, составляющих внешнеторговые операции предприятий Российской Федерации. Именно поэтому в статье подробно рассмотрена ситуация, сложившаяся в кластере российских контейнерных терминалов Финского залива: «Моби-Дик», «Петролеспорт», «Контейнерный терминал Санкт-Петербург», «Первый контейнерный терминал», «Морской рыбный порт» «Усть-Лужский Контейнерный Терминал»,

порт «Бронка». Проведенный в статье анализ вскрывает сложившийся дисбаланс между техническими возможностями терминалов и существующим грузопотоком, а также имеющуюся тенденцию к росту данного дисбаланса. Для определения программы развития кластера морских контейнерных терминалов очевидной становится потребность в разработке объективного инструмента оценки доходности контейнерных терминалов при их недогрузке. В статье описывается разработанная авторами методика, которая позволяет рассчитать доходность контейнерных терминалов при различных вариантах развития грузопотока и рационально обосновать концепцию развития кластера морских контейнерных портов, обеспечивающую максимальную доходность при прогнозируемых вариантах развития грузопотока.

Ключевые слова: кластер морских контейнерных портов, контейнерный грузопоток, логистические цепочки доставки грузов.

Для цитирования:

Кузнецов А. Л. Методика оценки доходности контейнерных терминалов при их недогрузке / А. Л. Кузнецов, А. В. Галин, М. Н. Горынцев // Вестник Государственного университета морского и речного флота имени адмирала С. О. Макарова. — 2017. — Т. 9. — № 1. — С. 37–47. DOI: 10.21821/2309-5180-2017-9-1-37-47.

Введение

Экономическое развитие государства невозможно без опоры на эффективную транспортную инфраструктуру, обеспечивающую взаимодействие производственных систем и отраслей как внутри государства, так и в глобальном, мировом масштабе [1]. Морские порты, являясь одним из важнейших звеньев транспортной инфраструктуры, оказывают существенное влияние на качество функционирования всей транспортной системы страны [2]. В свою очередь, эффективность работы морского порта в большой степени зависит от соответствия перегрузочных возможностей терминала обрабатываемому грузопотоку. С одной стороны, наличие излишней инфраструктуры ведет к значительному росту стоимости перевалки груза, а с другой стороны, недостаток инфраструктуры (например, причалов или перегрузочного оборудования) может вызвать задержки в перевалке грузов, которые ведут к дополнительным серьезным расходам в виде штрафов, установленных за простой судов, и другим расходам [3]. Наглядным примером такой несбалансированности может служить ситуация, сложившаяся в кластере российских контейнерных терминалов Финского залива.

Морские контейнерные терминалы России в акватории Финского залива

В настоящее время в акватории Финского залива перевалка контейнеризированных грузов осуществляется на семи основных терминалах [4] — рис. 1.

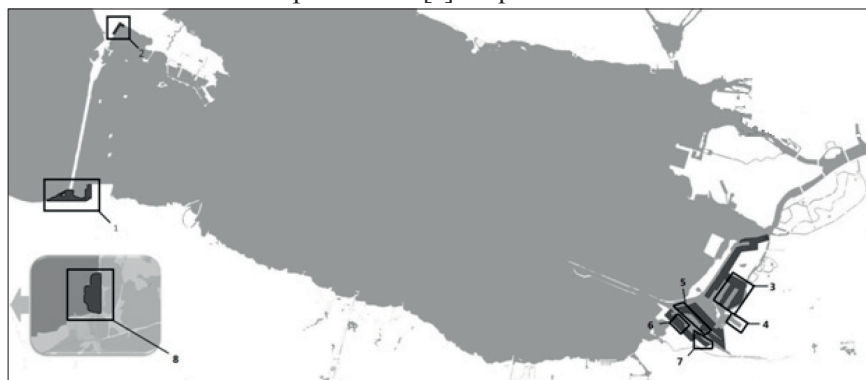


Рис. 1. Основные российские контейнерные терминалы финского залива:

- 1 — ММПК «Бронка»; 2 — ООО «Моби-Дик»; 3 — Петролеспорт; 4 — Северная верфь;
5 — Первый контейнерный терминал; 6 — Контейнерный терминал Санкт-Петербург;
7 — Рыбный порт; 8 — Усть-Лужский контейнерный терминал

Контейнерный терминал ООО «Моби-Дик» (М-Д) расположен в непосредственной близости от Санкт-Петербурга (г. Кронштадт) на острове Котлин. Терминал принадлежит группе Global

Ports (входит в группу компаний «Н-Транс») и финской корпорации Container Finance Group. Терминал располагает двумя причалами общей протяженностью 321 м, эксплуатационная вместимость терминала для одновременного хранения контейнеров составляет 7,5 тыс. TEU, расчетный грузооборот терминала — 400 тыс. TEU. Доставка контейнеров на терминал и вывоз с терминала осуществляются автотранспортом.

Контейнерный терминал ОАО «Петролеспорт» (ПЛП) расположен на острове Гладком, на территории Большого морского порта Санкт-Петербург. В настоящее время ОАО «Петролеспорт» входит тоже в группу Global Ports. Площадь контейнерного терминала составляет 34,5 га, эксплуатационная вместимость терминала составляет 12 тыс. TEU. Терминал располагает тремя причалами, общей длиной 680 м. Расчетный грузооборот терминала составляет 1,0 млн TEU. Доставка контейнеров возможна как автомобильным, так и железнодорожным транспортом. Островное расположение терминала и нахождение его в черте города создают определенные трудности с использованием автотранспорта. Вывоз контейнеров железнодорожным транспортом незначителен как с данного терминала, так и в целом по Санкт-Петербургскому транспортному узлу.

«Первый контейнерный терминал» (ПКТ) расположен в Большом порту Санкт-Петербург и является одним из первых специализированных контейнерных терминалов в России. В настоящее время терминал также входит в группу Global Ports. Терминал располагает шестью причалами длиной 1058 м, эксплуатационная вместимость 28,8 тыс. TEU. Расчетный грузооборот составляет 1,25 млн TEU. Доставка контейнеров возможна как автомобильным, так и железнодорожным транспортом. Островное расположение терминала и нахождение его в черте города создают определенные трудности с использованием автотранспорта.

ЗАО «Контейнерный терминал Санкт-Петербург» (КТСП) располагается в Угольной гавани Большого порта Санкт-Петербурга. Терминал является совместным предприятием UCL Holding B.V. и TIL S.A. Терминал начал операционную деятельность в 2011 г., он располагает двумя причалами, длиной 479 м каждый. Общая площадь терминала составляет 32 га с емкостью склада 12 тыс. TEU. Расчетный грузооборот терминала составляет 500 тыс. TEU в год. Имея железнодорожные подъездные пути и автомобильную дорогу, терминал испытывает определенные затруднения с вывозом контейнеров автотранспортом ввиду работы железнодорожного переезда «Рыбный».

«Морской рыбный порт» (МРП) располагается на юго-западе города в четвертом грузовом районе Большого порта Санкт-Петербург в непосредственной близости от ЗАО «Контейнерный терминал Санкт-Петербург». Морской рыбный порт состоит из трех терминалов: терминала для обработки генеральных грузов, ро-ро терминала и контейнерного терминала. Контейнерный терминал начал свою работу в 2013 г. Порт располагает шестью причалами с длиной причальной стенки 670 м, площадь открытых складов порта составляет порядка 16,5 га, расчетный грузооборот — 300 тыс. TEU в год. Терминал испытывает аналогичные трудности при вывозе контейнеров, как и ЗАО «Контейнерный терминал Санкт-Петербург».

«Усть-Лужский контейнерный терминал» (УЛКТ) — первый глубоководный контейнерный терминал на Северо-Западе России. Терминал входит в группу Global Ports. УЛКТ начал работу в 2011 г. и при полном развитии он станет одним из крупных российских терминалов с глубиной у причалов до 16 м и пропускной способностью 2,6 млн TEU в год, что планируется осуществить к 2020 г. На данный момент емкость контейнерной площадки составляет 15 тыс. TEU, расчетный грузооборот — 440 тыс. TEU в год. Длина причальной линии составляет 440 м, глубина у причала — до 13,5 м. Вывоз контейнеров возможен автомобильным и железнодорожным транспортом. Обеспечено автомобильное соединение с трассой М10 «Россия». Железнодорожное сообщение осуществляется через сеть железных дорог по линии Мга – Гатчина – Веймарн – Усть-Луга, примыкающей к железнодорожной магистрали Санкт-Петербург – Таллин.

Многофункциональный морской перегрузочный комплекс «Бронка». В конце 2015 г. была введена в эксплуатацию первая очередь нового контейнерного терминала в рамках проекта порта «Бронка». На первом этапе расчетный грузооборот терминала составляет 1,45 млн TEU в год, площадь терминала 107 га, имеется пять причалов для обработки судов. Терминал обеспечен

примыканием к кольцевой автодороге, железнодорожное примыкание на первоначальном этапе осуществляется через станции Котлы и Веймарн. В дальнейшем планируется строительство прямой ветки от порта до станции Гатчина. Вторая очередь терминала должна вступить в строй в 2019 г. с увеличением пропускной способности до 1,9 млн TEU. Третья очередь планируется к завершению в 2022 г. Суммарная пропускная способность терминала составит 3 млн TEU.

На диаграмме (рис. 2, а) указаны расчетный грузооборот российских контейнерных терминалов терминалов и их процентная доля от общего грузооборота на конец 2016 г. На рис. 2, б приведена диаграмма распределения грузооборота кластера контейнерных портов Финского залива по принадлежности портов тому или иному собственнику.

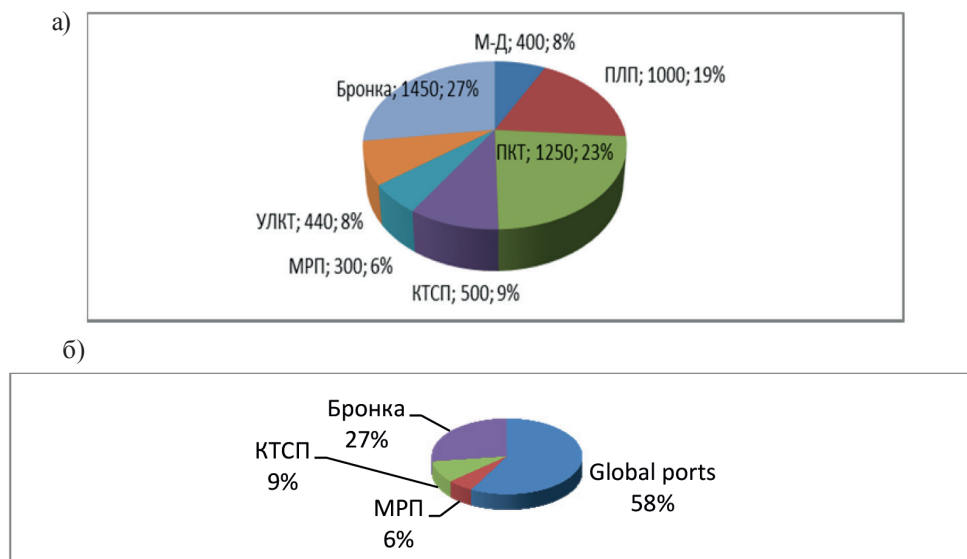


Рис. 2. Расчетный грузооборот российских контейнерных терминалов Финского залива:
а — процентная доля от общего грузооборота; б — распределение по принадлежности собственникам

В конце 2016 г. общий расчетный грузооборот основных российских контейнерных терминалов, расположенных в Финском заливе, составил около 5,3 млн TEU. Если планы ввода дополнительных мощностей УЛКТ и порта «Бронка» будут выполняться в заявленные сроки, то эта цифра вырастет в 2019 г. до 5,8 млн TEU, до 8 млн TEU в 2020 г. и до 9 млн TEU в 2022 г. [5].

К сожалению, реальные объемы контейнеризированных грузов, проходящих через Российские порты Финского залива, значительно отличаются от оптимистичных расчетных возможностей контейнерных терминалов. В настоящее время расчетные возможности контейнерных терминалов превышают существующую потребность более чем в два раза [6] — рис. 3.

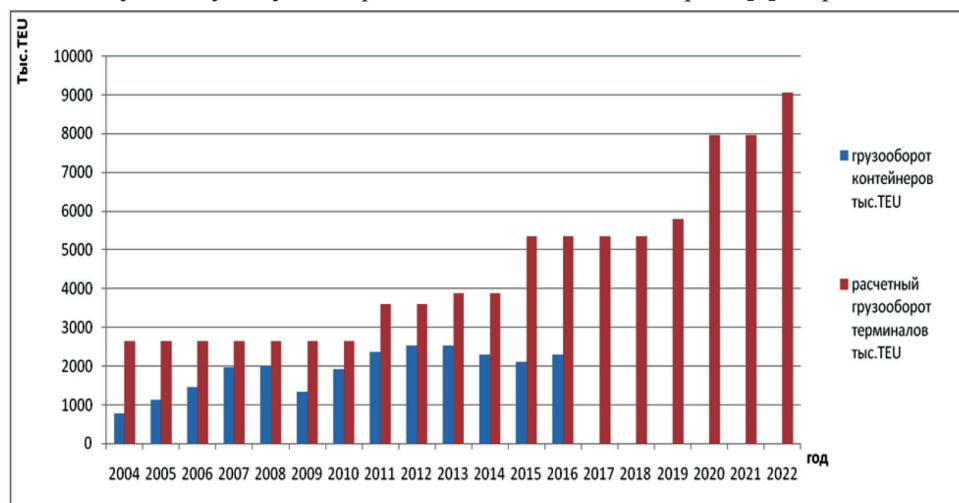


Рис. 3. Реальный и расчетный грузооборот терминалов

Сохранение существующей тенденции развития грузопотока и выполнение инвестиционных программ развития терминалов приведут к еще большей разнице между реальным контейнерным грузопотоком и возможностями терминалов. Это, безусловно, вызовет негативные последствия в части роста тарифов на перегрузку контейнеров и уменьшение доходности терминалов, что в целом отрицательно отразится на эффективности работы всей транспортно-логистической системы страны. В связи с ранее изложенным становится очевидной необходимость разработки методики оценки доходности контейнерных терминалов при их недогрузке для более адекватных обоснований инвестиций контейнерных терминалов.

Оценка доходности контейнерных терминалов при их недогрузке

Предположим для простоты, что стоимость терминала C связана с планируемым грузопотоком через него Q_0 линейной зависимостью, т. е. $C(Q_0) = AQ_0 + B$, как это условно показано на рис. 4.

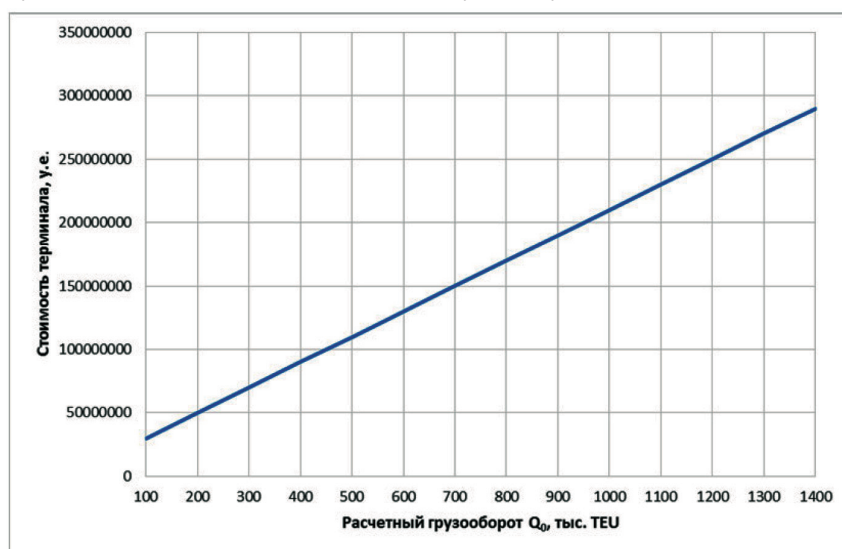


Рис. 4. Стоимость терминала в зависимости от расчетного грузопотока

В данном случае себестоимость перевалки единицы груза выражается зависимостью $c_0 = \frac{C(Q_0)}{Q_0} = A + \frac{B}{Q_0}$, откуда следует, что чем больше планируемый грузопоток порта, тем меньше себестоимость перевалки в нем [7], [8] — рис. 5.

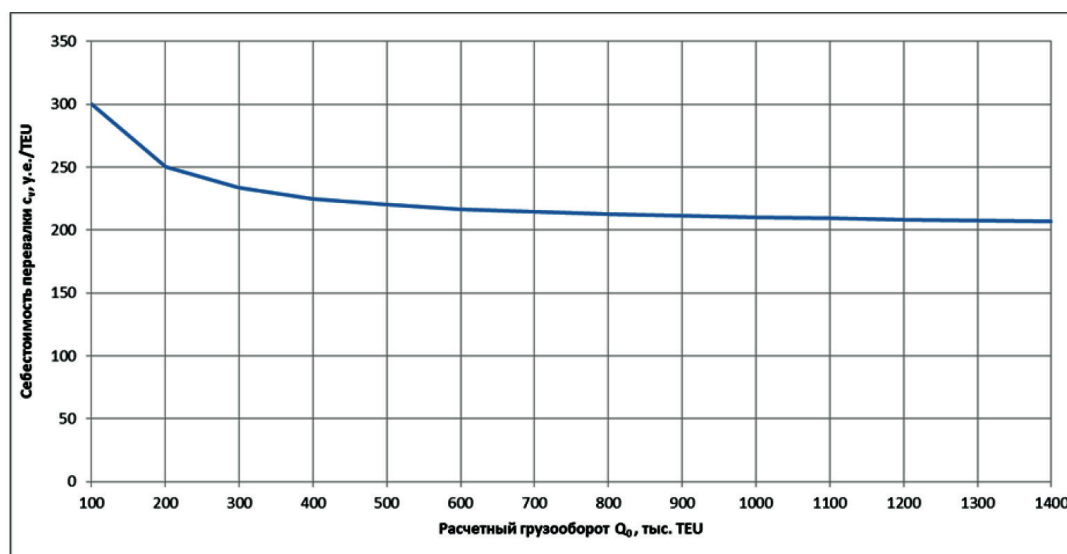


Рис. 5. Себестоимость перевалки TEU от расчетного грузопотока

Если терминал работает с недогрузкой, т. е. если реальный грузооборот терминала Q_r меньше расчетного ($Q_r < Q_0$), то себестоимость перевалки

$$c_r = \frac{C(Q_0)}{Q_r} = A \frac{Q_0}{Q_r} + \frac{B}{Q_r} = \frac{A}{k_{\text{исп}}} + \frac{B}{k_{\text{исп}} \cdot Q_0} = \frac{1}{k_{\text{исп}}} \left(A + \frac{B}{Q_0} \right) = \frac{c_0}{k_{\text{исп}}}.$$

Зависимость себестоимости в условиях недогрузки для различных по мощности терминалов: $c_r = c_r(Q_0, k_{\text{исп}})$, приведена на рис. 6.

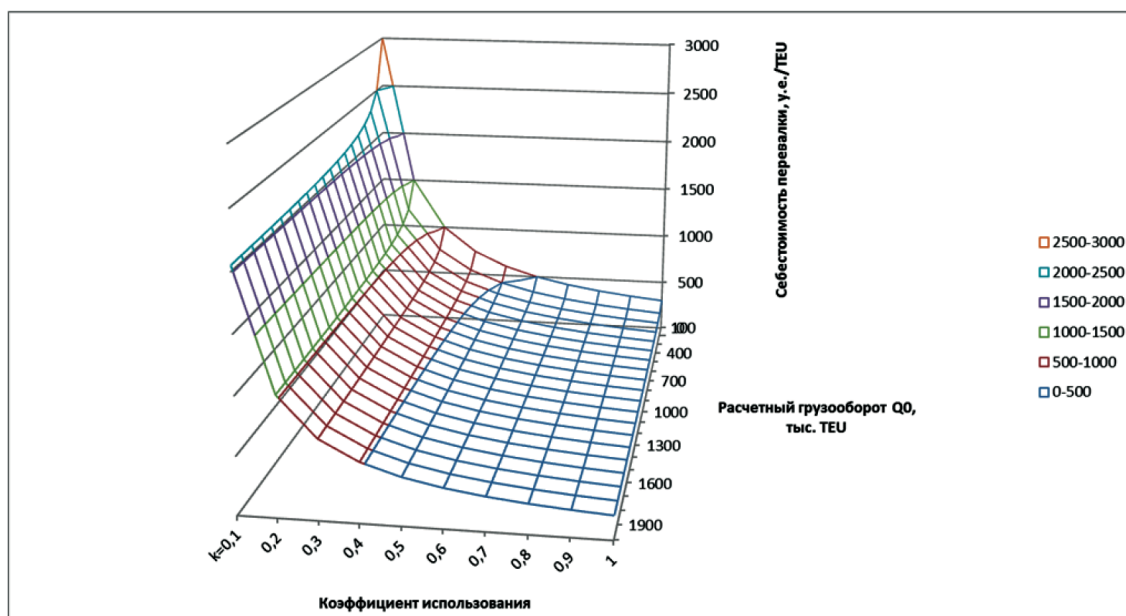


Рис. 6. Зависимость себестоимости от расчетного грузооборота и коэффициента использования

Кривая, представленная на рис. 5, в семействе кривых на рис. 6 является крайней справа (при $k_{\text{исп}} = 1$), снижаясь от значения 300 у.е. к 200 у.е. при росте расчетной мощности терминала от 100 тыс. TEU до 2000 тыс. TEU. Если грузооборот через терминал превышает его расчетную пропускную способность, он считается неприемлемым для данного терминала [9], [10]. С учетом этого себестоимость перевалки имеет вид, приведенный на рис. 7.

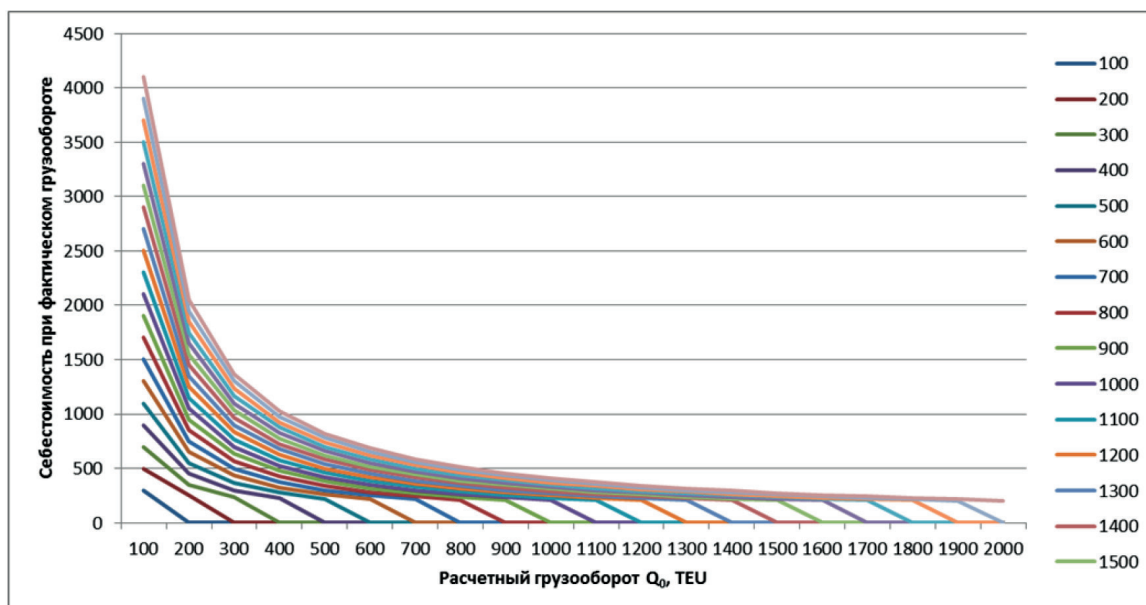


Рис. 7. Себестоимость при фактическом грузопотоке

Семейство кривых на рис. 7 повторяет поверхность, представленную на рис. 5, но «обрезает» ее при грузопотоке, большем расчетного для данного терминала, что приводит к образованию «ступеньки» на поверхности. На рис. 8 показана подобная поверхность со «ступенькой», образованная приведенными на рис. 7 зависимостями.

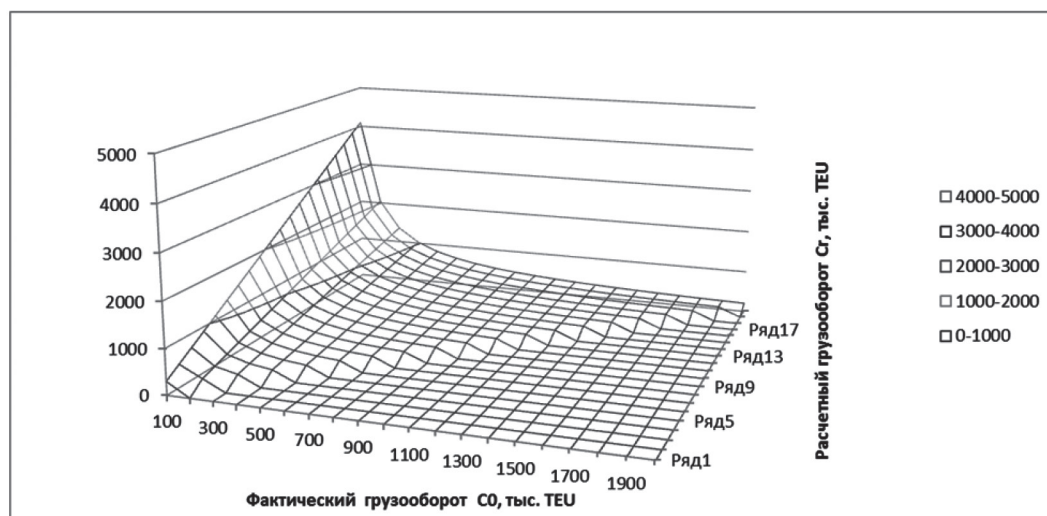


Рис. 8. Поверхности зависимости себестоимости от фактического грузопотока

При фиксированном тарифе на перевалку контейнера c_t доход от перевалки одного контейнера (TEU) составит величину $c_t - c_r$. Терминалы, себестоимость операций которых выше тарифа, теряют грузопоток (рис. 9).

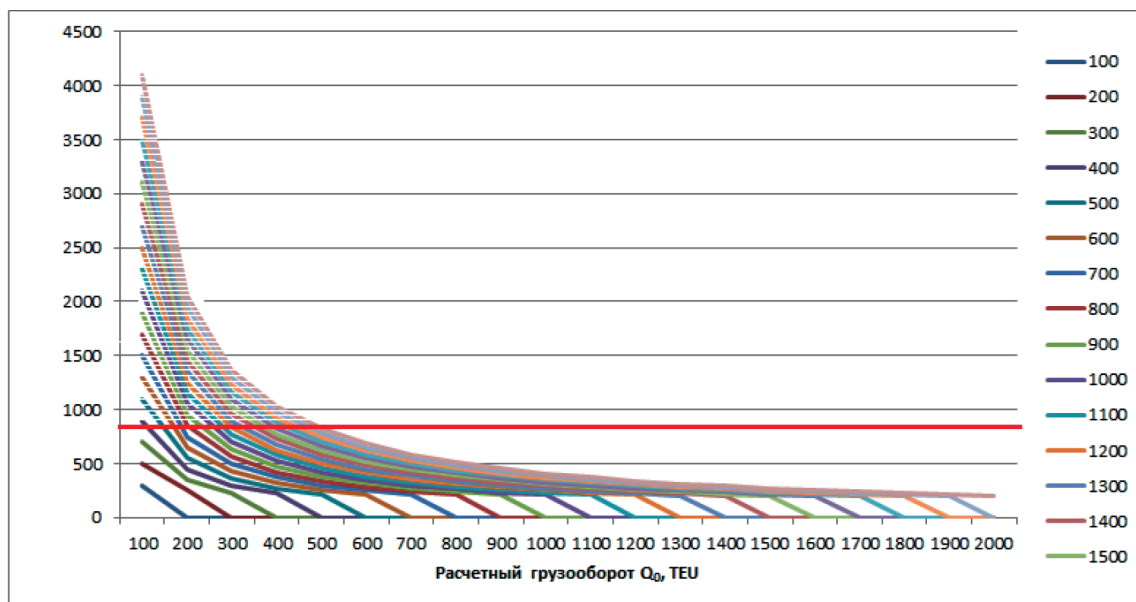


Рис. 9. Соотношение себестоимости и тарифа

Полный доход C_r от перевалки Q_r контейнеров при фиксированном тарифе c_t составит при этом величину

$$C_r = (c_t - c_r) \cdot Q_r = \left(c_t - A \frac{Q_0}{Q_r} - \frac{B}{Q_r} \right) \cdot Q_r = c_t Q_r - A Q_0 - B.$$

Соответствующая зависимость $C_r = C_r(Q_r, c_t)$ приведена на рис. 10. Для пояснения этой зависимости на рис. 11 а, б представлены отдельные кривые семейства, показывающие доходность

терминалов при фактических грузооборотах 700 тыс. TEU и 1300 TEU и фиксированном тарифе $c_T = 600$ у. е. за TEU.

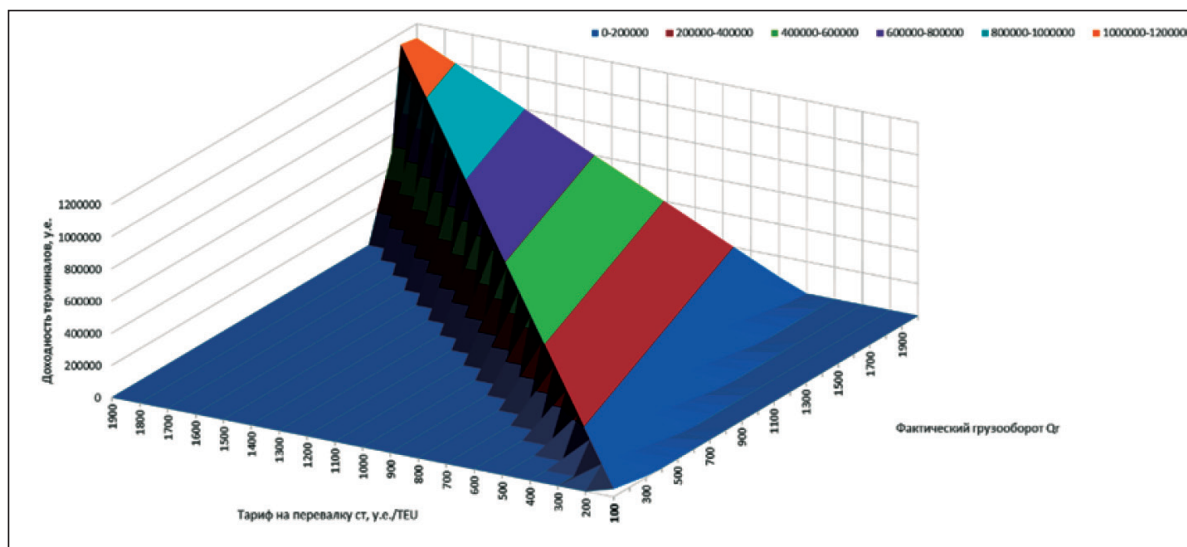


Рис. 10. Доходность терминалов в зависимости от грузооборотов

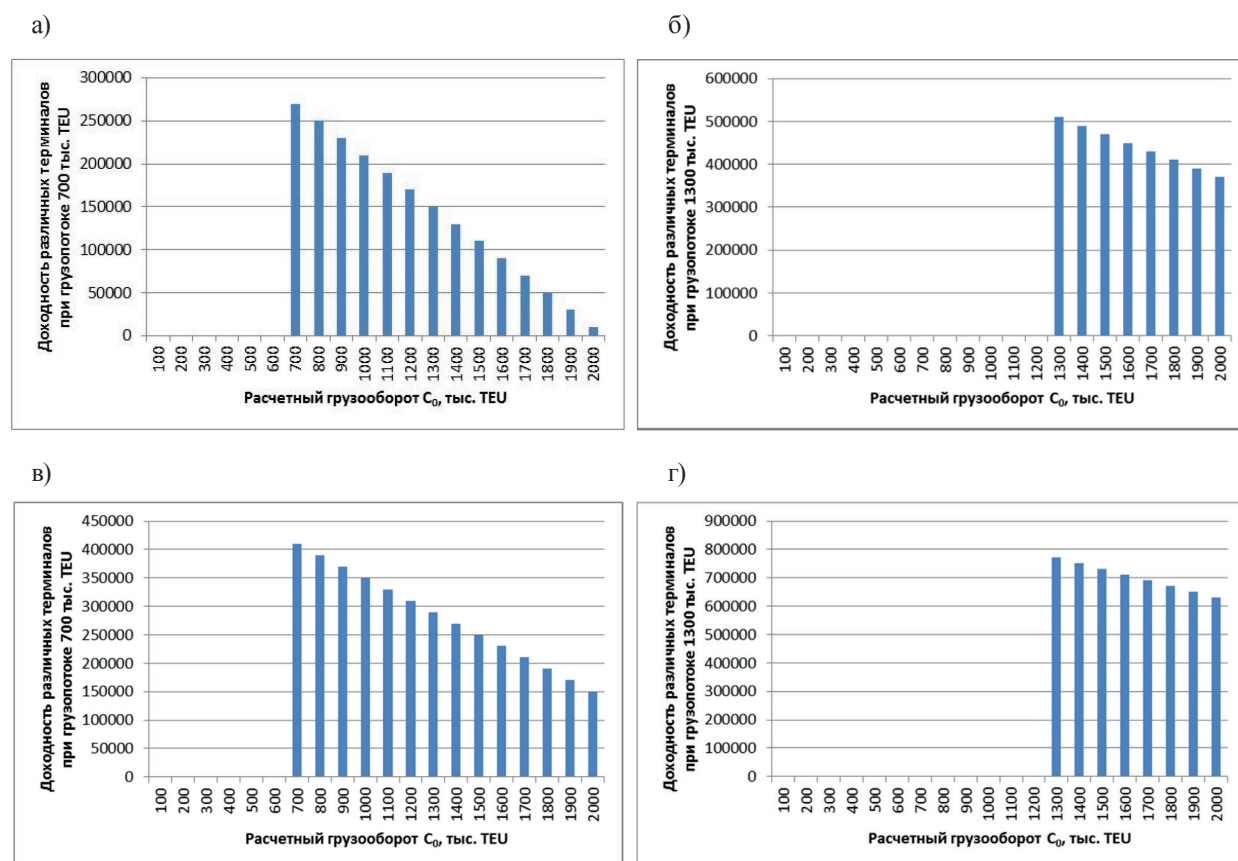


Рис. 11. Доходность терминалов при различном грузообороте:

а — 700 тыс. TEU и тарифе $c_T = 400$ у. е.; б — 1300 тыс. TEU и тарифе $c_T = 60$ у. е.;
в — 700 тыс. TEU и тарифе $c_T = 800$ у. е.; г — 1300 тыс. TEU и тарифе $c_T = 800$ у. е.

На рис. 11, в, г показаны значения доходности для тех же грузооборотов, но при тарифе $c_T = 800$ у. е. за TEU.

Выполненный анализ показывает, что доходность терминала в значительной степени зависит от близости фактического грузооборота к расчетному. Недогруженные мощности терминала являются очевидным *злом*, а приведенные на рис. 11 зависимости позволяют оценить размеры причиненных убытков для различных по величине терминалов.

Возможная точка безубыточности, т. е. минимальный фактический грузопоток $Q_+ < Q_0$, который обеспечивает нулевую доходность терминала с расчетным грузопотоком Q_0 , определяется выражением $C_r = 0 = c_T \cdot Q_+ - A Q_0 - B$, откуда следует $Q_+ = \frac{A Q_0 + B}{c_T}$. Соответствующая зависимость $Q_+ = Q_+(Q_0, c_T)$ приведена на рис. 12.

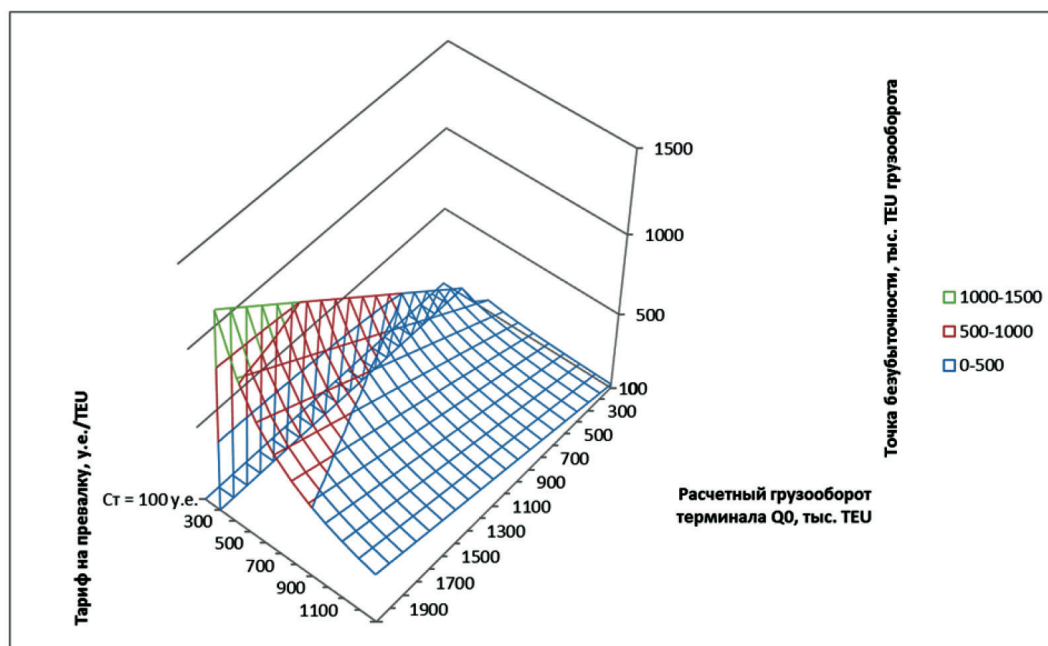


Рис. 12. Грузооборот, обеспечивающий безубыточность терминалов различной мощности

При действующем тарифе на перевалку контейнера c его доход зависит от расчетного грузооборота: $D(Q_0) = c Q_0$. При себестоимости операций терминала $C(Q_0) = A Q_0 + B$ операционный доход составляет $D(Q_0) - C(Q_0) = c Q_0 - A Q_0 - B$, что видно из рис. 12.

Выводы

Предложенная методика оценки доходности контейнерного терминала позволяет:

- оценить влияние дефицита грузооборота относительного расчетного значения пропускной способности порта;
- определить риски инвестиций для создания контейнерного терминала с выбранной пропускной способностью;
- оценить рациональность тарифов на перегрузку контейнера в зависимости от расчетного грузопотока;
- рассчитать доходность терминала при различных вариантах развития грузопотока;
- обосновать концепцию развития контейнерного порта, обеспечивающую максимальную доходность при прогнозируемых вариантах развития грузопотока.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Стратегия развития морской портовой инфраструктуры России до 2030 г. — М.: Росморпорт, 2012. — 170 с.

2. Галин А. В. Сухие порты как часть транспортной инфраструктуры. Направления развития / А. В. Галин // Вестник Государственного университета морского и речного флота имени адмирала С. О. Макарова. — 2014. — № 2 (24). — С. 87–89.
3. Кузнецов А. Л. Пространственное развитие портов / А. Л. Кузнецов, А. В. Галин // Инновации. — 2015. — № 2 (208). — С. 115–120.
4. Галин А. В. Задачи совершенствования технологического процесса наземной транспортировки контейнеризированных грузов в рамках единой системы интермодальных перевозок / А. В. Галин // Транспортное дело России. — 2013. — № 4. — С. 75–76.
5. Review of Maritime Transport 2015. — USA, New York: UNCTAD, 2015. — 122 p.
6. Кириченко А. В. Заводы и порты: механика симбиоза / А. В. Кириченко, А. Л. Кузнецов // Логистика: современные тенденции развития. — Ч. 1: материалы XV Межд. науч.-практ. конф. — СПб.: Изд-во ГУМРФ им. адм. С. О. Макарова, 2016. — С. 157–160.
7. Кузнецов А. Л. Кибернетический метод управления развитием морских портов / А. Л. Кузнецов, А. В. Галин // Вестник Астраханского государственного технического университета. Серия: Морская техника и технология. — 2016. — № 3. — С. 93–97.
8. Кузнецов А. Л. Имитационное моделирование как инструмент проектирования морских и наземных контейнерных терминалов / А. Л. Кузнецов, В. А. Блудкина // Тезисы докладов научно-технической конференции профессорско-преподавательского состава, научных сотрудников и курсантов. — СПб.: Изд-во ГМА им. адм. С. О. Макарова, 2008. — С. 237–240.
9. Кузнецов А. Л. Базовая модель логистических потоков через контейнерный терминал / А. Л. Кузнецов, Е. Ю. Козлова // Эксплуатация морского транспорта. — 2008. — № 2. — С. 18–20.
10. Кузнецов А. Л. Синергетика как методологическая основа развития базовой инфраструктуры портоориентированной логистики / А. Л. Кузнецов, А. В. Галин, А. В. Кириченко // Вестник Государственного университета морского и речного флота имени адмирала С. О. Макарова. — 2016. — № 6 (40). — С. 19–34. DOI: 10.21821/2309-5180-2016-8-6-19-34.

REFERENCES

1. Strategija razvitija morskoy portovoj infrastruktury Rossii do 2030 g. M.: Rosmorport, 2012.
2. Galin, A. V. “Dry ports as part of inland transport system. Directions of development.” *Vestnik Gosudarstvennogo universiteta morskogo i rechnogo flota imeni admirala S. O. Makarova* 2(24) (2014): 87–92.
3. Kuznetsov, A. L., and A. V. Galin. “Spatial development of ports.” *Innovations* 2(208) (2015): 115–120.
4. Galin, A. V. “Problems of development of the containerized cargo land transportation in the frames of general intermodal transportation system.” *Transport business of Russia* 4 (2013): 75–76.
5. Review of Maritime Transport 2015. USA, New York: UNCTAD, 2015.
6. Kirichenko, A. V., and A. L. Kuznetsov. “Plants and ports: mechanics symbiosis.” *Logistika: sovremennye tendencii razvitija. Ch. I: materialy XV Mezhdunarodnoj nauchno-prakticheskoy konferencii*. SPb.: Federalnoe gosudarstvennoe bjudzhethoe obrazovatelnoe uchrezhdenie vysshego obrazovaniya Gosudarstvennyj universitet morskogo i rechnogo flota im. admirala S. O. Makarova, 2016: 157–160.
7. Kuznetsov, A. L., and A. V. Galin. “Cybernetic method of management of development of sea ports.” *Vestnik of Astrakhan State Technical University. Series: Marine Engineering and Technologies* 3 (2016): 93–97.
8. Kuznetsov, A. L., and V. A. Bludkina. “Imitacionnoe modelirovanie kak instrument proektirovaniya morskikh i nazemnykh kontejnernykh terminalov.” *Tezisy dokladov nauchno-tehnicheskoy konferencii professorsko-prepodavatel'skogo sostava, nauchnykh sotrudnikov i kursantov*. SPb.: Izd-vo GMA im. adm. S. O. Makarova, 2008: 237–240.
9. Kuznetsov, A. L., and E. Yu. Kozlova. “Basic model of logistical flows through container terminal.” *Jeksploatacija morskogo transporta* 2 (2008): 18–20.
10. Kuznetsov, A. L., A. V. Galin, and A. V. Kirichenko. “The synergy as the methodological approach for the basical infrastructure of port-oriented logistics.” *Vestnik Gosudarstvennogo universiteta morskogo i rechnogo flota imeni admirala S. O. Makarova* 6(40) (2016): 19–34. DOI: 10.21821/2309-5180-2016-8-6-19-34.

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

Кузнецов Александр Львович —

доктор технических наук, профессор
ФГБОУ ВО «ГУМРФ имени
адмирала С.О. Макарова»
198035, Российская Федерация, Санкт-Петербург,
ул. Двинская, 5/7
e-mail: thunder1950@yandex.ru, kaf_pgt@gumrf.ru

Галин Александр Валентинович —

кандидат технических наук, доцент
ФГБОУ ВО «ГУМРФ имени
адмирала С.О. Макарова»
198035, Российская Федерация, Санкт-Петербург,
ул. Двинская, 5/7
e-mail: galin2403@gmail.com, kaf_uts@gumrf.ru

Горынцев Михаил Николаевич —

кандидат технических наук, первый заместитель
генерального директора по проектированию,
изысканиям и научным исследованиям
в области морского транспорта
АО «ЛЕНМОРНИИПРОЕКТ»
198035, Российская Федерация, Санкт-Петербург,
Межевой канал, д. 3, корп. 2
e-mail: mikhail.goryntsev@lmniip.spb.ru

INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Kuznetsov, Aleksandr L. —

Dr. of Technical Sciences, professor
Admiral Makarov State University
of Maritime and Inland Shipping
5/7 Dvinskaya Str., St. Petersburg 198035,
Russian Federation
e-mail: thunder1950@yandex.ru, kaf_pgt@gumrf.ru

Galin, Aleksandr V. —

PhD, associate professor
Admiral Makarov State University
of Maritime and Inland Shipping
5/7 Dvinskaya Str., St. Petersburg 198035,
Russian Federation
e-mail: galin2403@gmail.com, kaf_uts@gumrf.ru

Goryntsev, Mikhail N. —

PhD, first deputy of general director
on design, investigations
and scientific research
in the field of the marine transport
LENMORNIIPROEKT JSC
3 Mezhevoy kanal, korp. 2, St. Petersburg, 198035,
Russian Federation
e-mail: mikhail.goryntsev@lmniip.spb.ru

Статья поступила в редакцию 16 января 2017 г.

Received: January 16, 2017.

THE DEVELOPMENT OF THE FUNCTIONAL MODEL FOR THE “DRY PORT” TYPE CONTAINER TERMINAL AND PRINCIPLES OF ITS USE IN THE TECHNOLOGIC DESIGN

V. N. Shcherbakova-Slyusarenko¹, V. A. Pogodin², A. S. Tkachenko¹

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

2 — MorstroytechnologyLLC, St. Petersburg, Russian Federation

The paper states that the functional models form the basis for the technological design of modern port and container terminals, both for flow calculations and object-oriented approaches. A sequence of this statement is that the degree of the model's adequacy establishes natural methodological boundaries for the accuracy of the design procedures built on this platform, defines their calculation efficiency and robustness. The models of this kind should provide the universality, i.e. the ability to reflect the properties not of a single object, but a certain class of objects. The classes should be as wide as possible. In addition, the models should be not only parametrical, but also parametrisable, changing their structures with selection of certain control parameters/ The development of these models for sea ports and terminals took decades for its realization. The studies resulted into creation of a set of sufficiently universality, efficiency and adaptivity. The paper shows that new infrastructural objects of the global container distribution systems, i.e. “dry ports”, have important new properties and demands not covered by the mentioned existing models. The practice of development and further exploitation of these infrastructural object revealed the non-isomorphism of the basic underlying logistic processes of these two terminal clusters. The authors put forward the demands and specifications for development of the new models for this kind of terminals and discuss the design procedures built over this platform.

Keywords: dry ports, functional model, technologic design.

For citations:

Shcherbakova-Slyusarenko, Victoria N., Vladimir A. Pogodin, and Andrei S. Tkachenko. “The development of the functional model for the “dry port” type container terminal and principles of its use in the technologic design.” *Vestnik Gosudarstvennogo universiteta morskogo i rechnogo flota imeni admirala S.O. Makarova* 9.1 (2017): 48–60. DOI: 10.21821/2309-5180-2017-9-1-48-60.

УДК 625

РАЗРАБОТКА ФУНКЦИОНАЛЬНОЙ МОДЕЛИ КОНТЕЙНЕРНОГО ТЕРМИНАЛА ТИПА «СУХОЙ ПОРТ» И ПРИНЦИПОВ ЕЕ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ В ТЕХНОЛОГИЧЕСКОМ ПРОЕКТИРОВАНИИ

В. Н. Щербакова-Слюсаренко¹, В. А. Погодин², А. С. Ткаченко¹

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

2 — ООО «Морстройтехнология», Санкт-Петербург, Российская Федерация

В статье показано, что функциональные модели в современной практике проектирования портов и грузовых терминалов составляют основу для расчета всех технологических и эксплуатационных параметров, как с помощью потоковых вычислений, так и в объектно-ориентированных технологиях. Отсюда выводится тезис о том, что степень соответствия модели изучаемому объекту принципиально устанавливает границы методических возможностей процедур, построенных на этих моделях, определяет их результативность и вычислительную эффективность. Модели подобного рода должны обеспечивать универсальность, понимаемую как способность отражать изучаемые свойства не конкретных объектов, а целых объектных классов, возможно, более широких. Кроме того, модель должна являться не только параметрической, но и структурно параметризуемой, т. е. меняющей свою структуру путем выбора управляющих параметров. Создание подобных моделей морских портов и далее морских контейнерных терминалов потребовало десятилетий исследований, в результате которых транспортная наука сформулировала несколько моделей достаточной общности, адаптивности и эффективности. В статье показана

но, что новые инфраструктурные элементы системы контейнерного грузораспределения, «сухие порты» или наземные контейнерные терминалы обладают новыми характеристиками и свойствами, отражающими иные требования к их функциональности. Практика проектирования и последующей эксплуатации подобных терминалов выявила неизоморфность базовых логистических процессов этих двух классов инфраструктурных объектов. Авторами сформулированы требования к аналогичной модели для наземного терминала типа «сухой порт» и описана разработка именно такой модели, обладающей универсальностью в отношении моделируемого класса объектов, допускающей параметрическую и структурную параметризацию, а также ориентированной на удобство практического использования, адекватной и эффективной в отношении построения на ее основе конкретных расчетных процедур.

Ключевые слова: сухие порты, функциональная модель, технологическое проектирование.

Для цитирования:

Щербакова-Слюсаренко В. Н. Разработка функциональной модели контейнерного терминала типа «сухой порт» и принципов ее использования в технологическом проектировании / В. Н. Щербакова-Слюсаренко, В. А. Погодин, А. С. Ткаченко // Вестник Государственного университета морского и речного флота имени адмирала С. О. Макарова. — 2017. — Т. 9. — № 1. — С. 48–60. DOI: 10.21821/2309-5180-2017-9-1-48-60.

**Общая характеристика проблемной области
и постановка задачи исследования**

Технологическое проектирование как ключевой элемент процедуры создания транспортных терминалов развивается достаточно давно [1], [2]. Постепенная эволюция технологии грузоперевозок (и в еще большей степени наблюдавшаяся в конце XX столетия ее революция) привели к фундаментальному изменению принципов проектирования [3], [4]. Одновременно наблюдавшийся рост требований к качеству конечного результата, вызванный увеличением капиталоемкости проектов и давлением обострившейся конкуренции на рынке контейнерных перевозок, привел к радикальному изменению инструментальных средств проектирования. Поиски решения возникших в указанной сфере методологических проблем облегчал сопутствующий прогресс общей методологии научного знания и стремительное развитие информационных технологий. Новая парадигма методологии технологического проектирования контейнерных терминалов в значительной мере опиралась на достижения этих фундаментальных дисциплин [5], [6].

В основе методов, составлявших инструментарий методологии технологического проектирования, лежала *базовая модель операций терминала*. Качество получаемых результатов и широта сферы использования методов обуславливалась ее фундаментальными свойствами, характеризующими адекватность модели, ее эффективность и удобство в использовании. Степень соответствия модели изучаемому объекту принципиально устанавливает границы методических возможностей процедур, построенных на основе этих моделей, определяет их результативность и вычислительную эффективность.

Желательным свойством моделей этого рода является универсальность, понимаемая как способность отражать изучаемые свойства не конкретных объектов, а целых объектных классов, возможно более широких. В этом смысле модель должна являться не только параметрической, но и структурно параметризуемой, т. е. меняющей свою структуру за счет выбора набора управляющих параметров. Создание подобных моделей морских портов и далее морских контейнерных терминалов потребовало десятилетий исследований, в результате которых транспортная наука сформулировала несколько моделей достаточной общности, адаптивности и эффективности. Общая структура одной из наиболее полных, адаптивных и эффективных моделей, ориентированных на удобство реализации и обладающей доказанной адекватностью [7], показана на рис. 1.

Описание различных эффективных предметных методик, построенных на основе данной модели, приведено в работах [7], [8].

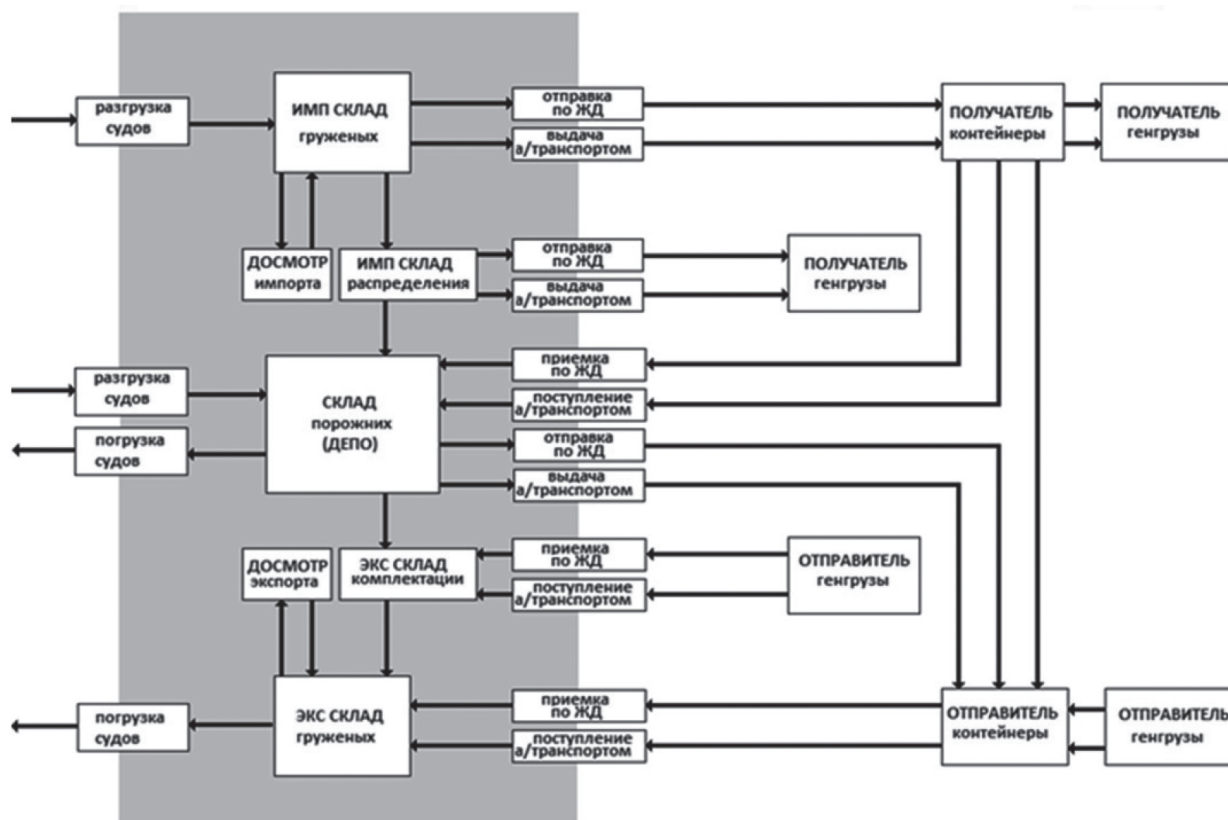


Рис. 1. Общая функциональная модель морского контейнерного терминала

Появившиеся в последние десятилетия новые инфраструктурные элементы системы контейнерного грузораспределения, «сухие порты» или наземные контейнерные терминалы обладают некоторыми новыми характеристиками и эмерджентными свойствами, отражающими иные внешние требования к их функциональности. Внешняя схожесть технологических и логистических процессов, маршрутизации грузопотоков и видов их преобразования, используемого подъемно-транспортного оборудования и иных операционных ресурсов позволяла надеяться если не на универсальность, то, по крайней мере, на достаточную робастность найденных для морских терминалов решений. В то же время практика проектирования и последующей эксплуатации подобных терминалов достаточно быстро выявила неизоморфность базовых логистических процессов этих двух смежных классов инфраструктурных объектов. Внешним проявлением этого противоречия явился недостаточный уровень качества технологических проектов, не обеспечивающий требуемого уровня экономической эффективности для владельцев и качества услуг для клиентов.

Опыт, накопленный при синтезе модели морского терминала и построения на ее основе базовых проектных процедур, позволил сформулировать достаточно четкие и однозначные требования к подобной модели для наземного терминала типа «сухой порт» [9], [10]. В данной публикации описывается разработка именно такой модели, обладающей универсальностью в отношении моделируемого класса объектов, допускающей адаптацию и структурную параметризацию, ориентированной на удобство практического использования, адекватной и эффективной в отношении построения на ее основе конкретных расчетных процедур.

Описание обобщенной функциональной модели терминала типа «сухой порт»

С точки зрения транспортной логистики морской порт обслуживает морской и речной транспорт, связывая его со смежными видами транспорта — железнодорожным и автомобильным. Терминал типа «сухой порт» в этом отношении представляется более простым узлом, поскольку

морской транспорт исключен из его функционального назначения. Принципиальным различием контейнерного терминала типа «сухой порт» является иной состав и структура внутренних грузопотоков. Если морской контейнерный терминал через причальный грузовой порт переваливает лишь контейнерные грузы, то в «сухом порту» все грузовые фронты принимают и отправляют все виды грузов: генеральные, груженные и порожние контейнеры.

Кроме того, у морского контейнерного терминала четко прослеживается лидирующий вид транспорта (и, соответственно, грузопотоков) — морской, определяющий логику, дисциплину и логику его работы. У сухопутного терминала такого вида транспорта нет, поскольку и железная дорога, и автомобильный транспорт завозят все виды грузов. Кроме того, различные размеры железнодорожных отправок (вагоны, секции, составы) не во всех случаях реализуют его лидирующую роль по провозной способности.

Различна и принадлежность потоков через грузовые фронты «сухого порта»: часть из них связывает его с обслуживаемым хинтерлендом, а часть — с портом, через который осуществляется доступ к форленду. Как следствие указанные грузопотоки имеют разные приоритеты, структуру, объемы и ритмичность. Наконец, в функциональный спектр «сухих портов» входят самые разнообразные логистические услуги добавления стоимости, а именно: перетарка грузов, преобразование грузовых партий, доработка, изменение упаковки, маркировка, ремонт, взвешивание, сюрвейерские операции и многое другое.

Указанные особенности приводят к тому, что универсальная и параметризуемая модель морского порта, показанная на рис. 1, оказывается неадекватной и неэффективной для терминалов типа «сухой порт». Предпринятые для практических целей попытки ее адаптации и доработки не привели к успеху, что заставило полностью пересмотреть структуру модели. Результатом этого явилась функциональная модель, структура которой показана на рис. 2.

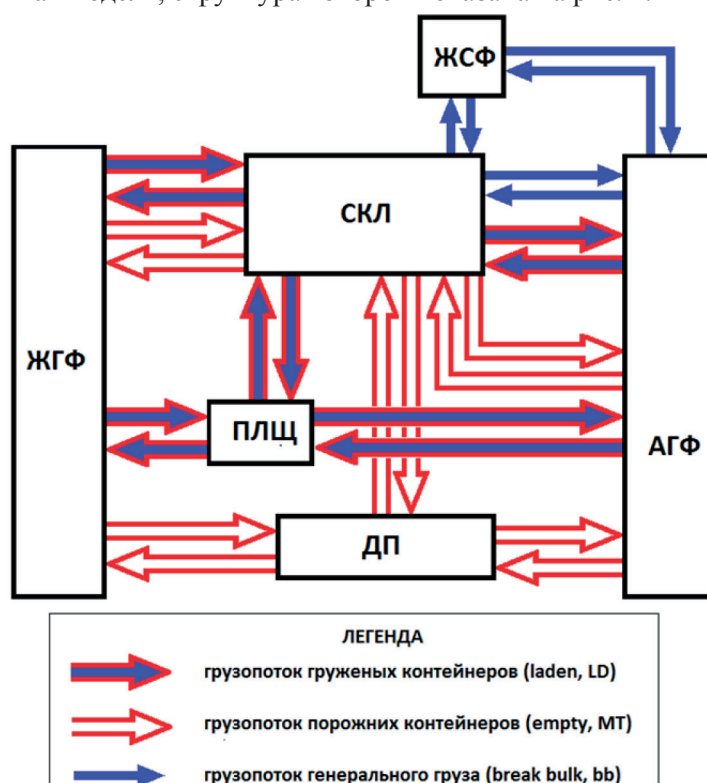


Рис. 2. Общая функциональная модель терминала типа «сухой порт»

Элементами функциональной модели являются железнодорожный грузовой фронт для контейнерных платформ (ЖГФ), железнодорожный складской фронт (ЖСФ) для генеральных грузов, автомобильный грузовой фронт (АГФ) для всех грузов, включая порожние контейнеры, площадку

открытого хранения контейнеров (ПЛЦ), склад комплектации (СКЛ), депо порожних контейнеров. Функциональными связями элементов являются внутренние грузопотоки между ними.

Кроме указанных на рис. 2 внутренних грузопотоков, в свою очередь индуцированных внешними грузопотоками терминала с целью их преобразования, имеют место специальные грузопотоки, определяемые необходимостью проведения различных видов инспекций, досмотров и ремонтных процедур. Каждая функциональная связь модели, выраженная своим внутренним грузопотоком, представляет отдельную операцию. Все операции пронумерованы и обладают своим уникальным идентификатором (рис. 3).

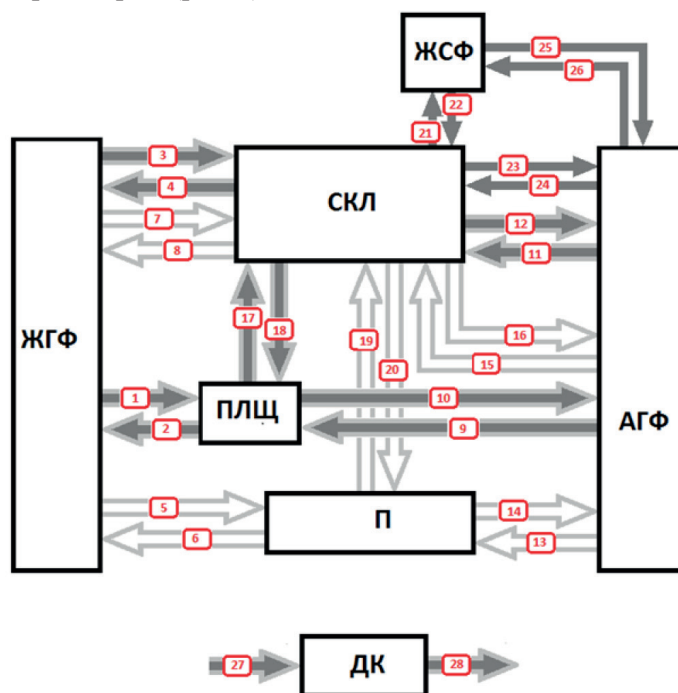


Рис. 3. Идентификация операций терминала

Реализация каждой операции требует определенных ресурсов: технологического оборудования, персонала, горюче-смазочных материалов, электроэнергии, площадей открытых складов, производственных зданий и сооружений. Основополагающей «независимой переменной» — ресурсом, во многом определяющим требования к остальным (зависимым) ресурсам, является именно технологическое оборудование, необходимое для выполнения операций. Приведем описание методики оценки потребности оборудования для выполнения указанных операций.

Использование функциональной модели терминала для оценки требований к ресурсам

С точки зрения исследования операций технологическое оборудование является самым динамичным и комплексным ресурсом, необходимым для выполнения всех операций, показанных на рис. 2 и 3. Спектр основного технологического оборудования, которое может быть использовано при выполнении операций контейнерного терминала типа «сухой порт», представлен на рис. 4.

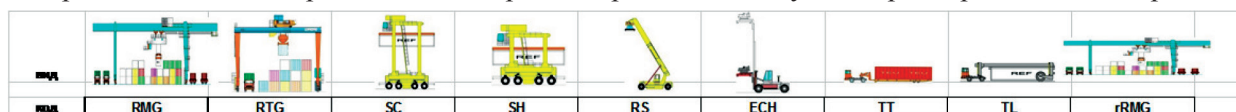


Рис. 4. Основное технологическое оборудование

Каждая технологическая операция в общем случае состоит из перемещения контейнера из одной точки пространства (начальной позиции) в другую (конечную позицию). В этом смыс-

ле каждая операция может быть разбита на несколько универсальных элементарных движений: выбор контейнера из его начального положения и помещение на поверхность терминала, подъем контейнера с поверхности терминала и помещение его на транспортное средство, перемещение контейнера транспортным средством к месту назначения, снятие контейнера с транспортного средства и помещение его на поверхность терминала, подъем контейнера с поверхности терминала и помещение его в конечную позицию (рис. 5).



Рис. 5. Элементарные составные движения операции

Исходя из этого, каждая операция, показанная на рис. 3, может быть описана в терминах используемого в ней оборудования, приведенного на рис. 4. Некоторые виды оборудования позволяют совмещать элементарные движения, вплоть до выполнения ими всей операции. С учетом указанных особенностей, операции задаются прямым перечислением оборудования, которое выполняет входящее в нее элементарное движение. Иными словами, это описание приобретает вид строгой формальной кодировки, пример которой для конкретного терминала приведен в табл. 1.

Таблица 1

Кодировка операций в терминах технологического оборудования

№ п/п.	Содержание операции	$a - b$	$b - c$	$c - d$	$d - e$	$e - f$
1	Груженный контейнер ЖГФ – ПЛЩ	RS		TT		RTG
2	Груженный контейнер ПЛЩ – ЖГФ	RTG		TT		RS
3	Груженный контейнер ЖГФ – СКЛ			RS		
4	Груженный контейнер СКЛ – ЖГФ			RS		
5	Порожний контейнер ЖГФ – ДП	RS		TT		ECH
6	Порожний контейнер ДП – ЖГФ	ECH		TT		RS
7	Порожний контейнер ЖГФ – СКЛ			RS		
8	Порожний контейнер СКЛ – ЖГФ			RS		
9	Груженный контейнер АГФ – ПЛЩ			RTG		
10	Груженный контейнер ПЛЩ – АГФ			RTG		
11	Груженный контейнер АГФ – СКЛ					
12	Груженный контейнер СКЛ – АГФ					
13	Порожний контейнер АГФ – ДП			ECH		
14	Порожний контейнер ДП – АГФ			ECH		
15	Порожний контейнер АГФ – СКЛ			ECH		
16	Порожний контейнер СКЛ – АГФ			ECH		
17	Груженные ПЛЩ – СКЛ			RS		
18	Груженные СКЛ – ПЛЩ			RS		
19	Порожние ДП – СКЛ			ECH		
20	Порожние СКЛ – ДП			ECH		
21	Генгрузы СКЛ – ЖСК					
22	Генгрузы ЖСК – СКЛ					
23	Генгрузы СКЛ – АГФ					
24	Генгрузы АГФ – СКЛ					
25	Генгрузы ЖСК – АГФ					
26	Генгрузы АГФ – ЖСК					
27	Доставка на досмотр			RS		
28	Доставка с досмотра			RS		

Коды операций на рис. 3 соответствуют порядковым номерам табл. 1. На основании этой кодировки может быть сформирована матрица участия технологического оборудования в технологических операциях, пример которой дан в табл. 2.

Таблица 2

Матрица использования оборудования в операциях

№ п/п.	Содержание операции	Коды оборудования для описания операций терминала								
		<i>RMG</i>	<i>RTG</i>	<i>SC</i>	<i>SH</i>	<i>RS</i>	<i>ECH</i>	<i>TT</i>	<i>TL</i>	<i>rRMG</i>
		Матрица участия оборудования в операции								
1	Груженный контейнер ЖГФ – ПЛЩ	0	1	0	0	1	0	1	0	0
2	Груженный контейнер ПЛЩ – ЖГФ	0	1	0	0	1	0	1	0	0
3	Груженный контейнер ЖГФ – СКЛ	0	0	0	0	1	0	0	0	0
4	Груженный контейнер СКЛ – ЖГФ	0	0	0	0	1	0	0	0	0
5	Порожний контейнер ЖГФ – ДП	0	0	0	0	1	1	1	0	0
6	Порожний контейнер ДП – ЖГФ	0	0	0	0	1	1	1	0	0
7	Порожний контейнер ЖГФ – СКЛ	0	0	0	0	1	0	0	0	0
8	Порожний контейнер СКЛ – ЖГФ	0	0	0	0	1	0	0	0	0
9	Груженный контейнер АГФ – ПЛЩ	0	1	0	0	0	0	0	0	0
10	Груженный контейнер ПЛЩ – АГФ	0	1	0	0	0	0	0	0	0
11	Груженный контейнер АГФ – СКЛ	0	0	0	0	0	0	0	0	0
12	Груженный контейнер СКЛ – АГФ	0	0	0	0	0	0	0	0	0
13	Порожний контейнер АГФ – ДП	0	0	0	0	0	1	0	0	0
14	Порожний контейнер ДП – АГФ	0	0	0	0	0	1	0	0	0
15	Порожний контейнер АГФ – СКЛ	0	0	0	0	0	1	0	0	0
16	Порожний контейнер СКЛ – АГФ	0	0	0	0	0	1	0	0	0
17	Груженные ПЛЩ – СКЛ	0	0	0	0	1	0	0	0	0
18	Груженные СКЛ – ПЛЩ	0	0	0	0	1	0	0	0	0
19	Порожние ДП – СКЛ	0	0	0	0	0	1	0	0	0
20	Порожние СКЛ – ДП	0	0	0	0	0	1	0	0	0
21	Генгрузы СКЛ – ЖСК	0	0	0	0	0	0	0	0	0
22	Генгрузы ЖСК – СКЛ	0	0	0	0	0	0	0	0	0
23	Генгрузы СКЛ – АГФ	0	0	0	0	0	0	0	0	0
24	Генгрузы АГФ – СКЛ	0	0	0	0	0	0	0	0	0
25	Генгрузы ЖСК – АГФ	0	0	0	0	0	0	0	0	0
26	Генгрузы АГФ – ЖСК	0	0	0	0	0	0	0	0	0
27	Доставка на досмотр	0	0	0	0	1	0	0	0	0
28	Доставка с досмотра	0	0	0	0	1	0	0	0	0

Внутренние грузопотоки морского терминала относительно просто и адекватно описываются долями импорта и экспорта в полном грузообороте, соотношением груженых и порожних контейнеров в морском и сухопутном направлении, долей их растарки и затарки на складе терминала, относительными объемами завоза и вывоза смежным транспортом.

В случае терминала типа «сухой порт» подобное представление получить достаточно сложно. Для решения этой проблемы грузооборот терминала, который планируется осваивать в течение того или иного планируемого периода времени, формируется как совокупность отдельных клиентских потоков, заданных или предполагаемых: входящих на терминал, проходящих через него и покидающих терминал своими собственными маршрутами. Технологические маршруты клиентских грузопотоков, или процессы терминала, кодируются в терминах операций, необходимых для их реализации. Пример описания процессов терминала на основе кодировки клиентских

потоков, формирующих годовой грузооборот, приведен в табл. 3, откуда видно, что задание частных грузопотоков позволяет сформировать представление о полном грузопотоке контейнеров через исследуемый терминал (371 тыс. TEU в данном примере), равно как и об объеме их перевалки (общего количества их перемещений при прохождении терминала, в данном случае 515 тыс. TEU).

Таблица 3

Матрица частных процессов терминала

№ пп.	Содержание операции	Поток 1	Поток 2	Поток 3	Поток 4	Поток 5	Поток 6
		43680	43680	40000	60000	40000	40000
1	Груженный контейнер ЖГФ – ПЛЩ	1		1			
2	Груженный контейнер ПЛЩ – ЖГФ						
3	Груженный контейнер ЖГФ – СКЛ						
4	Груженный контейнер СКЛ – ЖГФ						
5	Порожний контейнер ЖГФ – ДП						
6	Порожний контейнер ДП – ЖГФ		1	1			
7	Порожний контейнер ЖГФ – СКЛ						
8	Порожний контейнер СКЛ – ЖГФ						
9	Груженный контейнер АГФ – ПЛЩ				1		
10	Груженный контейнер ПЛЩ – АГФ	1					
11	Груженный контейнер АГФ – СКЛ						
12	Груженный контейнер СКЛ – АГФ						
13	Порожний контейнер АГФ – ДП		1				
14	Порожний контейнер ДП – АГФ						
15	Порожний контейнер АГФ – СКЛ						
16	Порожний контейнер СКЛ – АГФ				1		
17	Груженные ПЛЩ – СКЛ			1	1		
18	Груженные СКЛ – ПЛЩ						
19	Порожние ДП – СКЛ						
20	Порожние СКЛ – ДП			1			
21	Генгрузы СКЛ – ЖСК						
22	Генгрузы ЖСК – СКЛ						
23	Генгрузы СКЛ – АГФ						
24	Генгрузы АГФ – СКЛ						
25	Генгрузы ЖСК – АГФ						
26	Генгрузы АГФ – ЖСК						
27	Доставка на досмотр						
28	Доставка с досмотра						

Математическая процедура получения указанных данных достаточно проста и компактна. Объемы частных клиентских потоков в количестве n или процессы терминала составляют вектор-столбец (вторая строка матрицы на рис. 8):

$$\overline{Q_{n \times 1}^p} = \{q_1^0, q_2^0, \dots, q_n^0\} = \{43680, 43680, 40000, 60000, 40000, 40000\}.$$

Введем в рассмотрение матрицу частных процессов терминала M^{pr} с размерностью $m \times n$, где m — число технологических операций. Ее общий элемент $M_{m \times n}^{pr} = m_{i,j}$ равен единице, если процесс j требует участия операции i , и нулю, если такой операции не требуется. Векторное умножение слева матрицы на вектор-столбец $M_{m \times n}^{pr} \cdot \overline{Q_{n \times 1}^p} = \overline{Q_{1 \times n}^o}$ дает вектор-столбец требуемого объема каждой операции (последний столбец табл. 4).

Таблица 4

Расчет требуемого числа операций

№ пп.	Поток 1	Поток 2	Поток 3	Поток 4	Поток 5	Поток 6	Год. объем
	43680	43680	40000	60000	40000	40000	
1	1		1				83680
2							
3							
4							
5							
6		1	1				83680
7							
8							
9				1			60000
10	1						43680
11							
12							
13		1					43680
14							
15							
16				1			60000
17			1	1			100000
18							
19							
20			1				40000
21							
22							
23							
24							
25							
26							
27							
28							

Каждая операция имеет свой график выполнения, определяемый отведенным для ее реализации временем и расписанием. Например, операции обработки железнодорожного транспорта могут выполняться круглогодично и круглосуточно (7/24), склад комплектации может работать в две смены без выходных, таможенный досмотр производится в одну смену по рабочим дням и т. д. Отсюда средняя часовая интенсивность двух операций может быть различна при одном и том же требуемом годовом объеме и определяться доступным для ее выполнения рабочим временем. Пример подобного расчета приведен в табл. 5.

Таблица 5

Расчет требуемой средней часовой интенсивности операций

Годовой объем	Средняя часовая интенсивность операций			
	дн. / нед.	ч / сут	ч / год	движ. / ч
83 680	7	8	2920	28,7
	7	8	2920	
	5	18	4693	

Таблица 5
(Окончание)

	5	18	4693	
	6	18	5631	
83 680	6	18	5631	14,9
	6	18	5631	
	6	18	5631	
60 000	6	18	5631	10,7
43 680	6	18	5631	7,8
	5	8	2086	
	5	8	2086	
43 680	5	8	2086	20,9
	5	8	2086	
	6	18	5631	
60 000	6	18	5631	10,7
100 000	6	18	5631	17,8
	6	18	5631	
	6	18	5631	
40 000	6	18	5631	7,1
	7	24	8760	
	7	24	8760	
	7	24	8760	
	7	24	8760	
	7	24	8760	
	7	24	8760	
	7	24	8760	
	7	24	8760	

Полученные значения требуемой часовой интенсивности составляют вектор-столбец, показанный в последнем столбце табл. 5:

$$\overline{P_{m \times 1}} = \{28.7, 0, 0, 0, 0, 14.9, 0, 0, 10.7, 7.8, 0, 0, 20.9, 0, 0, 10.7, 17.8, 0, 0, 7.1, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0\}.$$

Введем в рассмотрение матрицу E^{eq} участия оборудования в операциях, которая будет иметь размерность $m \times k$, где m — число технологических операций и k — количество типов оборудования. Ее общий элемент $E_{m \times k}^{eq} = e_{i,j}$ равен единице, если операция i требует участия оборудования j , и нулю, если операция не требует этого оборудования.

Векторное умножение транспонированного вектор-столбца $\overline{P_{1 \times m}^T}$ слева на матрицу $E_{m \times k}^{eq}$ позволит получить вектор-строку требуемой интенсивности работы для каждого вида оборудования:

$$\overline{P_{1 \times m}^T} * E_{m \times k}^{eq} = \overline{R_{1 \times k}} = \{r_1, \dots, r_k\}.$$

При известной производительности каждого вида оборудования можно определить среднюю потребность в нем. Пример подобного расчета приведен в табл. 6.

Таблица 6

Пример результатов расчета средней потребности в оборудовании

№ пп.	Годовой объем	Дн. / нед.	ч / сут	ч / год	Движ./ ч	Матрица производительности оборудования в операции							
1	83 680	7	8	2920	28,7		28,7			28,7		28,7	
2		7	8	2920									

Таблица 6
 (Окончание)

3		5	18	4693									
4		5	18	4693									
5		6	18	5631									
6	83 680	6	18	5631	14,9				14,9	14,9	14,9		
7		6	18	5631									
8		6	18	5631									
9	60 000	6	18	5631	10,7		10,7						
10	43 680	6	18	5631	7,8		7,8						
11		5	8	2086									
12		5	8	2086									
13	43 680	5	8	2086	20,9					20,9			
14		5	8	2086									
15		6	18	5631									
16	60 000	6	18	5631	10,7					10,7			
17	100 000	6	18	5631	17,8				17,8				
18		6	18	5631									
19		6	18	5631									
20	40 000	6	18	5631	7,1								
21		7	24	8760									
22		7	24	8760									
23		7	24	8760									
24		7	24	8760									
25		7	24	8760									
26		7	24	8760									
27		7	24	8760									
28		7	24	8760									
29			<i>N</i> движений				47,1			61,3	53,6	43,5	
30			<i>P_ч</i> (часовая производительность)			15	12	15	15	10	15	10	15
31			<i>N</i> машин				4			7	4	5	
32						<i>RMG</i>	<i>RTG</i>	<i>SC</i>	<i>SH</i>	<i>RS</i>	<i>ECH</i>	<i>TT</i>	<i>TL</i>
													<i>rRMG</i>

Рассмотренные действия с матрицами и векторами полностью описывают все вычислительные процедуры, исключая необходимость приводить рутинные алгоритмы реализации указанных операций. Все эти методы реализованы в виде вычислительных модулей, результаты работы которых представлены экранными формами на рисунках, иллюстрирующих примеры, приведенные ранее по ходу изложения. Аналогичным образом может быть выполнена оценка не только технологического оборудования, но и иных операционных ресурсов: персонала, задействованного в выполнении операций, потребности в топливно-энергетических ресурсах, площадях технологических зданий и сооружений.

Разработанный метод прошел апробацию на нескольких работающих контейнерных терминалах (рассматриваемый по тексту статьи пример является одним из них). С помощью подобных экспериментов была доказана адекватность предлагаемой модели, что позволило использовать ее в практике планирования работы и финансово-экономического обоснования различных проектов.

Выводы

1. В статье обоснована актуальность моделирования в практике проектирования, ввода в строй и эксплуатации контейнерных терминалов типа «сухой порт».
2. Авторами изучены существующие функциональные модели морских контейнерных портов, эффективность использования которых доказана на практике, и установлены ограничения, не позволяющие использовать их для объектов выбранного класса.
3. На основании этого в статье предложена новая функциональная модель контейнерного терминала типа «сухой порт», обладающая постулированным свойством универсальности и структурной параметризуемостью.
4. Предложены формализованные процедуры оценки требуемых операционных ресурсов терминала изучаемого типа, основанные на предложенной модели.
5. Теоретические модели и процедуры доведены до практической реализации, что позволило доказать их эффективность и адекватность.
6. Сформулированы общие черты методики расчета технологических параметров и оценки требований к операционным ресурсам, основанной на предложенном авторами подходе.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Ветренко Л. Д. Организация и технология перегрузочных процессов в морских портах / Л. Д. Ветренко, В. З. Ананьина, А. В. Степанец. — М.: Транспорт, 1989. — 270 с.
2. Port development. — New York: UNCTAD, 1985. — 228 p.
3. Романовский Ф. Д. Контейнерные перевозки (технические средства) / Ф. Д. Романовский. — М.: Знание, 1982. — 64 с.
4. Watanabe I. Container Terminal Planning — A Theoretical Approach / I.Watanabe. — WCN Publishing, 2004. — 245 p.
5. Кузнецов А. Л. Методология технологического проектирования современных контейнерных терминалов / А. Л. Кузнецов. — СПб.: Изд-во «Феникс», 2008. — 132 с.
6. Басов Е. А. К определению стратегии хранения груза на терминале / Е. А. Басов // Транспортное дело России. — 2013. — № 6 – 2. — С. 58–60.
7. Погодин В. А. Мощность портового контейнерного терминала как фактор конкурентоспособности / В. А. Погодин // Научно-технические проблемы проектирования, строительства и эксплуатации объектов водного транспорта: сб. науч. тр. — СПб.: Судостроение, 2005. — С. 156–167.
8. Кузнецов А. Л. Генезис моделей развития портов в современной транспортной науке / А. Л. Кузнецов, А. В. Галин // Вестник Государственного университета морского и речного флота имени адмирала С. О. Макарова. — 2015. — № 2 (30). — С.141–153. DOI: 10.21821/2309-5180-2015-7-2-141-153.
9. Кузнецов А. Л. Морские и сухопутные порты в новой мировой системе грузораспределения / А. Л. Кузнецов // Эксплуатация морского транспорта. — 2009. — № 1. — С. 9–12.
10. Кузнецов А. Л. Моделирование сетей контейнерного грузораспределения / А. Л. Кузнецов, С. С. Павленко, В. Н. Щербакова-Слюсаренко // Вестник Государственного университета морского и речного флота имени адмирала С. О. Макарова. — 2015. — № 5 (33). — С. 33–42. DOI: 10.21821/2309-5180-2015-7-5-33-42.

REFERENCES

1. Vetrenko, L. D., V. Z. Anan'ina, and A. V. Stepanets. *Organizatsiya i tekhnologiya peregruzochnykh protsessov v morskikh portakh*. M.: Transport, 1989.
2. *Port development*. New York: UNCTAD, 1985.
3. Romanovskii, F. D. *Konteinernye perevozki (tekhnicheskie sredstva)*. M.: Znanie, 1982.
4. Watanabe I. *Container Terminal Planning – A Theoretical Approach*. WCN Publishing, 2004.
5. Kuznetsov, A. L. *Metodologiya tekhnologicheskogo proektirovaniya sovremennykh konteinernykh terminalov*. SPb.:Izdatel'stvo «Feniks», 2008.
6. Basov, E. “To selection of the storage strategy on the terminal.” *Transport business of Russia* 6-2 (2013): 58–60.

7. Pogodin, V. A. "Moshchnost' portovogo konteiner'nogo terminal kak factor konkurentosposobnosti." *Nauchno-tekhnicheskie problem proektirovaniya, stroitel'stva i ekspluatatsii ob'ektov vodnogo transporta: Sbornik nauchnykh trudov*. SPb.: Sudostroenie, 2005: 156–167.

8. Kuznetsov, A. L., and A. V. Galin. "The genesis of port development models in modern transportation science." *Vestnik Gosudarstvennogo universiteta morskogo i rechnogo flota imeni admirala S.O. Makarova* 2(30) (2015): 141–153. DOI: 10.21821/2309-5180-2015-7-2-141-153.

9. Kuznetsov, A. L. "Sea and dry ports in the new world cargo distribution system." *Expluatatsiya morskogo transporta* 1 (2009): 9–12.

10. Kuznetsov, Alexander Lvovitch, Sergei Sergeyevich Pavlenko, and Victoria Nickolaevna Scherbackova-Slysarenko. "Container distribution networks modeling." *Vestnik Gosudarstvennogo universiteta morskogo i rechnogo flota imeni admirala S. O. Makarova* 5(33) (2015): 33–42. DOI: 10.21821/2309-5180-2015-7-5-33-42.

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

Щербакова-Слюсаренко Виктория Николаевна —
кандидат технических наук,
генеральный директор
ООО «Логистический Парк «Янино»
Российская Федерация, Ленинградская область,
Всеволожский район, д. Янино-1,
Торгово-логистическая зона «Янино-1», № 1
e-mail: victorysch@mail.ru
Погодин Владимир Алексеевич —
кандидат технических наук, технический директор
ООО «Морстройтехнология»
195220, Российская Федерация, Санкт-Петербург,
ул. Гжатская, дом 21, корпус 2, лит. А
e-mail: pva@morproekt.ru
Ткаченко Андрей Станиславович —
директор по развитию и управлению рисками
ООО «Логистический Парк «Янино»
Российская Федерация, Ленинградская область,
Всеволожский район, д. Янино-1,
Торгово-логистическая зона «Янино-1», № 1
e-mail: atkcs1@ya.ru

INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Shcherbakova-Slyusarenko, Victoria N. —
PhD, Chief Executive Officer
Yanino Logistics Park LLC
Vsevolozhsky District,
Yanino-1 village, Trade and logistics zone Yanino-1,
No. 1, Leningrad Region,
Russian Federation
e-mail: victorysch@mail.ru
Pogodin, Vladimir A. —
PhD, Technical director
Mostroytehnology LLC
21 Gzhatskaya Str., building 2, lit. "A",
St. Petersburg, 195220, Russian Federation
e-mail: pva@morproekt.ru
Tkachenko, Andrei S. —
Development director
Yanino Logistics Park LLC
Vsevolozhsky District, Yanino-1 village,
Trade and logistics zone Yanino-1, No. 1,
Leningrad Region, Russian Federation
e-mail: atkcs1@ya.ru

Статья поступила в редакцию 16 января 2017 г.
Received: January 16, 2017.

DOI: 10.21821/2309-5180-2017-9-1-61-73

EVALUATION OF STABILITY OF SEA VESSEL CONTOUR TO CAPSIZING DUE TO SOLITARY WAVE

M. V. Kitaev¹, V. M. Dorozhko²

1 — Far Eastern Federal University, Vladivostok, Russian Federation

2 — Institute of Automation and Control Processes, Far Eastern Branch
of the Russian Academy of Sciences, Vladivostok, Russian Federation

The article is devoted to numerical simulating of stability in the shallow water of sea vessel contours with displacement from 300 to 3000t to capsizing due to breaking solitary wave. Based on the approximation of 2nd order solutions of the Korteweg-de Vries equation a solitary wave generation was made in the computational domain. It was shown that in a model with a horizontal bottom a solitary wave does not break. When meeting with such solitary wave contour is not capsized. The numerical model has a bottom slope of 3.8°. The simulation used solitary waves with heights of 12m, 18m, 24m and the sea depth of 20m, 30m, 40m in the beginning of the computational domain, respectively. It was found that the solitary wave height from 12m to 24m may capsize the contour of vessels up to 1000t and 3000t, respectively. Capsizing of contour can occur in the left or right board, if the contour would be at the beginning or in the end of breaking zone of the solitary wave, respectively. We calculated the diagram of the dependence of the ship's roll angle from time. The diagram parameters are the displacement of the vessel, depth of water, the height of the solitary wave, the relative position of the contour and a solitary wave at the time of its breaking. The coincidence of the contour position with the middle of breaking zone of the solitary wave leads to suppression of the further development of the breaking process and exclude the capsizing of contour with displacement of 3000t. To prevent capsizing vehicle due to solitary wave skipper should avoid swimming or anchorage in the water of the shelf with depth less than 40m.

Keywords: solitary wave, computational fluid dynamics, vessel contour, vessel capsizing, roll angle, slope of the bottom, wave breaking.

For citation:

Kitaev, Maksim V., and Veniamin M. Dorozhko. "Evaluation of stability of sea vessel contour to capsizing due to solitary wave." *Vestnik Gosudarstvennogo universiteta morskogo i rechnogo flota imeni admirala S.O. Makarova* 9.1 (2017): 61–73. DOI: 10.21821/2309-5180-2017-9-1-61-73.

УДК 004.942

ОЦЕНКА УСТОЙЧИВОСТИ КОНТУРА МОРСКОГО СУДНА К ОПРОКИДЫВАНИЮ УЕДИНЕННОЙ ВОЛНОЙ

М. В. Китаев¹, В. М. Дорожко²

1 — Дальневосточный федеральный университет, Владивосток, Российская Федерация

2 — Институт автоматизации и процессов управления ДВО РАН,
Владивосток, Российская Федерация

В статье выполнено численное моделирование устойчивости на мелком море контуров морских судов водоизмещением от 300 до 3000 т к опрокидыванию обрушивающейся уединенной волной. На основе аппроксимации 2-го порядка решения уравнения Кортевега–де Фриза выполнена генерация уединенной волны в расчетной области. Показано, что в модели с горизонтальным дном обрушения уединенной волны не происходит. При встрече с такой уединенной волной контур не опрокидывается. В численной модели предусмотрен уклон дна в 3,8°. В процессе моделирования использовались уединенные волны с высотой 12 м, 18 м и 24 м, при этом глубины моря в начале уклона дна составили 20 м, 30 м и 40 м соответственно. Установлено, что уединенные волны высотой 12 м и 24 м могут опрокинуть контуры судов водоизмещением до 1000 т и 3000 т соответственно. При этом опрокидывание контура может произойти на левый или правый борт, если контур окажется в начале или в конце зоны обрушения уединенной волны. Получены диаграммы зависимостей угла крена контуров от времени. Параметрами диаграмм являются водоизмещение судна, глубина моря, высота уединенной волны, взаимное положение контура и уединенной волны

в момент её обрушения. Совпадение положения контура с серединой зоны обрушения уединенной волны приводит к подавлению дальнейшего развития процесса обрушения и исключает опрокидывание контура водоизмещением 3000 т. Для предупреждения опрокидывания судов уединенными волнами судоводителям следует избегать плавания или стоянки судов на открытых акваториях шельфа с глубиной менее 40 м.

Ключевые слова: уединенная волна, вычислительная гидродинамика, контур судна, опрокидывание контура судна, угол крена, уклон дна, обрушение волны.

Для цитирования:

Китаев М. В. Оценка устойчивости контура морского судна к опрокидыванию уединенной волной / М. В. Китаев, В. М. Дорожко // Вестник Государственного университета морского и речного флота имени адмирала С. О. Макарова. — 2017. — Т. 9. — № 1. — С. 61–73. DOI: 10.21821/2309-5180-2017-9-1-61-73.

Введение

В последнее время большое внимание уделяется исследованию «волн-убийц», представляющих серьезную опасность для морских судов. Только в течение 26 лет (1968 – 1994 гг.) от встречи с «волнами-убийцами» погибло 22 супертанкера [1]. С целью получения данных о частоте возникновения «волн-убийц» и разработки предложений по безопасности морских судов были выполнены международные проекты «MaxWave» (2000 – 2003 гг.) [2] и «Extreme Seas» (2009 – 2012 гг.), см. сайт <https://www.hse.ru/data/2011/10/12/1270460467/ES%202011sep17.pdf>, которые выявили высокую частоту возникновения «волн-убийц». Для координации отечественных исследований в 2012 г. был создан Научный центр по изучению «волн-убийц». За рубежом аналогичными исследованиями занимается «Rogue Waves Research Project (MULTIWAVE)» (сайт в Интернете <http://www.ergcmultiwave.eu>), в состав которого от России входит академик В. Е. Захаров. Несмотря на интенсивное изучение этого вопроса, теория «волн-убийц» далека от своего завершения [3]. Последнее время уединенные волны стали рассматриваться как одиночные «волны-убийцы» [4], [5], возникающие вследствие ветрового волнения в условиях мелкого моря. Всё это актуализирует изучение уединенных волн по различным направлениям, среди которых важное значение для безопасности морского судоходства имеет оценка устойчивости судов к опрокидыванию уединенной волной.

Уединенные волны представляют собой особый вид движения жидкости. Впервые волну подобного рода описал Дж. Рассел, охарактеризовав ее как *одиночное возвышение, движущееся вдоль канала без изменения формы и скорости* [6]. Представители научной общественности с недоверием отнеслись к открытию ученого. Так, например, Эйри, разработавший для поверхностных волн теорию мелкой воды, отрицал возможность движения волны без изменения её формы. Согласно разработанной им теории, волны конечной амплитуды, распространяясь на мелкой воде, изменяют свою форму. Причина разногласий состояла в том, что Эйри в своей теории не учитывал дисперсионные эффекты, имеющие для распространения уединенной волны принципиальное значение. Буссинеск и Рэлей обосновали математически возможность существования уединенных волн в мелководных каналах путем учета как дисперсионных эффектов, так и конечности амплитуды. Учет конечности амплитуды создает условия для возникновения нелинейных процессов, выражающихся в искажении формы волны в виде увеличения крутизны её фронта. Дисперсионные эффекты выражаются в преобладании скорости длинноволновой части спектра уединенной волны, что, наоборот, снижает крутизну фронта. При достижении баланса между этими двумя процессами уединенная волна распространяется без изменения формы.

Кортевег и де Фриз вывели уравнение, решение которого описывает уединенную волну при допущении малости параметров нелинейности и дисперсии и тем самым завершили дискуссию по поводу реальности уединенной волны. Существует большое количество современных работ прикладной направленности, среди которых, например, разработка способов генерации уединенных волн [7], [8], исследование их взаимодействия с неподвижными объектами [9], [10] и наката на береговой уклон [11], изучение взаимодействия уединенных волн на мелководье [12]. Следует отметить отсутствие работ, связанных с изучением воздействия уединенных волн на плавающие морские объекты.

Постановка и описание задачи

В настоящее время опасность «волн-убийц» подтверждается как статистикой гибели судов [1], так и численными исследованиями [13]. Несмотря на то, что уединенные волны рассматриваются как «волны-убийцы», в настоящее время отсутствуют материалы наблюдений или вычислений, подтверждающие опасность уединенных волн для морских судов. Особенность уединенной волны состоит в том, что на акватории с горизонтальным дном она не обрушается, так как представляет собой движущееся возвышение малой крутизны, длина которого во много раз превышает его высоту. Крутизна ($S = \pi A/L$) уединенной волны, например, высотой $A = 24$ м и соответствующей ей длиной $L = 599,4$ м на море с глубиной 40 м не превышает 0,16, в то время как опасность для морских судов представляют обрушающиеся «волны-убийцы» крутизной не менее 0,413 [13]. Следовательно, не обрушающаяся уединенная волна не должна представлять опасность для морских судов. Тем не менее даже небольшие по высоте поверхностные волны, например, от подводных землетрясений по мере движения к берегу порождают на мелководье огромную по высоте и разрушительной силе волну цунами. Аналогично при входе в шельфовую зону может возрасти как высота, так и крутизна уединенной волны, достигая значений, соответствующих обрушению её гребня [14]. Таким образом, имеются основания рассматривать уединенную волну как источник опасности для судов, выполняющих работы или находящихся на якорных стоянках акваторий мелкого моря. В связи с этим ставится задача выполнить численную оценку на мелком море устойчивости полноразмерных контуров шпангоутных сечений (в расчетах рассматривалось миделевое сечение судна) морских судов водоизмещением от 400 до 3000 т к опрокидыванию обрушающейся уединенной волной при вариации следующих параметров:

- массы контура;
- начальной высоты уединенной волны;
- начальной глубины моря;
- взаимного положения контура и уединенной волны в момент её обрушения.

Выбор сравнительно небольших по водоизмещению судов обусловлен фактом их эксплуатации в береговой зоне шельфа. Выбор глубины моря, высоты и длины уединенной волны выполнен с учетом ограничений, которые накладывает на указанные величины уравнение Кортевега–де Фриза [4], а именно: параметр нелинейности $\alpha = A/H$ должен быть меньше единицы, а дисперсии $\beta = H^2/L^2$ — много меньше единицы, где A и L — соответственно высота и длина уединенной волны; H — глубина моря.

Для реализации поставленной задачи численная модель должна позволить формирование полноразмерного виртуального опытового бассейна, на поверхности которого в заданном месте, соответствующем зоне обрушения уединенной волны, устанавливается свободно плавающий контур. С целью обеспечения возрастания крутизны уединенной волны предусматривается уменьшение глубины воды по мере движения волны за счет уклона дна бассейна. В процессе вычислений должны регистрироваться следующие параметры контура: время; положение центра тяжести; угол крена; силы, приложенные к центру тяжести контура, обеспечивающие его перемещение; момент сил, приложенных к контуру, обуславливающий его крен. В качестве границы устойчивости контура принято значение крена в 60° [15], превышение которого свидетельствует об опрокидывании контура. Кроме того, в процессе вычислений предусматривается периодическая визуализация расчетной области для иллюстрации процессов движения контура и уединенной волны.

Как отмечалось ранее, в открытом море уединенная волна может иметь незначительную высоту. Однако по мере приближения к берегу, её высота увеличивается и достигает значений, соответствующих «волнам-убийцам». В связи с этим в настоящей работе рассматривается последний этап развития уединенной волны: движение и обрушение на акватории шельфа с уклоном дна.

Модельные представления и методы решения задачи

С развитием вычислительных средств наибольшую эффективность в сравнении с экспериментальными исследованиями в опытовых бассейнах приобретает *метод вычислительной гидро-*

динамики (CFD — *Computational Fluid Dynamics*). CFD-метод использует уравнения неразрывности несжимаемой жидкости и сохранения импульса (RANS-уравнения — *Reynolds-Averaged Navier-Stokes Equations*) [10], имеющих вид:

$$\rho \frac{\partial u_i}{\partial x_i} = 0; \quad (1)$$

$$\rho \frac{\partial u_i}{\partial t} + \rho \frac{\partial}{\partial x_j} (u_i u_j) = -\frac{\partial p}{\partial x_i} + \mu \frac{\partial}{\partial x_j} \left(\frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} - \frac{2}{3} \delta_{ij} \frac{\partial u_j}{\partial x_j} \right) + \rho \frac{\partial}{\partial x_j} (-\overline{u'_i u'_j}) + \rho g,$$

где $\{i, j\} = 1, 2, 3$ — индексы переменных в абсолютной системе координат $ox_1x_2x_3$; u'_1, u'_2, u'_3 — флуктуации абсолютной скорости жидкости; u_1, u_2, u_3 — осредненные в масштабе флуктуаций значения абсолютной скорости; ρ и μ — соответственно плотность и физическая вязкость жидкости; t — время; p — давление; δ_{ij} — символ Кронекера; g — ускорение свободного падения; последний член в уравнении (2) — напряжение Рейнольдса, вычисленное в соответствии с моделью турбулентности $k - \omega$, SST (*Shear Stress Transport*); k — кинетическая энергия турбулентности; ω — удельная скорость диссипации.

Вычисления выполнены в расчетной области (рис. 1), представляющей собой виртуальный опытовый бассейн, в котором на поверхности жидкости расположен свободно плавающий контур 5 морского судна. Начало координат правой системы $oxyz$ совпадает с системой $ox_1x_2x_3$ уравнений (1) и расположено на дне бассейна в начале расчетной области. Ось oy направлена вверх, ось ox — горизонтально, ось oz перпендикулярна плоскости расчетной области и на рис. 1 не показана. С контуром связана правая система координат $o\xi\eta\zeta$, начало которой совпадает с центром тяжести контура. Оси $o\xi$, $o\eta$ и $o\zeta$ в начальный момент времени параллельны осям ox , oy и oz соответственно. Угол поворота контура относительно оси $o\zeta$ (на рис. 1 эта ось не показана) равен углу между осями oy и $o\eta$, а перемещение контура в горизонтальном или вертикальном направлении соответствует изменению расстояния между началами координат систем $oxyz$ и $o\xi\eta\zeta$ в указанных направлениях. Разбиение расчетной области сеточными элементами на рис. 1 не показано.

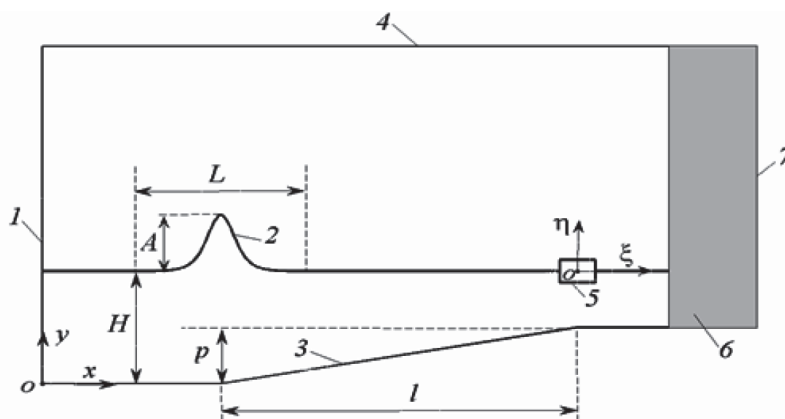


Рис. 1. Схема расчетной области:

- 1 — входная граница; 2 — начальный профиль уединенной волны; 3 — нижняя граница;
4 — верхняя граница; 5 — контур; 6 — область повышенного затухания волн; 7 — выходная граница;
 ox, oy, oz — система координат расчетной области; $o\xi, o\eta, o\zeta$ — система координат контура;
 A и L — соответственно высота и длина уединенной волны;
 H — глубина воды; p, l — параметры уклона дна

Численное решение системы уравнений (1) выполнено с применением следующих основных методов и алгоритмов [10]. Расчетная область разбивалась сеточными элементами, что позволило сформировать с помощью метода конечного объема разностный аналог системы уравнений RANSE, которая решалась методом Гаусса–Зейделя. Для вычисления давления жидкости применялся алгоритм PISO (*Pressure-Implicit with Splitting of Operators*), который обеспечивал связь

между полями скорости, давления и выполнение уравнения неразрывности. Схемы второго порядка точности применены для дискретизации полей давления и скорости жидкости.

Часть расчетной области, в которой предполагалось движение контура, реализуемое с помощью метода 6DOF (*degrees of freedom* — в данной задаче реализовано движение контура с тремя степенями свободы — перемещение по осям ox , oy и поворот относительно оси oz), разбивалась треугольными сеточными элементами, допускающими их деформацию и перестройку по мере движения контура под действием уединенной волны. Остальная часть расчетной области разбивалась квадратными сеточными элементами. Дискретизация времени t выполнена с шагом Δt , выбор величины которого обеспечивал устойчивость вычислений. На каждом временном шаге Δt выполнялось вычисление векторов линейного $\mathbf{a}_G = \mathbf{F}_G/M_C$ и углового $\boldsymbol{\varepsilon}_G = \mathbf{M}_G/J_C$ ускорений контура, где $\mathbf{F}_G$ и $\mathbf{M}_G$ — векторы силы перемещения и момента сил вращения, вычисленные относительно центра тяжести контура, M_C и J_C — масса и момент инерции масс контура соответственно. Для соблюдения размерности вычисляемых сил и моментов условно принято, что толщина контура равна 1 м. На основе вычисленных ускорений в конце каждого временного шага Δt контур перемещался на величину вектора $\Delta \mathbf{l} = 0,5\mathbf{a}_G\Delta t^2$ и поворачивался на величину угла $\Delta \boldsymbol{\theta} = 0,5\boldsymbol{\varepsilon}_G\Delta t^2$. Положение границы раздела «воздух – вода» определялось методом объема жидкости (VOF — *Volume of Fluid method*), согласно которому в каждом сеточном элементе, граничащем со свободной поверхностью, вычислялась доля жидкости, на основании которой геометрически строилась свободная поверхность на каждом шаге вычислений.

Для решения системы уравнений (1) требуется задание граничных и начальных условий. Граничные условия на нижней границе (см. рис. 1 — граница 3) расчетной области соответствуют условию непротекания, реализуемому нулевым значением нормальной компоненты скорости жидкости. На верхней открытой границе 4 обеспечено постоянство давления, равного атмосферному давлению воздуха. На левой вертикальной границе 1 расчетной области задавался вектор скорости ($\mathbf{V}$) втекающей жидкости, полученный из решения уравнения Кортевега – де Фриза в виде разложения в степенной ряд второго порядка относительно малого параметра нелинейности $\alpha = A/H$ (A — высота волны, H — глубина моря) [16] при условии малости параметра дисперсии $\beta = H^2/L^2$, $345L = H[\sqrt{0,75\alpha}(1 - 0,625\alpha)]^{-1}$ — длина уединенной волны. В соответствии с указанным решением выражения для профиля ζ и компонент скорости v_x и v_y вектора скорости ($\mathbf{V}$) уединенной волны имеют вид:

$$\frac{\zeta(x,t)}{H} = 1 + \alpha \operatorname{sech}^2 \vartheta - 0,75\alpha^2 (1 - \operatorname{sech}^2 \vartheta) \operatorname{sech}^2 \vartheta; \quad (2)$$

$$\begin{aligned} \frac{v_x(x,y,t)}{\sqrt{gH}} = & \zeta/H - 0,5\alpha^2 \left[1 + 6(y/H - 1) + 3(y/H - 1)^2 \right] \operatorname{sech}^2 \vartheta + \\ & + 0,5\alpha^2 \left[1 + 9(y/H - 1) + 4,5(y/H - 1)^2 \right] \operatorname{sech}^4 \vartheta; \end{aligned} \quad (3)$$

$$\begin{aligned} \frac{v_y(x,y,t)}{\sqrt{gH}} = & \sqrt{3} \frac{y}{H} \alpha^{3/2} \operatorname{sech}^2 \vartheta \tanh \vartheta \left\{ 1 + \alpha \left[0,125 - y/H - 0,5(y/H - 1)^2 \right] - \right. \\ & \left. - 0,5\alpha \left[1 - 6(y/H - 1) - 3(y/H - 1)^2 \right] \operatorname{sech}^2 \vartheta \right\}, \end{aligned} \quad (4)$$

где $\vartheta = \frac{x - ct}{H} \sqrt{0,75\alpha}(1 - 0,625\alpha)$; $c = \sqrt{gH}(1 + 0,5\alpha - 0,15\alpha^2)$.

Граничные условия на поверхности жидкости 2 (см. рис. 1) представляют собой совокупность вычисленных скоростей и давления в каждой сеточной ячейке на границе раздела фаз вода/воздух. На правой вертикальной границе 7 расчетной области поддерживается постоянное давление, равное давлению воды. Для исключения отражения волн от выходной границы 7 в зоне 6 создана область с повышенным затуханием волн.

Начальные условия рассматриваемой системы уравнений (1) в момент $t = 0$ созданы путем инициализации расчетного пространства от входных скоростей (3) и (4) с учетом профиля ζ уединенной волны (2). В конце первого временного шага длительностью Δt вычислены положение и форма профиля поверхности воды, значения полей скорости, давления на границах и в расчетной области, которые становятся граничными и начальными условиями для решения на втором временном шаге, аналогично результаты вычисления в конце второго временного шага — граничными и начальными условиями для третьего шага и т. д. на протяжении всего процесса решения задачи.

В работе [17] систематизированы данные о характеристиках движения уединенной волны в расчетной области с уклонами дна 1:100, 1:35, 1:15 и 1:8. В моделях с уклоном 1:100 и 1:35 гребень уединенной волны обрушается в виде небольшого скатывающегося буруна на фронт волны. Для модели с уклоном 1:8 характерно быстрое убывание глубины воды, что исключает плавание судов в зоне обрушения уединенной волны. Согласно поставленной задаче, требуется выполнить оценку возможности опрокидывания контура уединенной волной, следовательно, необходимо выбрать такие параметры модели, которые формируют наибольшие динамические условия опрокидывания контура. В наибольшей степени этим условиям отвечает модель с уклоном дна 1:15, которая обеспечивает сочетание минимального угла уклона ($3,8^\circ$), т. е. максимально возможную глубину воды в зоне обрушения, с наиболее развитым процессом обрушения, при котором гребень уединенной волны падает в виде струи на подошву волны.

В этих условиях максимальная крутизна фронта уединенной волны на начальной стадии обрушения доходит до 45° , что создает предпосылки для опрокидывания судов. Последним параметром, который следует выбрать, является параметр нелинейности $\alpha = A/H$ — отношение высоты уединенной волны к глубине воды на начальной стадии движения. Известно, что верхнее значение параметра нелинейности ограничено величиной 0,78 [17], при которой уединенная волна начинает обрушаться даже в модели с горизонтальным дном. Так как обрушение уединенной волны должно происходить за счет накопления нелинейных процессов по мере её движения над дном с уклоном, начальное (в зоне, предшествующей началу дна с уклоном) значение параметра нелинейности выбрано равным 0,6, при котором уединенная волна в модели с горизонтальным дном движется без обрушения. В связи с этим выбраны три пары начальных значений высоты уединенной волны и глубины моря: $A_1 = 12$ м, $H_1 = 20$ м; $A_2 = 18$ м, $H_2 = 30$ м и $A_3 = 24$ м, $H_3 = 40$ м, для которых характерно сохранение выбранного параметра нелинейности равного 0,6. В этом случае на развитие нелинейных процессов указанных волн будет оказывать только изменение глубины, обусловленное уклоном дна. Значения параметров $A_1 = 12$ м и $H_1 = 20$ м являются минимально допустимыми, так как дальнейшее уменьшение высоты и глубины может повлечь посадку контура на мель в зоне обрушения уединенной волны. Значение высоты ($A_3 = 24$ м) в третьей паре параметров соответствует диапазону значений «волн-убийц».

Для обоснования процедуры выбора начального положения контура следует обратиться к рис. 2, на котором представлен результат вычислений процесса развития нелинейности и обрушения уединенной волны в модели с уклоном дна 1:15. Начало процесса движения уединенной волны характеризуется симметричностью профиля 1. Однако по мере продвижения уединенной волны глубина воды уменьшается, что приводит к увеличению параметра нелинейности A/H' , где H' — глубина воды над дном с уклоном в месте нахождения уединенной волны в конкретный момент времени. Чем дальше продвигается волна, тем меньше становится глубина H' и тем больше возрастает параметр нелинейности. Так, например, для $A_3 = 24$ м, $H_3 = 40$ м уединенной волне достаточно пройти всего 150 м по акватории с уклоном дна 1:15, чтобы параметр нелинейности превысил 0,78. В этом случае процессы нелинейного преобразования, которые способствуют увеличению крутизны фронта волны, в неполной мере компенсируются дисперсионными процессами, приводящими к уменьшению крутизны фронта волны и, соответственно, к нарушению симметрии профиля 2.

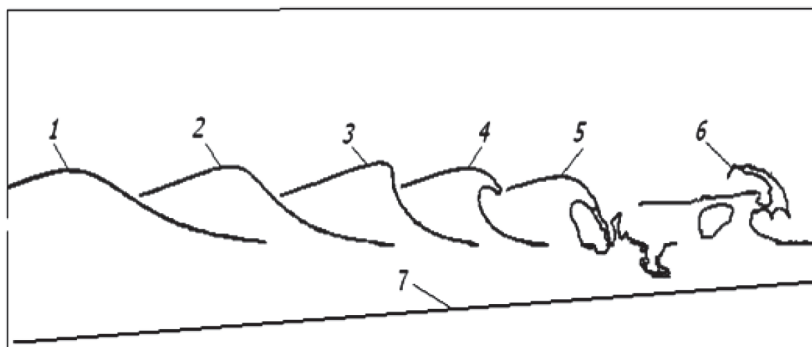


Рис. 2. Последовательность профилей уединенной волны в процессе движения по поверхности воды над уклоном крутизной 1:15:

- 1 — начальный профиль; 2 — профиль с признаками асимметрии;
3 — профиль с отвесным фронтом в районе гребня; 4 — профиль с зарождающейся струей;
5 — профиль с обрушивающейся струей на подошву волны;
6 — хаотичная поверхность воды с захватом воздуха
7 — дно

По мере накопления нелинейных эффектов начинается формирование процесса обрушения. На начальной стадии это выражается в виде формирования отвесного фронта уединенной волны непосредственно в районе её гребня (профиль 3). По мере продвижения волны на месте указанного отвесного фронта начинает формироваться струя воды (профиль 4) и, наконец, процесс обрушения завершается стремительным увеличением размеров струи и её падением на подошву уединенной волны (профиль 5). В конечном итоге обрушение гребня приводит к образованию хаотичного состояния поверхности воды (профиль 6). Вариация взаимного положения контура и уединенной волны выполнена путем его установки на поверхности воды в начальные положения, которые соответствуют абсциссам гребней профилей 3 – 5 (см. рис. 2), что обеспечило при встрече с уединенной волной попадание контуров в начало, середину и окончание процесса её обрушения соответственно.

Для численного моделирования выбраны контуры морских судов, которые на акватории шельфа могут выполнять производственные задания или находиться на якорных стоянках, приведенные в следующей таблице:

Тип, водоизмещение рыболовных судов и параметры их контуров

Тип и водоизмещение судов, т	Параметры контуров					
	ширина, м	высота, м	осадка, м	масса, кг	момент инерции, кг·м ²	значение начальной метацентрической высоты, м
МКРТМ тип «Леда», 383	8,0	3,9	3,2	24981	184982	0,5
СРТМ «Василий Попов», 1192	9,8	5,0	4,2	39704	446699	1,0
БСТ тип «Каури», 3040	13,5	8,9	6,3	82658	1719196	1,0

Примечания: МКРТМ — малый креветко-рыболовный траулер морозильный, выполняющий производственные задания на акватории шельфа; СРТМ — средний рыболовный траулер морозильный и большой сейнер тунцеловный (БСТ), которые находятся на якорных стоянках.

Выражения (1) – (4), методы решения, параметры уединенной волны и контуров, граничные и начальные условия составляют численную модель системы «контур морского судна — уединенная волна».

Численное моделирование и обсуждение результатов

Численное моделирование проводилось в расчетной области (см. рис. 1) длиной $80H$, высотой $4H$ и глубиной воды H в области, примыкающей к границе l , с уклоном дна величиной $p:l = 1:15$ и длиной $13H$. Вариация высоты уединенной волны и глубины моря осуществлялась путем выбора параметров из следующих пар значений $A_1 = 12$ м и $H_1 = 20$ м; $A_2 = 18$ м и $H_2 = 30$ м; $A_3 = 24$ м и $H_3 = 40$ м.

Прежде чем приступить к обсуждению результатов опрокидывания контуров в численных моделях с уклоном дна, убедимся, что действительно в модели с горизонтальным дном контур судна не опрокидывается даже для случая с максимальной высотой волны. На рис. 3 представлены результаты вычислений встречи уединенной волны с контуром судна СРТМ. в численной модели с параметрами $A_3 = 24$ м, $H_3 = 40$ м и нулевой величиной уклона дна.

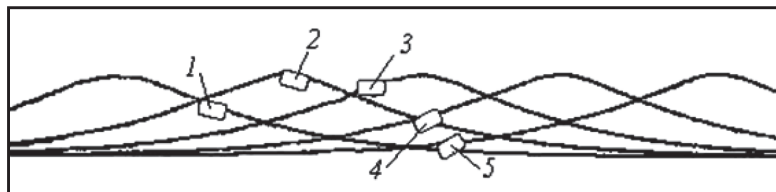


Рис. 3. Последовательность профилей уединенной волны с расположенным на ней контуром:
1 — контур находится на фронте волны; 2 — контур поднят на вершину гребня;
3 — контур переместился на спад волны; 4 — контур переместился на середину спада волны;
5 — контур находится в конце спада волны

Результаты вычислений соответствуют выполненной ранее предварительной оценке: необрушающаяся уединенная волна не представляет опасности для морских судов ввиду малой крутизны. Крен контура не превысил 40° . Следует отметить, что Крускал и Забуски [6] назвали уединенную волну *солитон*ом, принимая во внимание, что распространяясь, солитон не изменяет формы и при «столкновении» с другим солитоном проходит через него, не изменяя своей прежней формы. Из рис. 3 следует, что уединенная волна, «сталкиваясь» с контуром (твердым телом), также не изменяет своей формы, т. е. и в данном случае ведет себя как солитон.

В соответствии с поставленной задачей вычислены углы крена контуров трех выбранных судов в численной модели с уклоном дна $1:15$ и параметрами $A_1 = 12$ м, $H_1 = 20$ м; $A_2 = 18$ м, $H_2 = 30$ м; $A_3 = 24$ м, $H_3 = 40$ м, при условии, что начальное положение контуров находится в пределах зоны обрушения волны.

На рис. 4 представлены результаты вычислений крена контура МКРТМ, значение начального положения которого соответствует абсциссе гребня профиля 4 (см. рис. 2) с зарождающейся струей. Из этого рисунка следует, что для всех трех пар параметров A и H крен судна на левый борт относительно оси $o\zeta$ (см. рис. 1) достиг 60° , что соответствует выбранному ранее критерию опрокидывания. Следует отметить, что в процессе взаимодействия с уединенной волной контур совершает один период угловых колебаний, в конце которого происходит опрокидывание.

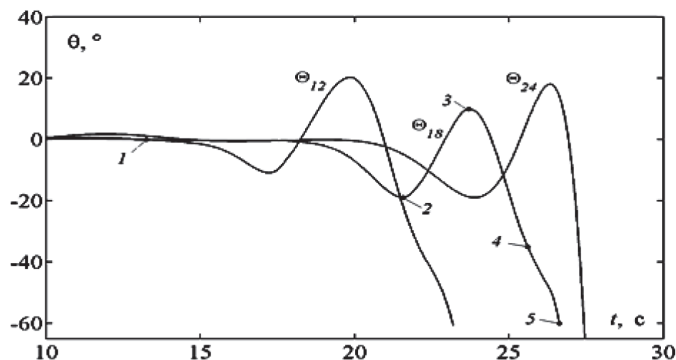


Рис. 4. Диаграммы углов крена θ контура МКРТМ:
 Θ_{12} — соответствует численной модели с параметрами
 $A_1 = 12$ м, $H_1 = 20$ м; Θ_{18} — $A_2 = 18$ м, $H_2 = 30$ м; Θ_{24} — $A_3 = 24$ м, $H_3 = 40$ м

Для иллюстрации диаграмм опрокидывания вычислена временная последовательность профилей уединенной волны с расположенным на них контуром МКРТМ для всех трех пар параметров A и H . В связи с тем, что характер вариации углов одинаков (см. рис. 4), а параметр нелинейности для всех пар выбранных значений A и H равен 0,6, на рис. 5 представлена типичная для контура маломерного судна МКРТМ последовательность профилей, иллюстрирующая опрокидывание контура на левый борт относительно оси oz (см. рис. 1) для случая $A_2 = 18$ м и $H_2 = 30$ м. Значения углов, отмеченных точками 1–5, на диаграмме Θ_{18} (см. рис. 4) соответствуют положению контура 1–5 на профилях (см. рис. 5).

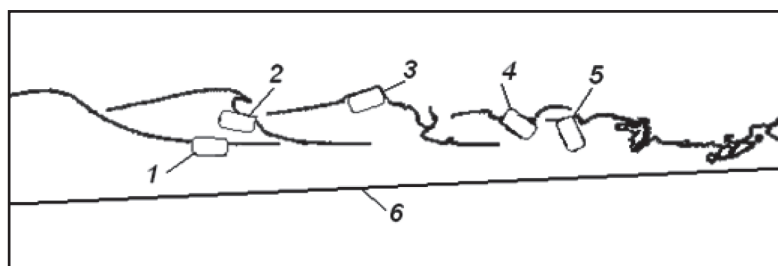


Рис. 5. Временная последовательность профилей уединенной волны с находящимся на них контуром МКРТМ: 1 — контур находится в начале фронта волны; 2 — контур с небольшим креном на левый борт находится под гребнем с зарождающейся струей воды; 3 — контур с креном на правый борт находится на вершине разрушающегося гребня; 4 — контур с креном на левый борт находится на хаотичной поверхности; 5 — контур с креном на левый борт достиг угла опрокидывания; 6 — профиль дна

Рассмотрим одновременно процесс опрокидывания контура, отображенный на рис. 4 и 5. В момент встречи с уединенной волной контур 1 находился на поверхности спокойной воды. По мере движения уединенной волны контур 2 с небольшим креном на левый борт поднялся на фронт волны под зарождающейся струей, нарушив поле скорости, формирующее развитие струи, что привело к преждевременному разрушению гребня уединенной волны. В последующий момент времени движущаяся волна подняла контур 3 (с небольшим креном на правый борт) на поверхность разрушающегося гребня, резкое уменьшение высоты которого привело к формированию на контуре 4 кренящего момента, создающего крен на левый борт. Вследствие дальнейшего разрушения гребня крен контура 5 на левый борт увеличился и достиг порогового значения 60° , соответствующего критерию опрокидывания.

На рис. 6 представлены результаты вычислений крена контура СРТМ, начальное положение которого соответствует абсциссе профиля 5 (см. рис. 2) с обрушающейся струей на подошву уединенной волны.

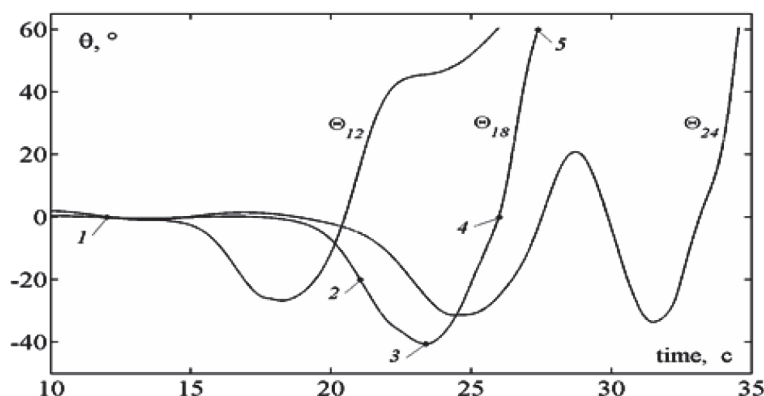


Рис. 6. Диаграммы углов крена θ контура СРТМ:
 Θ_{12} — соответствует численной модели с параметрами $A_1 = 12$ м, $H_1 = 20$ м; Θ_{18} — $A_2 = 18$ м, $H_2 = 30$ м; Θ_{24} — $A_3 = 24$ м, $H_3 = 40$ м

Из рис. 6 следует, что для всех трех пар параметров A и H крен судна на правый борт достиг 60° , что соответствует выбранному ранее критерию опрокидывания. Различие в числе колебаний угла крена диаграмм Θ_{12} , Θ_{18} и Θ_{24} обусловлено высокой динамичностью обрушения волны высотой 24 м.

Для иллюстрации диаграмм опрокидывания (см. рис. 6), вычислена временная последовательность профилей уединенной волны с расположенным на них контуром СРТМ (рис. 7). Так как характер вариации углов и параметр нелинейности на диаграммах Θ_{12} , Θ_{18} одинаков, вычисленные последовательности профилей геометрически подобны. В связи с этим на рис. 7 представлена типичная для контура СРТМ последовательность профилей уединенной волны, иллюстрирующая опрокидывание контура на правый борт относительно оси о ζ (см. рис. 1) для случая $A_2 = 18$ м и $H_2 = 30$ м. Значения углов, отмеченные точками 1 – 5 на диаграмме Θ_{18} (см. рис. 6), соответствуют положению контура на профилях 1 – 5 (см. рис. 7).

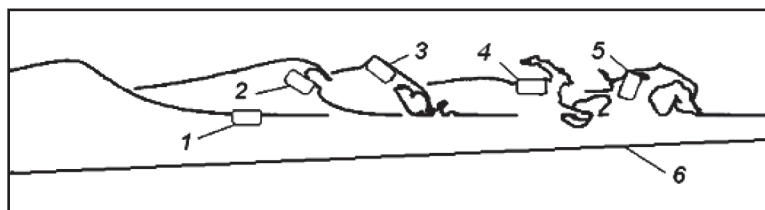


Рис. 7. Временная последовательность профилей уединенной волны с находящимся на них контуром СРТМ: 1 — контур находится в начале фронта волны; 2 — контур с небольшим креном на левый борт продвинулся дальше зарождающейся струи воды; 3 — контур с креном на левый борт находится на вершине гребня с развитой струей воды в момент её падения на подошву волны; 4 — контур в момент выравнивания крена в процессе его поворота на правый борт; 5 — опрокидывание контура на правый борт; 6 — профиль дна

Контур 1 (см. рис. 6 и 7) при встрече с уединенной волной имеет нулевой крен. За счет установки контура в начальное положение, соответствующее абсциссе профиля 5 (см. рис. 2), контур 2 (см. рис. 6 и 7) с креном на левый борт прошел дальше (по сравнению с контуром 2 на рис. 5) под профилем с зарождающейся струей. Это исключило разрушение гребня и обусловило поднятие контура 3 (см. рис. 6 и 7) на гребень с развитой струей, падающей на подошву волны. В процессе резкого уменьшения высоты гребня контур 4 получил кренящий момент на правый борт, что привело к выравниванию крена. Вследствие дальнейшего разрушения гребня крен контура 5 на правый борт увеличился и достиг порогового значения 60° , соответствующего критерию опрокидывания.

На рис. 8 представлены результаты вычислений взаимодействия уединенной волны с контуром БСТ в численной модели с параметрами $A_3 = 24$ м, $H_3 = 40$ м. Диаграммы 1 – 3 вычислены для начальных положений контура, равных абсциссам профилей 3 – 5 (см. рис. 2), что соответствует началу, середине и окончанию зоны обрушения уединенной волны. Из диаграмм 1 и 3 (см. рис. 8) следует, что для начального положения 3 или 5 (см. рис. 2) происходит опрокидывание контура на левый или правый борт, как это имело место в ситуациях, рассмотренных в ходе анализа рис. 5 и 7.

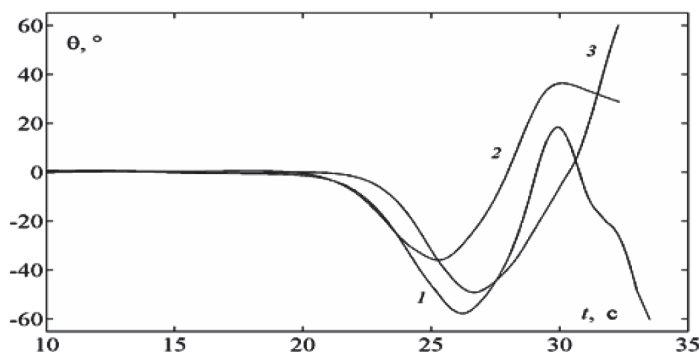


Рис. 8. Диаграммы углов крена θ контура с параметрами $A_3 = 24$ м, $H_3 = 40$ м

При установке контура в начальное положение 2, соответствующее середине зоны обрушения уединенной волны (см. рис. 2), происходит разрушение гребня, аналогично тому, как это имело место ранее (см. рис. 5), и, соответственно, снижается кренящий момент, величина которого оказалась недостаточной для опрокидывания контура БСТ (см. рис. 8, диаграмма 2).

Вычисление крена контура БСТ в численной модели с параметрами $A_1 = 12$ м, $H_1 = 20$ м; $A_2 = 18$ м, $H_2 = 30$ м не производилось ввиду посадки контура на мель в зоне обрушения уединенной волны.

Выводы

1. Разработана численная модель системы «уединенная волна – контур морского судна».
2. Контур миделевого сечения судна, по сравнению с контурами других сечений судна, обладает наибольшими массой и моментом инерции, а, соответственно, и устойчивостью к опрокидыванию уединенной волной. Следовательно, полученные в работе результаты могут быть рассмотрены как оптимистические в отношении устойчивости выбранных судов к опрокидыванию уединенной волной.
3. Вне шельфовой зоны на акватории с горизонтальным дном уединенная волна не опрокидывает судно и ведет себя как солитон, так как судно не изменяет её формы и не вносит изменений в её дальнейшее движение.
4. В шельфовой зоне с глубинами 40 м и менее суда водоизмещением от ~400 до ~3000 т опрокидываются уединенными волнами высотой более 12 м. При этом опрокидывание судна может произойти на левый (правый) борт, если оно окажется в начале / в конце зоны обрушения уединенной волны.
5. Для предупреждения опрокидывания судов уединенными волнами судоводителям следует избегать плавания или стоянки судов на акваториях шельфа глубиной 40 м и менее.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Пелиновский Е. Н. «Фрики» — морские волны-убийцы / Е. Н. Пелиновский, А. В. Слюняев // Природа. — 2007. — № 3. — С. 14–23.
2. Rosenthal W. Rogue Waves: Results of the Max Wave Project / W. Rosenthal, S. Lehner // Journal of Offshore Mechanics and Arctic Engineering. — 2008. — Vol. 130. — Is. 2. — Pp. 021006. DOI:10.1115/1.2918126.
3. Ruban V. Rogue waves — towards a unifying concept: Discussions and debates / V. Ruban, Y. Kodama, M. Ruderman, etc. // The European physical journal special topics. — 2010. — Vol. 185. — Is. 1. — Pp. 5–15. DOI:10.1140/epjst/e2010-01234-y.
4. Шелковников Н. К. Солитонная версия формирования волн-убийц в океане / Н. К. Шелковников // Морской гидрофизический журнал. — 2012. — № 5. — С. 34–41.
5. Didenkulova I. Freak waves of different types in the coastal zone of the Baltic Sea / I. Didenkulova, C. Anderson // Natural Hazards and Earth System Sciences. — 2010. — Vol. 10. — Is. 9. — Pp. 2021–2029. DOI: 10.5194/nhess-10-2021-2010.
6. Зейтунян Р. Х. Нелинейные длинные волны на поверхности воды и солитоны / Р. Х. Зейтунян // Успехи физических наук. — 1995. — Т. 165. — № 12. — С. 1403–1456. DOI: 10.3367/UFNr.0165.199512f.1403.
7. Malek-Mohammadi S. New Methodology for Laboratory Generation of Solitary Waves / S. Malek-Mohammadi, F. Y. Testik // Journal of Waterway, Port, Coastal, and Ocean Engineering. — 2010. — Vol. 136. — Is. 5. — Pp. 286–294. DOI: 10.1061/(ASCE)WW.1943-5460.0000046.
8. Monaghan J. J. Scott Russell's wave generator / J. J. Monaghan, A. Kos // Physics of Fluids. — 2000. — Vol. 12. — Is. 3. — Pp. 622–630. DOI: 10.1063/1.870269.
9. Афанасьев К. Е. Численное моделирование движения уединенной волны над подводным препятствием / К. Е. Афанасьев, Е. Н. Березин // Вычислительные технологии. — 2005. — Т. 10. — № 2. — С. 15–26.
10. Cao H. RANS-VOF solver for solitary wave run-up on a circular cylinder / H. Cao, D. Wan // China Ocean Engineering. — 2015. — Vol. 29. — Is. 2. — Pp. 183–196. DOI: 10.1007/s13344-015-0014-2.

11. Диденкулова И. И. Накат длинных уединенных волн различной полярности на плоский откос / И. И. Диденкулова, Е. Н. Пелиновский, О. И. Диденкулов // Известия Российской академии наук. Физика атмосферы и океана. — 2014. — № 5. — С. 604. DOI: 10.7868/S0002351514050034.
12. Родин А. А. Взаимодействие уединенных волн большой амплитуды в мелководном бассейне / А. А. Родин, И. И. Диденкулова, Е. Н. Пелиновский // Фундаментальные исследования. — 2012. — № 11-3. — С. 710–714.
13. Дорожко В. М. Опрокидывание контура морского судна «волной-убийцей» / В. М. Дорожко // Вестник Государственного университета морского и речного флота имени адмирала С. О. Макарова. — 2015. — № 2 (30). — С. 31–41.
14. Huang C. J. Overturning of a solitary wave on a continental shelf / C. J. Huang, C. Y. Lin // The Eighteenth International Offshore and Polar Engineering Conference. — International Society of Offshore and Polar Engineers, 2008. — 6 p.
15. Правила классификации и постройки морских судов. — СПб.: Российский морской регистр судоходства, 2015. — Т. 1. — 466 с.
16. Staroszczyk R. Simulation of Solitary Wave Mechanics by a Corrected Smoothed Particle Hydrodynamics Method / R. Staroszczyk // Archives of Hydro-Engineering and Environmental Mechanics. — 2011. — Vol. 58. — No. 1–4. — Pp. 23–45.
17. Grilli S. T. Breaking criterion and characteristics for solitary waves on slopes / S. T. Grilli, I. A. Svendsen, R. Subramanya // Journal of waterway, port, coastal and ocean engineering. — 1997. — Vol. 123. — Is. 3. — Pp. 102–112. DOI: 10.1061/(ASCE)0733-950X(1997)123:3(102).

REFERENCES

1. Pelinovsky, E. N., and A. V. Slunyaev. “«Freak Waves», or Sea Killer Waves.” *Nature* 3 (2007): 14–23.
2. Rosenthal, Wolfgang, and Susanne Lehner. “Rogue waves: Results of the MaxWave project.” *Journal of Offshore Mechanics and Arctic Engineering* 130.2 (2008): 021006. DOI:10.1115/1.2918126.
3. Ruban, V., Y. Kodama, M. Ruderman, et al. “Rogue waves — towards a unifying concept: Discussions and debates.” *The European physical journal special topics* 185.1 (2010): 5–15. DOI:10.1140/epjst/e2010-01234-y.
4. Shelkovnikov, N. K. “Solitonnyaya versiya formirovaniya voln-ubiits v okeane.” *Marine Hydrophysical Journal* 5 (2012): 34–41.
5. Didenkulova, I., and C. Anderson. “Freak waves of different types in the coastal zone of the Baltic Sea.” *Natural Hazards and Earth System Sciences* 10.9 (2010): 2021–2029. DOI: 10.5194/nhess-10-2021-2010.
6. Zeytounian, R. Kh. “Nonlinear long waves on water and solitons.” *Physics-Uspekhi* 165.12 (1995): 1403–1456. DOI: 10.3367/UFNr.0165.199512f.1403.
7. Malek-Mohammadi, Siamak, and Firat Y. Testik. “New methodology for laboratory generation of solitary waves.” *Journal of Waterway, Port, Coastal, and Ocean Engineering* 136.5 (2010): 286–294. DOI: 10.1061/(ASCE)WW.1943-5460.0000046.
8. Monaghan, J. J., and A. Kos. “Scott Russell’s wave generator.” *Physics of Fluids* 12.3 (2000): 622–630. DOI: 10.1063/1.870269.
9. Afanasiev, K. E., and E. N. Berezin. “Numerical modeling of solitary wave motion over underwater obstacle.” *Computational Technologies* 10.2 (2005): 15–26.
10. Cao, Hong-jian, and De-cheng Wan. “RANS-VOF solver for solitary wave run-up on a circular cylinder.” *China Ocean Engineering* 29.2 (2015): 183–196.
11. Didenkulova, I. I., E. N. Pelinovsky, and O. I. Didenkulov. “Run-up of long solitary waves of different polarities on a plane beach.” *Izvestiya. Atmospheric and Oceanic Physics* 50.5 (2014): 532–538. DOI: 10.1134/S000143381405003X.
12. Rodin, A. A., I. I. Didenkulova, and E. N. Pelinovsky. “Interaction of large-amplitude solitary waves in shallow-water basin.” *Fundamental research* 11-3 (2012): 710–714.
13. Dorozhko, V. M. “Oprokidyvanie kontura morskogo sudna «volnoi-ubiitsej».” *Vestnik Gosudarstvennogo universiteta morskogo i rechnogo flota imeni admirala S. O. Makarova* 2(30) (2015): 31–41.
14. Huang, Ching-Jer, and Chun-Yuan Lin. “Overturning of a solitary wave on a continental shelf.” *The Eighteenth International Offshore and Polar Engineering Conference*. International Society of Offshore and Polar Engineers, 2008.

15. *Pravila klassifikatsii i postroiki morskikh sudov*. SPb.: Rossiiskii morskoi registr sudokhodstva, 2015. Vol. 1.
16. Staroszczyk, R. "Simulation of Solitary Wave Mechanics by a Corrected Smoothed Particle Hydrodynamics Method." *Archives of Hydro-Engineering and Environmental Mechanics* 58.1–4 (2011): 23–45.
17. Grilli, S. T., I. A. Svendsen, and R. Subramanya. "Breaking criterion and characteristics for solitary waves on slopes." *Journal of waterway, port, coastal, and ocean engineering* 123.3 (1997): 102–112. DOI: 10.1061/(ASCE)0733-950X(1997)123:3(102).

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

Китаев Максим Владимирович —
кандидат технических наук, доцент
Дальневосточный федеральный университет
690950, Российская Федерация, Владивосток,
ул. Суханова 8
e-mail: maxkit@mail.ru

Дорожко Вениамин Мефодьевич —
кандидат физико-математических наук
Институт автоматизации и процессов
управления ДВО РАН
690041, Российская Федерация, Владивосток,
ул. Радио 5
e-mail: veniamin_dorozhko@mail.ru

INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Kitaev, Maksim V. —
PhD, associate professor
Far Eastern Federal University
8 Suhanova Str., Vladivostok 690950,
Russian Federation
e-mail: maxkit@mail.ru

Dorozhko, Veniamin M. — PhD
Institute of Automation and Control Processes,
Far Eastern Branch of the Russian Academy
of Sciences
5 Radio Str., Vladivostok, 690041,
Russian Federation
e-mail: veniamin_dorozhko@mail.ru

Статья поступила в редакцию 13 января 2017 г.
Received: January 13, 2017.

DOI: 10.21821/2309-5180-2017-9-1-74-80

THE SUBSTANTIATION OF MANDATORY DECLARATION CARGO SHIPMENT

V. S. Kiselev

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

The article reflects about declaration of the shipment weight of reliable data before loading the containers on board the vessel, as well as after unloading. The paper analyzes the methods of declaring the weight of a shipment for a sea carrier at the port of loading by the shipper of cargo, which was implemented by the International Convention for the Safety of Life at Sea in November 2014. There was made the conclusion as the result about the need to develop the basic methods of weighing the cargo consignment. Along with, it demonstrates statistics of the global container industry in the figures for 2013, 2014 and 2015, which proof the adequacy of the administration to declare the weight of cargo in container unit prior to the process of loading on board the container vessel in the liner shipping industry. There is described and analyzed the procedure of declaring VGM, approved by the International Maritime Organization. There is also noted the additional result, which could arise due to the late submission of VGM declaration to a sea carrier, as well as sanctions in the submission of false data at the port of discharging. It was found that the way of choosing the right method for weighting by the consignor (exporter) is depended from the type of cargo transported in a different types of a containers. The author has proposed a few suggestions for solving the problem on the import directions of the containers flow, namely: from Europe to the Russian Federation. The unification of the method of researching data on the import cargo direction might solve the problem of a willful false data of the cargo weight, which, in their turn, directly proportional to be effected to the amount of mandatory customs payments by the importer account to the state budget of Russia.

Keywords: safety, SOLAS, IMO, liner shipping, declaring weight cargo methods VGM (Verified Gross Mass), Bill of Lading, logistics, optimization of customs payments.

For citation:

Kiselev, Vadim S. "The substantiation of mandatory declaration cargo shipment." *Vestnik Gosudarstvennogo universiteta morskogo i rechnogo flota imeni admirala S.O. Makarova* 9.1 (2017): 74–80. DOI: 10.21821/2309-5180-2017-9-1-74-80.

УДК 656.6

ОБОСНОВАНИЕ ИНТЕГРАЦИИ ПРОЦЕДУРЫ ОБЯЗАТЕЛЬНОГО ДЕКЛАРИРОВАНИЯ ВЕСА ГРУЗОВОЙ ПАРТИИ

В. С. Киселёв

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

В статье рассмотрены вопросы декларирования достоверных весовых данных грузовой партии как до погрузки контейнеров на борт судна, так и после выгрузки. В работе проведен анализ методики декларирования веса грузовой партии морскому перевозчику в порту погрузки со стороны грузовладельца, которая была внедрена Международной Конвенцией по охране человеческой жизни на море в ноябре 2014 г. Разработка основных методов взвешивания грузовой контейнерной партии необходима и является основополагающей с точки зрения безопасности, так как оказывает влияние на точность грузового плана. Показаны статистические данные мировой контейнерной индустрии за 2013 – 2015 гг. для основных морских судоходных контейнерных перевозчиков, что наглядно доказывает адекватность введения декларирования веса груза до погрузки на борт контейнеровоза в морском линейном судоходстве. Описана и проанализирована процедура декларирования VGM, одобренная Международной морской организацией. Отмечается, что при несвоевременной подаче декларации VGM морскому перевозчику грузовой партии не будет погружена, а также вследствие подачи недостоверных данных в порту отгрузки могут быть наложены санкции вплоть до отказа в погрузке на борт судна. Установлено, что для различных типов груза, перевозимых в различных типах контейнеров, необходимо применение разных методов для декларирования

веса со стороны грузоотправителя (экспортера). Разработаны предложения нескольких вариантов решения поставленной проблемы в импортном направлении контейнерного грузопотока из Европы в Российскую Федерацию. Унификации метода учета данных об импортном грузе позволяет решить проблему, связанную с предоставлением заведомо ложных данных со стороны импортера о весе груза, что оказывает прямо пропорциональное влияние на сумму обязательных таможенных платежей со стороны импортера в государственный бюджет России.

Ключевые слова: безопасность, SOLAS, IMO, линейное судоходство, методы декларирования веса груза VGM (Verified Gross Mass), коносамент, логистика, оптимизация таможенных платежей.

Для цитирования:

Киселёв В. С. Обоснование интеграции процедуры обязательного декларирования веса грузовой партии / В. С. Киселёв // Вестник Государственного университета морского и речного флота имени адмирала С. О. Макарова. — 2017. — Т. 9. — № 1. — С. 74–80. DOI: 10.21821/2309-5180-2017-9-1-74-80.

Введение

Документ «Транспортная стратегия России до 2030 г.» определяет основные направления развития транспортной отрасли. Главными задачами в сфере функционирования и развития транспортной системы России является создание условий для экономического прироста, путем создания новых современных технологий на транспорте, а также повышения безопасности [1]. Безопасность является основным критерием, необходимым для всех существующих видов транспорта. Особое значение она приобретает в морском контейнерном судоходстве.

На практике, существует определенный порядок грузовой операции. Судовыми агентами грузовые операции контейнерного терминала должны планироваться заблаговременно, ими же должен быть составлен Грузовой план для конкретного коммерческого судна, на основании необходимых данных о грузе регламентируемых судоходной контейнерной линией [2]. На каждый контейнер грузоотправитель обязан оформить необходимые грузовые документы, в которых указывается наименование груза и иные характеристики, например, брутто вес груза, загруженного в контейнерную единицу. Основываясь на данных, взятых из грузовых документов, судовой агент составляет Грузовой план. Данный документ является основополагающим с точки зрения безопасности, так как правильность его заполнения оказывает наивысшую степень влияния на безопасную перевозку грузов. Несмотря на усилия морских перевозчиков самостоятельно сократить число случаев заявления грузоотправителями некорректного веса контейнера, проблемы продолжают существовать. Остановимся подробнее на некоторых из них.

Проблема № 1. Из-за некорректно заявленного веса грузовой партии в товарораспорядительном документе существовала высокая опасность как для судов, так и для берегового персонала в порту погрузки, т. е. до погрузки контейнера на борт судна, морскому перевозчику подавалась некорректная информация о весе груза в контейнере. Данное обстоятельство приводило к травмам или гибели судового экипажа, значительно ухудшало остойчивость судна, приводило к падению контейнеров со штабеля, и, как следствие, повышало эксплуатационные и логистические расходы.

Проблема № 2. В морской коммерческой индустрии наиболее важным документом является коносамент, который является оборотной ценной бумагой. Данные коносамента заполняются на основании инструкций уполномоченного лица в получении груза в порту выгрузки. В ряде практических случаев вес реального груза занижается в среднем в пределах на 20 – 50 % от фактического веса груза с целью оптимизации таможенных платежей в пункте назначения, т. е. чем меньше вес груза в контейнере по документу, тем меньше вычеты со стороны грузополучателя в государственный бюджет страны. Данная проблема продолжает существовать на морском плече Европа – Санкт-Петербург.

Внутри каждой из ранее указанных проблем действующие факторы имеют структурированный причинно-следственный характер в виде последовательно развертывающихся во времени взаимодействующих процессов [3]. Примеры аварий, связанных с неверным указанием веса груза в контейнерах приведены в документе ИМО (далее по тексту IMO — DSC 17/ INF.5) [4].

Необходимо отметить, что состояние транспортной безопасности — это вопрос не только общенационального значения в России, но и глобального в целом [5].

Предпосылки интеграции декларирования веса груженого контейнера VGM (Verified Gross Mass)

При работе любого транспортного узла возникает задача прогнозирования загрузки, анализа слабых мест, задачи организации непрерывного мониторинга с целью повышения безопасности [6]. Отсутствие у перевозчика достоверной информации о весе груза в контейнере явилось причиной крушений и аварий судов. При рассмотрении ряда таких случаев в отношении неверного декларирования веса груза возникла необходимость повышения уровня безопасности торгового мореплавания [7]. В ноябре 2014 г. Международная морская организация (International Maritime Organization) приняла решение о введении поправки к конвенции SOLAS (далее по тексту — МК СОЛАС). Предоставление реальной информации о массе брутто контейнера позволит линии составлять более точный и надежный Грузовой план, безопасный для мореплавания, для жизни людей и используемого оборудования. Международная конвенция по охране человеческой жизни на море является наиболее важным из всех международных соглашений по безопасности торговых судов. Каждое судно должно выполнять требования данной конвенции. Главной целью МК СОЛАС является установление минимальных стандартов, отвечающих требованиям по безопасности при постройке, оборудовании и эксплуатации судов.

С 1 июля 2016 г. вступили в силу принятые Резолюцией MSC.380 (94) Комитета по безопасности на море Международной морской организации поправки к гл. VI «Перевозка грузов и жидкого топлива» МК СОЛАС, которые касаются проверенной массы брутто загруженных контейнеров [8]. Поправками предусматривается ужесточение ответственности тех лиц, которые вовлечены в процесс организации морской перевозки контейнеров. За некорректное указание массы брутто применяются санкции вплоть до отказа в погрузке на борт судна. А возможные расходы (демередж, хранение контейнера на терминале и досмотр), которые впоследствии могут возникнуть из-за отказа в принятии груза на борт номинированного судна, будут оплачиваться грузоотправителем. Данные меры являются основополагающими критериями в предотвращении крушений коммерческих судов. Обеспечение контроля за весом контейнера является *дисциплинирующим инструментом*, обязывающий грузоотправителей декларировать реальный вес груза, транспортируемого в контейнерах, и, как следствие, приводит к уменьшению аварийных ситуаций в морском коммерческом судоходстве.

Согласно приведенным в таблице данным, в среднем в течение 2013 – 2015 гг. по всему миру выполнялись перевозки грузов в различных видах контейнеров в количестве ориентировочно 378843 двадцатифутовых эквивалентных единиц (TEU) [9], при этом меры по сертификации и декларированию точного веса являются неотъемлемой частью определения безопасной морской перевозки.

Статистические данные морских контейнерных перевозок

Наименование судоходной линии	Динамика 2014 / 2015 гг.	2015 г., TEU тыс. шт.	2014 г., TEU тыс. шт.	2013 г., TEU тыс. шт.
APL	-13 %	4938	5654	5892
China Shipping	-4 %	7809,4	8093,4	8191,2
CMA CGM	6 %	12995	12223,7	11304,8
Cosco	4 %	9827,7	9437,5	8701,6
Evergreen	1 %	7054	6950	6800
Hamburg Süd	22 %	4101	3375	3299
Hanjin	2 %	4624,1	4552,9	4747,7
Hapag-Lloyd	25 %	7401	5907	5496
HDS	5 %	1114	1066	1111
Hyundai	-9 %	2996	3302	3130

Окончание таблицы

K Line	-6 %	2948	3144	3101,7
KMTC	22 %	1926	1583	1589
Maersk Line	1 %	19044	18884	17678
MOL	-2 %	3717	3802	3430
MSC	3 %	15311,6	14870	13860
NYK	2 %	4232	4162	3800
OOCL	0 %	5575,9	5585,5	5293,5
PIL	4 %	3756	3700	3650
SITC	4 %	2163,2	2077,4	1981,6
T. S. Lines	20 %	1600	1330	1500
UASC	38 %	6571,5	4747,4	3632,7
Wan Hai	8 %	3627,7	3356	3148
X-Press Feeders	12 %	5300	4736	3632
Yang Ming	0 %	3975,4	3967,8	3560,6
ZIM	-2 %	2308,4	2360	2519
Итого TEU	4 %	144916,9	138866,6	131049,4

Новые условия мирового судоходства существенно дополняют список факторов, оказывающих влияние на безопасность [10].

Методика сбора достаточных данных для сертификации заявленного веса груженого контейнера в порту погрузки

Выявлено два допустимых метода, установленных и одобренных ИМО, которыми может пользоваться грузоотправитель или логистический оператор по его поручению для удовлетворения требований декларирования VGM, тем самым осуществляя организацию погрузки на судно.

Метод 1. Взвешивание. Взвешивание груженого контейнера после загрузки груза: грузоотправитель взвешивает груженный опломбированный контейнер с использованием сертифицированного и отрегулированного оборудования (весы).

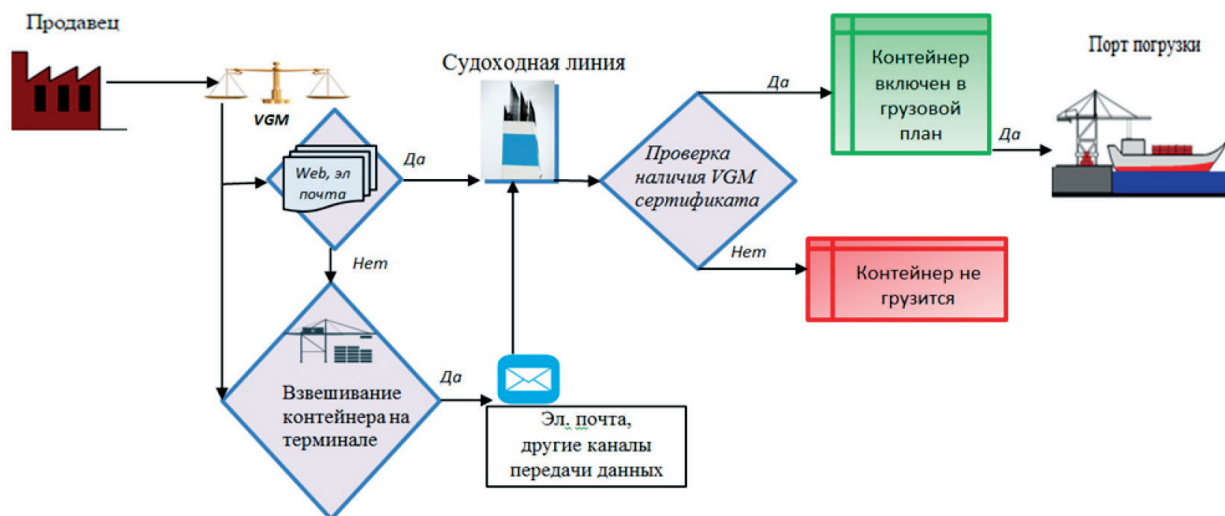
Метод 2. Подсчет грузовых единиц и содержимого контейнера. К полученному весу добавляется вес, указанный на двери контейнера (вес порожнего контейнера). Грузоотправитель складывает вес всех упаковок в контейнере, добавляет вес упаковочного и сепарационного материала, а также вес порожнего контейнера, указанного на двери контейнера. Этот метод также требует сертификации и одобрения контролирующих организаций.

Преимущество первого метода заключается в том, что данный вид определения веса подходит для любых контейнеров и грузов, загруженных в них. Преимуществом второго метода является отсутствие необходимости оплачивать взвешивание груженого контейнера на специализированных весах и, соответственно, избежать дополнительных расходов для данной процедуры. Согласно установленной процедуре морских перевозок, порожний танк-контейнер с остатками груза должен обрабатываться и оформляться как груженный, следовательно, VGM должен быть подготовлен и предоставлен.

Танк-контейнеры — это наглядный пример, когда использование второго метода неуместно, в то время как первый метод будет наиболее целесообразен, а декларирование VGM неприменимо для перевозки порожних контейнеров. Информация о проверенной массе должна быть предоставлена морскому перевозчику в порту погрузки до момента передачи фрахтового манифеста на погрузку на терминал. В среднем это происходит за два-три дня до погрузки контейнеров на борт судна.

Информация о проверенной массе предоставляется в виде сертификата о подтверждении массы брутто контейнера. Он может быть предоставлен как на бумажном носителе, так и в элек-

тронном виде, и заверен электронно-цифровой подписью. Общий алгоритм процедуры декларирования, предложенный судоходной линией Maersk, показан на следующем рисунке:



Алгоритм декларирования VGM

Благодаря внедрению методики международной организацией ИМО, удалось решить проблему № 1, а именно идентифицировать фактические весовые данные грузовой контейнерной единицы до погрузки в порту отправления на борт судна, что позволило повысить точность расчета грузового плана и вследствие этого повысить безопасность мореплавания.

Принимая во внимание состояние использования информационных технологий на водном транспорте и векторы их развития, организационные меры базируются на основе законодательно-правовой базы, что описано в [11]. Также следует акцентировать внимание на том, что вопросы обеспечения безопасности все больше обращают на себя пристальное внимание. Таким образом, безопасность водного транспорта напрямую зависит от наличия алгоритмов, позволяющих контролировать достоверность данных. Тем самым развитие информационных технологий в транспортных компаниях, и в частности в море, напрямую связано с построением систем обработки информационных потоков [12].

Предложение для унификации метода учета достоверной информации об импортном грузе при таможенном оформлении в порту выгрузки

Вследствие решения проблемы № 1 представляется возможным решить проблему № 2. Одной из первостепенных задач после выгрузки контейнера в порту назначения является таможенная очистка импортного груза. Данная процедура осуществляется со стороны грузополучателя при условии оплаты необходимых таможенных платежей в бюджет государства. Таможенная очистка груза может быть одобрена только при взаимодействии таможенного брокера со стороны грузополучателя с таможенным постом на терминале порта Санкт-Петербург.

Существует определенный регламент у ряда фидерных перевозчиков в линейном судоходстве на направлении Европа – Санкт-Петербург, когда данные для коносамента должны быть заявлены и согласованы получателем груза. Инструкции для заполнения графы «информация о грузе» подаются по поручению грузополучателя морскому перевозчику. Основополагающим документом для таможенного выпуска или одобрения для оформления внутри таможенного транзита является коносамент как расписка, подтверждающая выгрузку груза в контейнере с судна. Зачастую сведения, указанные в коносаменте, являются ложными. Данная практика существует для оптимизации таможенных платежей с целью минимизации таможенных сборов со стороны импортеров, что недопустимо в интересах государства.

Для решения проблемы № 2 необходимо:

- принять резолюцию, при которой оригинал документа декларирования VGM будет строго обязателен для процедуры прохождения таможенного оформления;
- оборудовать погрузочно-разгрузочные средства порта высокотехнологическими весовыми устройствами, которые бы позволяли определять точный вес контейнера в момент его выгрузки с судна в импортном направлении или погрузки на судно в экспортном. Это позволило бы производить мониторинг между заявленным весом контейнера в грузовом манифесте и фактическим весом, который определен в процессе грузовой операции в порту.

Выводы

1. Интеграция процедуры обязательного декларирования веса грузовой партии VGM существенно повышает точность составления грузового плана, и тем самым повышает критерий безопасности морского судоходства.
2. Представленные в работе статистические данные мировой контейнерной индустрии наглядно доказывают адекватность использования первого и второго методов взвешивания груза для издания декларации VGM.
3. Предложение по унификации учета данных импортного груза позволяет решить проблему № 2, т. е. представляется возможным повысить уровень соблюдения таможенного законодательства, обеспечив тем самым полноту обязательных таможенных платежей в государственный бюджет Российской Федерации.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Об утверждении Транспортной стратегии Российской Федерации на период до 2030 года: распоряжение Правительства РФ от 22 ноября 2008 г. № 1734-р [Электронный ресурс]. — Режим доступа: <http://government.ru/docs/22047/> (дата обращения — 15.11.15).
2. Левиков Г. А. Смешанные перевозки (состояние, проблемы, тенденции) / Г. А. Левиков, В. В. Тарабанько. — М.: РосКонсульт, 2004. — 292 с.
3. Кузнецов А. Л. Базовая модель логистических потоков через контейнерный терминал / А. Л. Кузнецов, Е. Ю. Козлова // Эксплуатация морского транспорта. — 2008. — № 2. — С. 18–20.
4. Lloyd's Register Organization, IMO DCS 17/INF.5 Agenda item 7— Development of Measures to prevent loss of containers. — UK, 2012. — 6 p.
5. Михеев В. Л. Правовые проблемы обеспечения транспортной безопасности в Российской Федерации / В. Л. Михеев // Мир юридической науки. — 2010. — № 7. — С. 4–13.
6. Майоров Н. Н. Исследование состояний контейнерного терминала на основе транспортной модели и имитационного моделирования / Н. Н. Майоров, А. В. Кириченко, В. А. Фетисов // Вестник Государственного университета морского и речного флота имени адмирала С. О. Макарова. — 2016. — № 3 (37). — С. 7–15. DOI: 10.21821/2309-5180-2016-7-3-7-15.
7. Tai S. K. The application of the verified gross mass rules in Hong Kong / S. K. Tai // Maritime Business Review. — 2016. — Vol. 1. — Is. 3. — Pp. 225–230. DOI: 10.1108/MABR-09-2016-0023.
8. Annex 1. Resolution MSC.380 (94). Amendments to the international convention for the safety of life at sea (SOLAS). — UK: International Maritime Organization, 2014. — 5 p.
9. Visser D. DynaLiners. Trades Review (2016) / D. Visser // The Netherlands: Analytical News and Commentary on the Worldwide Liner Trades, 2016. — 1 p.
10. Кузнецов А. Л. Интеллектуальные транспортные системы как направление развития контейнерных грузоперевозок / А. Л. Кузнецов, А. П. Агеев // Эксплуатация морского транспорта. — 2010. — № 1. — С. 6–9.
11. Соколов С. С. Построение защищенной информационной системы персональных данных мониторингового центра оказания телематических услуг безопасности на транспорте / С. С. Соколов, С. С. Малов, А. С. Карпина // Вестник Государственного университета морского и речного флота имени адмирала С. О. Макарова. — 2014. — № 5 (27). — С. 148–157.

12. Нырков А. П. Безопасность данных протокола SOAP в системах управления движением судов / А. П. Нырков, Д. С. Власов // X Санкт-Петербургская межд. конф. «Региональная информатика – 2006» (РИ-2006): тр. конф. — СПб.: СПОИСУ, 2007. — С. 210–213.

REFERENCES

1. Russian Federation. Government decree № 1734-r, 22 Nov. 2008. Ob utverzhdenii Transportnoi strategii Rossiiskoi Federatsii na period do 2030 goda. Web. 15 Nov. 2015 <<http://government.ru/docs/22047/>>.
2. Levikov, G. A., and V. V. Taraban'ko. *Smeshannye perevozki (sostoyanie, problemy, tendentsii)*. M.: RosKonsul't, 2004.
3. Kuznetsov, A. L., and E. Yu. Kozlova. "Basic model of logistical flows through container terminal." *Ekspluatatsiya morskogo transporta* 2 (2008): 18–20.
4. Lloyd's Register Organization, IMO DCS 17/INF.5 Agenda item 7– Development of Measures to prevent loss of containers. UK, 2012.
5. Mikheev, V. L. "Pravovye problemy obespecheniya transportnoi bezopasnosti v Rossiiskoi Federatsii." *Mir yuridicheskoi nauki* 7 (2010): 4–13.
6. Maiorov, Nikolai Nikolaevich, Aleksandr Viktorovich Kirichenko, and Vladimir Andreevich Fetisov. "Research operational management container terminal based on the transport model and simulation." *Vestnik Gosudarstvennogo universiteta morskogo i rechnogo flota imeni admirala S. O. Makarova* 3 (37) (2016): 7–15. DOI: 10.21821/2309-5180-2016-7-3-7-15.
7. Tai, Sik Kwan. "The application of the verified gross mass rules in Hong Kong." *Maritime Business Review* 1.3 (2016): 225–230. DOI: 10.1108/MABR-09-2016-0023.
8. *Annex 1. Resolution MSC.380(94). Amendments to the international convention for the safety of life at sea (SOLAS)*. UK: International Maritime Organization, 2014.
9. Visser, D. DynaLiners Trades Review (2016). The Netherlands: Analytical News and Commentary on the Worldwide Liner Trades, 2016.
10. Kuznetsov, A. L., and A. P. Ageev. "The intellectual transport systems as a direction of the container transportation development." *Ekspluatatsiya morskogo transporta* 1 (2010): 6–9.
11. Sokolov, S. S., S. S. Malov, and A. S. Karpina. "Creation of the personal information protected information system of the rendering telematic services of safety on transport monitoring center." *Vestnik Gosudarstvennogo universiteta morskogo i rechnogo flota imeni admirala S.O. Makarova* 5(27) (2014): 148–157.
12. Nyrkov, A. P., and D. S. Vlasov. "Bezopasnost' dannykh protokola SOAP v sistemakh upravleniya dvizheniem sudov." *X Sankt- Peterburgskaya mezhdunarodnaya konferentsiya «Regional'naya in-formatika – 2006» (RI-2006): tr. konf.* SPb.: SPOISU, 2007: 210–213.

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРЕ

Киселёв Вадим Сергеевич — аспирант
Научный руководитель:
Русинов Игорь Александрович —
доктор технических наук, профессор
ФГБОУ ВО «ГУМРФ имени
адмирала С.О. Макарова»
198035, Российская Федерация, Санкт-Петербург,
ул. Двинская 5/7
e-mail: vadim.s.kiselev@gmail.com

INFORMATION ABOUT THE AUTHOR

Kiselev, Vadim S. — postgraduate
Supervisor:
Rusinov Igor 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: vadim.s.kiselev@gmail.com

Статья поступила в редакцию 14 декабря 2016 г.
Received: December 14, 2016.

ВОДНЫЕ ПУТИ СООБЩЕНИЯ И ГИДРОГРАФИЯ

DOI: 10.21821/2309-5180-2017-9-1-81-87

THE CONCEPT OF DEVELOPMENT OF SHIPPING ROUTES ALONG THE NORTHERN SEA ROUTE

A. B. Afonin, A. L. Tezikov

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

The work seeks to develop general approaches to determine areas along the Northern sea route (NSR), suitable for navigation of vessels with draught up to 15, 18, 20 and more meters, and also for the design and development of a network of sea routes. It is noted the strategic importance of the NSR for current and prospective development of the Russian Federation, its role in ensuring the defense of the interests of the Arctic Region. In the waters of the NSR is expected to increase in the intensity of shipping, the increase in the proportion of large vessels with category of ice class, the extension of navigation, the construction of icebreakers new generation. There are new objects, including underwater pipelines, cables, fixed and floating oil and gas installations, floating power plant. Development of existing and construction of new ports and other transport infrastructure. The presence of branched and equipped network of shipping routes in waters of the NSR is required to the conditions of implementation of these projects. Observed unique features of Arctic shipping. Provides basic information about the structure of the existing trails, their length, and limiting the depths of the waters of the largest ports in the NSR. The proposed approach to the design and development of shipping routes in waters of the NSR, based on the solution of multicriteria problem of optimal choice. A generalized mathematical model of the water area, which includes a model of obstacles in the form of shoals, dangerous ice formations and areas with a lack of hydrographic knowledge. The model is also used three-component model routes depending on the limiting depths of ice conditions and the dimensions and categories of ice class of a ship. The proposed approach contributes to the strategic objective of identifying promising areas of the sea route suitable for navigation of vessels with draught up to 15 meters and more.

Keywords: The Northern sea route water area, shipping routes, numerous, optimization, model, criteria, design.

For citation:

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.

УДК 528.47

КОНЦЕПЦИЯ РАЗВИТИЯ СУДОХОДНЫХ ТРАСС АКВАТОРИИ СЕВЕРНОГО МОРСКОГО ПУТИ

А. Б. Афонин, А. Л. Тезиков

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

В статье ставится задача разработки общих подходов для определения районов акватории Северного морского пути (СМП), пригодных для плавания судов с осадкой до 15, 18, 20 м и более, а также для проектирования и развития сети судоходных трасс. Отмечается важное стратегическое значение СМП для современного и перспективного развития РФ, ее роли в обеспечении оборонных интересов приарктических государств. В акватории СМП ожидается возрастание интенсивности судоходства, увеличение доли крупнотоннажных судов, имеющих высокие категории ледовых усиления, продление сроков навигации, строительство ледоколов нового поколения. Появляются новые объекты, в том числе подводные трубопроводы, кабели, стационарные и плавучие нефтегазопромысловые установки, плавучие электростанции. Модернизируются существующие и строятся новые порты и другие объекты

транспортной инфраструктуры. Наличие разветвлённой и оборудованной сети судоходных трасс в акватории СМП служит необходимым условием реализации этих проектов. Отмечаются уникальные особенности арктического судоходства. Приводятся основные сведения о структуре существующих трасс, их протяженности и лимитирующих глубинах акваторий крупнейших портов СМП. Предложен подход к проектированию и развитию судоходных трасс в акватории СМП, основанный на решении многокритериальной задачи оптимального выбора. Предложена обобщённая математическая модель акватории, в которую входят модели препятствий в виде отмелей, опасных ледовых образований и районов с недостаточной гидрографической изученностью. В модели также используется трёхкомпонентная модель маршрутов, зависящих от лимитирующих глубин, состояния льда и размеров и категорий ледовых усилений судна. Предложенный подход способствует решению стратегической задачи определения перспективных участков акватории СМП, пригодных для плавания судов с осадкой до 15 м и более.

Ключевые слова: Северный морской путь, акватория, судоходные трассы, множество, оптимизация, модель, критерии, проектирование.

Для цитирования:

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.

Введение

Северный морской путь (СМП) является важнейшей частью инфраструктуры экономического комплекса арктического региона. Он объединяет морские пути, внутренние водные пути Сибири, воздушные и трубопроводные линии в единую транспортную сеть. СМП имеет важное стратегическое значение для современного и перспективного развития Российской Федерации, а также ее роли в обеспечении оборонных интересов приарктических территорий. Особое значение СМП заключается в обеспечении жизнедеятельности Арктической зоны РФ (АЗРФ) [1] и северного завоза. Это кратчайший водный путь от европейских государств до стран Азиатско-Тихоокеанского региона.

Перед Российской Федерацией стоит задача использовать географическое преимущество СМП, превратив его в конкурентоспособную транспортную систему на новой технической и технологической базе, отвечающей требованиям современности. Решение этой задачи сопряжено с реализацией масштабных и долгосрочных проектов. В ближайшие годы в акватории СМП ожидается возрастание интенсивности судоходства, увеличение доли крупнотоннажных судов, имеющих высокие категории ледовых усилений, продление сроков навигации и строительство ледоколов нового поколения [2]. В акватории СМП появляются новые объекты, в том числе подводные трубопроводы, кабели, стационарные и плавучие нефтегазопромысловые установки, плавучие электростанции. Модернизируются существующие и строятся новые порты и другие объекты транспортной инфраструктуры [3].

Наличие разветвлённой и оборудованной сети судоходных трасс в акватории СМП служит необходимым условием реализации этих проектов. Существующая сеть судоходных трасс СМП обеспечивает навигацию судов с ограниченной до 6 м осадкой, преимущественно в летне-осеннюю навигацию [4]. Работа ледоколов на этих трассах затруднена, возможности продления навигации ограничены. Выход на акваторию СМП крупнотоннажных судов с большой осадкой, имеющих высокие категории ледовых усилений, в том числе мощных атомных ледоколов, делает задачу изучения акватории СМП с целью определения районов, пригодных для обустройства новых глубоководных путей, актуальной.

Постановка задачи исследования

С 2013 г. эксплуатируется единственная высокоширотная трасса, предназначенная для судов с осадкой до 15 м [5]. Трасса проложена в районах с недостаточной гидрографической изученностью и обследована в полосе 2 км. При этих условиях отклонение за пределы полосы является опасным [6]. Задача заключается в разработке общих подходов для определения районов акватории СМП, пригодных для плавания судов с осадкой до 15, 18, 20 м и более, а также для проекти-

рования и развития сети судоходных трасс. Такая задача ранее не ставилась, но при современной тенденции увеличения как осадки, так и грузоподъемности судов является наиболее актуальной. До настоящего времени обследование акватории СМП и проектирование судоходных трасс было связано с решением отдельных тактических задач. Задача в общей постановке ориентирована в большей степени на получение стратегических решений.

Обоснование концепции развития судоходных трасс акватории СМП

Судоходные трассы на акватории СМП должны обеспечивать транзитное плавание судов, хозяйственную деятельность в акватории и жизнедеятельность Арктической зоны Российской Федерации. При проектировании судоходных трасс должны учитываться характеристики акватории и судов.

Характеристики акватории:

- гидрографическая изученность и картографическое обеспечение акватории;
- лимитирующие глубины на акваториях портов и на подходах к ним;
- контроль надёжности определения места судна;
- стеснённость акватории;
- ледовая обстановка с её сезонными и климатическими изменениями;
- удалённость от Морского спасательного координационного центра, морских спасательных подцентров и пунктов передового базирования;
- протяжённость трассы и связанные с ней показатели эффективности.

Характеристики судов:

- категория ледового усиления;
- осадка;
- ширина безопасной полосы маневрирования;
- способ ледового плавания (самостоятельное плавание или плавание под проводкой ле- докола).

СМП пролегает через Карское море, море Лаптевых, Восточно-Сибирское и Чукотское моря, а также северо-восточную часть Баренцева и северную часть Берингова морей.

Протяжённость трасс СМП колеблется от 2700 миль для околополюсных до 3500 миль для прибрежной трассы. Общая протяжённость трасс СМП превышает 14 тыс. миль. Протяжённость прибрежных трасс по морям составляет:

- Карское море — 4640 км;
- Море Лаптевых — 5590 км;
- Восточно-Сибирское море — 1745 км;
- Чукотское море — 1890 км;
- Проливы СМП — 1450 км.

Плотность сети судоходных прибрежных трасс по морям составляет:

- Карское море — 0,0053 км/км²;
- Море Лаптевых — 0,0083 км/км²;
- Восточно-Сибирское море — 0,0019 км/км²;
- Чукотское море — 0,0032 км/км².

Вход на трассы СМП с запада осуществляется через пролив Карские Ворота или с севера от мыса Желания.

Расстояние от порта Мурманск до пролива Карские Ворота составляет 528 морских миль.

Расстояние от порта Мурманск до мыса Желания 758 морских миль.

Вход на трассы СМП с востока осуществляется через пролив Дежнёва.

Картографическое обеспечение акватории определяется коллекцией морских навигационных карт, насчитывающей по состоянию на 2016 г. 680 экз. (масштаб крупнее 1:500000) и 440 экз. электронных навигационных карт [5]. Распределение общего количества карт и планов по морям акватории СМП приведено в следующей таблице:

Количество морских навигационных карт и планов на акваторию СМП

Знаменатель масштаба	Количество номеров карт и планов				
	Карское море	Море Лаптевых	Восточно-Сибирское море	Чукотское море	Всего
500000	13	11	10	5	39
200000	39	12	20	10	81
100000	68	24	45	16	153
50000	144	27	22	14	207
25000	49	21	40	21	131
10000	25	8	11	4	48
5000	11	2	6	2	21
<i>Итого</i>	349	105	154	72	680

Анализ картографических материалов акватории СМП позволяет отметить следующее.

В Карском море севернее 77 параллели имеются обширные необследованные области. В море Лаптевых слабо изучена область, расположенная к северо-востоку от полуострова Таймыр. Практически не изучена северная часть моря Лаптевых и Чукотского моря.

В основе существующей коллекции морских навигационных карт на акваторию СМП лежат материалы гидрографической съемки рельефа дна, выполненной системой параллельных галсов однолучевыми эхолотами (83 % обследованной акватории) и ледовым промером (17 % обследованной акватории) [7].

К практически необследованным участкам акватории можно отнести те из них, где съемки выполнены с подробностью 4 км и более. Доля площади таких участков составляет [8]:

- Карское море — 18 %;
- Море Лаптевых — 15 %;
- Восточно-Сибирское море — 51 %;
- Чукотское море — около 40 %.

В гидрографическом отношении недостаточно изучены в основном северные части морей, в которых из-за тяжелых ледовых условий даже в летнюю навигацию проводить измерение глубин было практически невозможно.

Мелководье в сочетании со сложными ледовыми условиями Арктики являются основными факторами, оказывающими влияние на структуру сети маршрутов. В зимне-весенний период с декабря по июнь вся акватория СМП покрыта льдами различной степени сплоченности и толщины. В летне-осенний период (с июля по ноябрь включительно) акватория освобождается ото льда за исключением площадей, занятых ледяными массивами, схема которых приведена на рисунке [9].

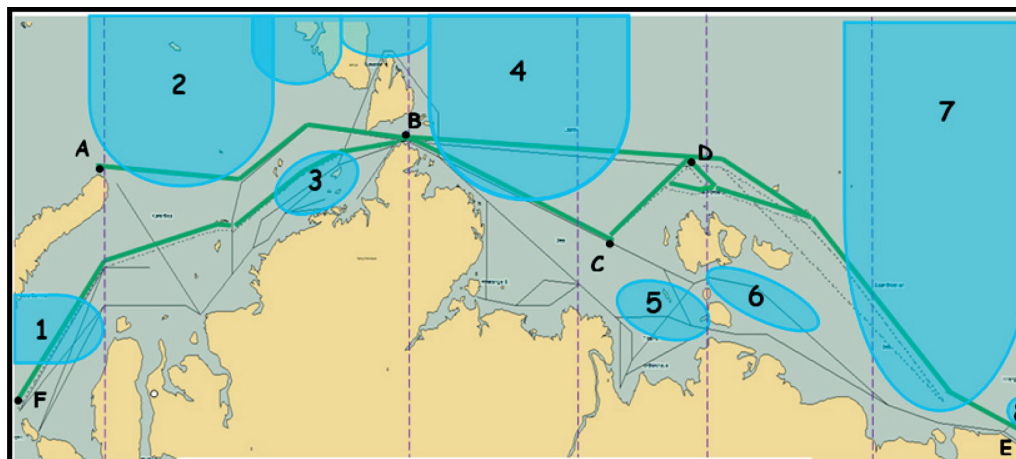


Схема расположения ледяных массивов арктических морей

Условные обозначения: A, B, ... , F — поворотные точки высокоширотных трасс (показаны зелёным цветом);
1 – 9 — ледяные массивы

На рисунке позициям 1–9 соответствуют следующие ледяные массивы: 1 — Новоземельский; 2 — Карский северный; 3 — Североземельский; 4 — Таймырский; 5 — Янский; 6 — Новосибирский; 7 — Айонский; 8 — Врангелевский. Чукотский северный (находится в северной части Чукотского моря на значительном удалении от судоходных трасс, на схеме не показан). Существующие трассы сформировались с учётом расположения ледяных массивов.

В течение последних 15 лет произошло значительное уменьшение средней ледовитости арктических морей в летне-осенний период навигации. В среднем уменьшение составило от 14 до 20 % площади. Площадь ледяных массивов в летне-осенний период также сократилась на 18 – 37 %. В зимний период ледовые условия также стали более лёгкими [10]. В результате потепления площадь акватории, свободной ото льда в летне-осенний период, увеличилась, что позволяет расширить зоны проектирования маршрутов, ранее ограниченных льдами, и продлить сроки навигации.

На акватории СМП расположены порты со следующими лимитирующими глубинами [11]: Амдерма — 1,6 м; порты Обской губы — 12,0 м; Диксон — 8,0 м; Дудинка — 11,8 м; Хатанга — 4,2 м; Тикси — 3,9 м; Певек — 9,0 м.

Морские спасательные подцентры и пункты передового базирования находятся в портах Диксон, Тикси, Певек и Провидения.

Проектирование судоходных трасс начинается с определения участков акватории, пригодных для плавания судов. Акватория характеризуется множеством препятствий $\{R(h, W, b)\}$ [12]:

$$\{R(h, W, b)\} \subset \{R_h\} \cup \{R_W\} \cup \{R_b\},$$

где $\{R_h\}$ — множество отмелей, ограниченных лимитирующими глубинами h для судов с осадкой d ; $\{R_W\}$ — множество опасных ледовых образований; $\{R_b\}$ — множество областей с недостаточной гидрографической изученностью.

Множество судоходных трасс $\{G(d, I, B)\}$ объединяет три подмножества:

$$\{G(d, I, B)\} \subset \{G_d\} \cup \{G_I\} \cup \{G_B\},$$

где $\{G_d\}$ — множество маршрутов для судов с осадкой d ; $\{G_I\}$ — множество маршрутов для судов с категорией ледовых усилений I ; $\{G_B\}$ — множество маршрутов для судов с шириной полосы безопасного маневрирования B .

Количество элементов множества маршрутов зависит от осадки судна, категории ледового усиления и ширины полосы безопасного маневрирования. Для судов с одинаковыми ледовой категорией I и шириной B , но с разными осадками, например, 6, 8 и 15 м, справедливы следующие соотношения:

$$\{G(d = 6, I, B)\} \geq \{G(d = 8, I, B)\} \geq \{G(d = 15, I, B)\}.$$

Для судов с одинаковой осадкой d и шириной B , но с разными ледовыми категориями I осадками, например, Arc 9, Arc 6 и Arc 4, справедливы следующие соотношения:

$$\{G(d, I = 9, B)\} \geq \{G(d, I = 6, B)\} \geq \{G(d, I = 4, B)\}.$$

Для судов с одинаковой осадкой d и ледовой категорией I , но с разной шириной B , например, 50, 100 и 200 м, справедливы следующие соотношения:

$$\{G(d, I, B = 50)\} \geq \{G(d, I, B = 100)\} \geq \{G(d, I, B = 200)\}.$$

Таким образом, самая широкая сеть маршрутов будет пригодна для судна, имеющего минимальную осадку, максимальную категорию ледовых усилений и минимальную ширину полосы безопасного маневрирования.

Множество участков акватории $\{F(d, I, B)\}$, по которым могут пройти маршруты $\{G(d, I, B)\}$, устанавливается соотношениями:

$$\{G(d, I, B)\} \cap \{R(h, W, b)\} = 0; \quad (1)$$

$$\{G(d, I, B)\} \cap \{F(d, I, B)\} \neq 0. \quad (2)$$

Равенство (1) показывает, что ни один из проектируемых маршрутов $\{G\}$ не должен пересекать ни одно из препятствий $\{R\}$. Неравенство (2) соответствует условию, в соответствии с которым любой из маршрутов $\{G\}$, по крайней мере, должен иметь вход в акваторию $\{F\}$.

Множество $\{G\}$ в пределах акватории $\{F\}$ бесконечно и несчётно. Среди элементов этого множества необходимо отобрать конечное подмножество маршрутов. Эта процедура выполняется с использованием критериев. Среди основных критериев используются:

$C_1\{G\}$ — удалённость маршрута от морских спасательных подцентров и пунктов передового базирования;

$C_2\{G\}$ — возможность контроля определения места судна;

$C_3\{G\}$ — стеснённость акватории;

$C_4\{G\}$ — гидрографическая изученность акватории;

$C_5\{G\}$ — протяжённость маршрута и отдельных его прямолинейных участков.

Сформированное подмножество маршрутов представляет собой основу для проектирования и обустройства судоходных путей на акватории.

Выводы

1. Задача развития судоходных трасс акватории СМП является актуальной.
2. Акватория СМП имеет уникальные природно-климатические и географические свойства, которые существенным образом влияют на подходы к проектированию развития сети судоходных трасс.
3. Развитие сети судоходных трасс относится к многокритериальным задачам выбора оптимального решения.
4. Предложен подход к решению стратегической задачи определения перспективных участков акватории СМП, пригодных для плавания судов с осадкой до 15 м и более.
5. Определены принципы формирования перспективных маршрутов в акватории СМП.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Основы государственной политики Российской Федерации в Арктике на период до 2020 года и дальнейшую перспективу / Утв. Президентом РФ 18 сентября 2008 года.
2. Рукша В. В. Структура и динамика грузоперевозок по Северному морскому пути: история, настоящее и перспективы / В. В. Рукша, М. С. Белкин, А. А. Смирнов, В. Г. Арутюнян // Арктика: экология и экономика. — 2015. — № 4 (20). — С. 104–110.
3. Олерский В. А. Комплексный проект развития Северного морского пути / В. А. Олерский // Транспортная стратегия. — XXI век. — 2015. — № 29 (2). — С. 8–9.
4. Единая государственная система информации об обстановке в Мировом океане. ЕСИМО [Электронный ресурс]. — Режим доступа: <http://www.russianports.ru/> (дата обращения: 02.01.17).
5. ФГУП «Гидрографическое предприятие» [Электронный ресурс]: офиц. сайт. — Режим доступа: <http://www.hydro-state.ru/> (дата обращения: 02.01.17).
6. Королёв И. Ю. Оценка допустимого отклонения пути судна от обследованной полосы / И. Ю. Королёв // Вестник Государственного университета морского и речного флота имени адмирала С. О. Макарова. — 2016. — № 6 (40). — С. 105–112. DOI: 10.21821/2309-5180-2016-8-6-105-112.
7. Алеева С. В. 70 лет полярной гидрографии / С. В. Алеева. — СПб: ООО «Фортекс групп», 2003. — 248 с.
8. Решетняк С. В. Гидрографическая изученность подводного рельефа арктических морей России / С. В. Решетняк // Геодезия и картография. — 2006. — № 4. — С. 57–60.
9. Миронов Е. У. Модели и методы расчета и прогноза ледовых и океанографических условий в Арктических морях / Е. У. Миронов, И. М. Ашик, В. И. Дымов [и др.] // Проблемы Арктики и Антарктики. — 2010. — № 2 (85). — С. 16–28.

10. Думанская И. О. Некоторые тенденции в изменении ледовых характеристик арктических морей в XXI веке / И. О. Думанская // Труды Гидрометеорологического научно-исследовательского центра Российской Федерации. — 2016. — № 362. — С. 129–154.

11. Проблемы Северного морского пути / под ред. А. Г. Гранберга, В. И. Пересыпкина. — М.: Наука, 2006. — 580 с.

12. Ключев В. В. Формализация оценки безопасности акватории Северного морского пути / В. В. Ключев // Вестник Государственного университета морского и речного флота имени адмирала С. О. Макарова. — 2016. — № 4 (38). — С. 69–74. DOI: 10.21821/2309-5180-2016-8-4-69-74.

REFERENCES

1. Russian Federation. Osnovy gosudarstvennoy politiki Rossijskoj Federacii v Arktike na period do 2020 goda i dal'nejshuju perspektivu. Approved by the by the President of Russian Federation 18 September 2008.

2. Ruksha, V. V., M. S. Belkin, A. A. Smirnov, and V. G. Arutyunyan. "Structure and dynamics of cargo transportation along the Northern Sea Route: the history, present and prospects." *Arctic: ecology and economy* 4(20) (2015): 104–110.

3. Olerskii, V. "Kompleksnyi proekt razvitiya Severnogo morskogo puti." *Transportnaya strategiya - XXI vek* 29(2) (2015): 8–9.

4. The unified state information system about the situation in the World ocean. ESIMO. Web. 2 Jan. 2017 <<http://www.russianports.ru/>>.

5. FGUP «Gidrograficheskoe predpriyatie». Web. 2 Jan. 2017 <<http://www.hydro-state.ru/>>.

6. Korolev, Ivan Jurevich. "Evaluation of the tolerance path of the vessel from the surveyed strip." *Vestnik Gosudarstvennogo universiteta morskogo i rechnogo flota imeni admirala S. O. Makarova* 6(40) (2016): 105–112. DOI: 10.21821/2309-5180-2016-8-6-105-112.

7. Aleeva, S. V. *70 let polyarnoi gidrografii*. SPb: ООО «Forteks grupp», 2003.

8. Reshetnyak, S. V. "Hydrographic study of the Arctic sees underwater relief of Russia." *Geodesy and Cartography* 4 (2006): 57–60.

9. Mironov, Ye. U., I. M. Ashik, V. I. Dymov, M. Yu. Kulakov, and S. V. Klyachkin. "Models and methods of calculations and forecasts of ice and oceanographic conditions in the Arctic Seas." *Problemy Arktiki i Antarktiki* 2(85) (2010): 16–28.

10. Dumanskaya, I. O. "Some tendencies in change of ice parameters of the Arctic seas in the 21st century." *Proceedings of the Hydrometeorological Research Centre of the Russian Federation* 362 (2016): 129–154.

11. Granberg, A. G., and V. I. Peresypkin, eds. *Problemy Severnogo morskogo puti*. M.: Nauka, 2006.

12. Kljuev, Vitaly Vladimirovich. "Formalization of the assessment of safety of routes of the Northern Sea Route." *Vestnik Gosudarstvennogo universiteta morskogo i rechnogo flota imeni admirala S. O. Makarova* 4(38) (2016): 69–74. DOI: 10.21821/2309-5180-2016-8-4-69-74.

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

Афонин Андрей Борисович —
кандидат технических наук, доцент
ФГБОУ ВО «ГУМРФ имени
адмирала С. О. Макарова»
198035, Российская Федерация, Санкт-Петербург,
ул. Двинская 5/7
e-mail: andrey.afonin.gma@yandex.ru, 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

Afonin, Andrej B. —
PhD, associate professor
Admiral Makarov State University
of Maritime and Inland Shipping
5/7 Dvinskaya Str., St. Petersburg, 198035,
Russian Federation
e-mail: andrey.afonin.gma@yandex.ru, 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 9 января 2017 г.
Received: January 9, 2017.

DOI: 10.21821/2309-5180-2017-9-1-88-94

VERIFICATION OF METHODS FOR ASSESSMENT OF THE PERMISSIBLE VESSEL VARIATION FROM THE HIGH-LATITUDE NORTHERN SEA ROUTE

I. Ju. Korolev

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

The article is devoted to the development of quantitative indicators and methods of evaluation of safe navigation at high-latitude routes of the Northern sea route (NSR). In connection with the expected significant growth in transit freight traffic and increasing volume of export of hydrocarbons produced in the Arctic zone, the question of the use of the high-latitude tracks the currently acquired important practical significance. High-latitude Northern sea route tracks from the Kara Strait from the South or Cape Zhelaniya North of Novaya Zemlya archipelago to the North of the Novosibirsk Islands to the Bering Strait. Trails are in areas not covered by systematic measurements. In 2010-2013, the route was surveyed in the swath width of 2 km. High-latitude Northern sea route, intended for navigation of large ships with a draught up to 15 m. Circumstances arise that force the court to go beyond the surveyed lanes in areas with a lack of hydrographic knowledge that can lead to grounding. In this paper the results of quantitative evaluation of the allowable limit of the deviation of the vessel from the boundaries of the surveyed strip of the high-latitude route. The calculations are performed in accordance with the methodology proposed earlier by the author in 2016. Quantitative dependence of the deviation from the value measured depths, ruggedness of the topography and slope of the bottom within the surveyed strip. The amount of deviation depends on the ratio of the measured depths and established threat to the vessel depth. The estimates are obtained for the confidence probability 0.68; 0.95 and 0.999. This General advice on the application of the method for the evaluation of the tolerance of the way the court-in from the recommended route in conditions of poor hydrographic bottom topography.

Keywords: Northern sea route, high-latitude route, area about-following, the deviation of the path of the vessel, depth, variance, confidence interval.

For citation:

Korolev, Ivan Ju. "Verification of methods for assessment of the permissible vessel variation from the high-latitude Northern sea route." *Vestnik Gosudarstvennogo universiteta morskogo i rechnogo flota imeni admirala S.O. Makarova* 9.1 (2017): 88–94. DOI: 10.21821/2309-5180-2017-9-1-88-94.

УДК 528.47

ПРОВЕРКА МЕТОДИКИ ОЦЕНКИ ДОПУСТИМОГО ОТКЛОНЕНИЯ СУДНА ОТ ВЫСОКОШИРОТНОЙ ТРАССЫ СЕВЕРНОГО МОРСКОГО ПУТИ

И. Ю. Королев

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

Статья посвящена проблеме разработки количественных показателей и методик оценки безопасного плавания по высокоширотным трассам Северного морского пути (СМП). В связи с ожидаемым значительным ростом транзитного грузопотока и увеличением объема вывоза углеводородов, добываемых в Арктической зоне, вопрос об использовании высокоширотных трасс в настоящее время приобрел важное практическое значение. Высокоширотные трассы проходят от пролива Карские Ворота с юга или мыса Желания с севера от архипелага Новая Земля, севернее Новосибирских островов до Берингова пролива. Трассы проложены в районах, не обеспеченных систематическим промером. В 2010 – 2013 гг. трассы были обследованы в полосе шириной 2 км. Высокоширотные трассы СМП предназначены для плавания крупнотоннажных судов с осадкой до 15 м. Возникают обстоятельства, вынуждающие суда выходить за пределы обследованной полосы в районы с недостаточной гидрографической изученностью, что может привести к посадке на мель. В данной работе приведены результаты количественной оценки допустимого предела отклонения судна от границ обследованной полосы высокоширотной трассы. Расчёты выполнены

в соответствии с ранее опубликованной автором методикой в 2016 году. Установлены количественные зависимости отклонения от величины измеренных глубин, расчленённости рельефа и наклона дна в пределах обследованной полосы. Величина отклонения зависит от соотношения измеренных глубин и установленной опасной для судна глубины. Оценки выполнены для доверительных вероятностей 0,68; 0,95 и 0,999. Даны общие рекомендации по применению метода для оценки допустимого отклонения пути судна от рекомендованного маршрута в условиях недостаточной гидрографической изученности рельефа дна.

Ключевые слова: Северный морской путь, высокоширотные трассы, площадное обследование, отклонение пути судна, глубины, дисперсия, доверительный интервал.

Для цитирования:

Королев И. Ю. Проверка методики оценки допустимого отклонения судна от высокоширотной трассы Северного морского пути / И. Ю. Королев // Вестник Государственного университета морского и речного флота имени адмирала С. О. Макарова. — 2017. — Т. 9. — № 1. — С. 88–94. DOI: 10.21821/2309-5180-2017-9-1-88-94.

Введение

В ближайшие годы ожидаемый прирост транзитного грузопотока по трассам СМП может составить 10 млн т, а по вывозу углеводородов, добываемых в Арктической зоне, достичь 60 – 80 млн т [1], [2]. Направить такой поток только на традиционные прибрежные трассы невозможно, так как из-за малых глубин прибрежные трассы могут безопасно эксплуатироваться только в летне-осеннюю навигацию судами с осадкой до 6 – 7 м [3]. Режим продленной и тем более круглогодичной навигации на большей части прибрежных трасс осуществлён быть не может из-за тяжелых ледовых условий в прибрежной зоне и глубин, недостаточных для атомных ледоколов, имеющих осадку 8 – 11 м [4], [5].

Ожидаемый грузопоток может быть направлен либо на приполюсные трассы, либо на высокоширотные [3]. Приполюсные трассы на всем своем протяжении имеют большие глубины, но практически круглый год покрыты многолетними труднопроходимыми льдами. Кроме того, они удалены от берега на значительные расстояния, что затрудняет проведение вероятных морских аварийно-спасательных операций. Высокоширотные трассы по сравнению с приполюсными имеют некоторые преимущества, связанные с меньшей удаленностью от берега и более легкими ледовыми условиями. Особенности этих трасс является то, что они проходят через районы с недостаточной гидрографической изученностью дна, часть из которых имеет относительно небольшие глубины.

К высокоширотным трассам, предназначенным для плавания крупнотоннажных судов с осадкой до 15 м, относятся [6]:

- основная высокоширотная трасса, которая проходит от пролива Карские Ворота до Берингова пролива;
- альтернативная высокоширотная трасса, которая проходит от мыса Желания до мыса Дежнева.

В настоящее время в двухкилометровой полосе основной высокоширотной трассы и отдельных участков альтернативной трассы выполнено площадное обследование, результаты которого приведены в табл. 1, данные которой заимствованы с официального сайта ФГУП «Гидрографическое предприятие» [7]. В первой графе приведены номера поворотных точек трассы, во второй — их координаты, в третьей — прямой и обратный курс участка, в четвертой — ширина обследованного участка, в пятой — минимальная обнаруженная на участке глубина.

Данные, приведенные в табл. 1, показывают, что часть высокоширотных трасс проходит по мелководью с глубинами 19 – 45 м. За пределами обследованной полосы гидрографическая изученность акваторий крайне низкая. Поэтому выход судна за границы обследованной полосы представляется чрезвычайно опасным, особенно на участках с глубинами 19 – 25 м.

Таблица 1

Навигационная характеристика основной высокоширотной трассы

Номер поворотной точки	Координаты WGS84		Курс, °	Ширина обследованного участка, км	Минимальная глубина, м
	широта	долгота			
1	70°40,00'N	058°09,85'E	36,2° – 216,2°	2	44,0
2	74°50,05'N	068°29,85'E			
3	75°45,00'N	081°30,00'E	74,5° – 254,5°	2	25,0
4	75°45,00'N	084°00,00'E	90,0° – 270,0°	2	45,6
5	77°00,00'N	092°00,00'E	56,4° – 236,4°	2	27,4
6	77°30,00'N	097°04,47'E	56,4° – 236,4°	2	27,4
			65,6° – 245,6°	2	35,0
10	75°30,00'N	128°34,00'E	53,1° – 233,1°	2	24,4
11	76°44,87'N	135°30,17'E			
12	76°36,00'N	138°40,00'E	90,0° – 270,0°	2	19,4
13	76°36,00'N	140°00,86'E	61,3° – 241,3°	2	21
14	76°42,43'N	140°51,67'E			
8a	77°14,83'N	138°27,52'E	94,0° – 274,0°	2	23,1
10a	77°11,00'N	142°36,50'E			
11	76°44,87'N	135°30,17'E	53,1° – 233,1°	2	24,4
8a	77°14,83'N	138°27,52'E			
14	76°42,43'N	140°51,67'E	106,2° – 286,2°	2	22,0
15	75°54,00'N	152°35,00'E	132,5° – 312,5°	2	22,4
16	75°00,00'N	156°30,00'E	137,7° – 317,7°	1,4	20,9
17	71°00,00'N	169°00,00'E			
10a	77°11,00'N	142°36,50'E	119,0° – 299,0°	2	28,6
15	75°54,00'N	152°35,00'E			

Вполне реально возникновение обстоятельств, вынуждающих судно покинуть пределы этой полосы, которые приведены в работе [8]. В этой же работе приводится методика оценки допустимых пределов безопасного выхода судна за границы полосы обследования. Допустимое отклонение уменьшается в сторону уменьшения глубин и увеличивается в противоположную сторону.

Арктические моря отличаются обширными мелководными районами часто со слабо выраженным наклоном и сравнительно низкой гидрографической изученностью [9]. При таких условиях безопасность плавания достигается снижением скорости судна и проведением ряда других мероприятий, направленных на снижения риска, связанного с касанием грунта или посадкой судна на мель. Методы определения опасных глубин и изобат в условиях недостаточной гидрографической изученности рассмотрены в работах [10], [11]. С учетом того, что практически вся существующая коллекция морских навигационных карт и планов арктических морей основана не на площадных, а на дискретных методах обследования дна с использованием однолучевых эхолотов, результаты этих работ относятся в основном к дискретным методам съемки.

Площадная съёмка рельефа дна с применением многолучевых эхолотов [12] представляет собой качественно новый метод гидрографических исследований, который обеспечивает получение исчерпывающей информации, достаточной для определения основных морфометрических характеристик рельефа. Применение традиционных гидрографических технологий с использованием дискретных измерений [13] не позволяло ставить и решать подобные задачи.

Цель и задачи исследования

Целью работы является проверка методики количественной оценки допустимых пределов отклонения судна от границ обследованной полосы, предложенной в работе [8]. Для достижения поставленной цели необходимо решить следующие задачи:

- разработка алгоритма вычислений;
- апробация алгоритма при различных входных данных;
- оценка зависимости полученных отклонений от заданной доверительной вероятности;
- оценка возможности применения предложенного метода [8] в практику арктического судоходства.

В качестве исходных использованы данные основной высокоширотной трассы, навигационные характеристики которой приведены в табл. 1.

Расчёты допустимых пределов отклонения выполнены для доверительных вероятностей 0,68; 0,95 и 0,999.

Проверка методики количественной оценки допустимых пределов отклонения судна от границ обследованной полосы

В общем случае величина отклонения Δy судна от середины обследованной полосы $\bar{y}$ определяется из решения следующего уравнения [8]:

$$Z_d = a + b \cdot \Delta y - t_p \cdot \sigma_z \sqrt{1 + \frac{1}{n} + \frac{\Delta y^2}{\sum_{i=1}^n (y_i - \bar{y})^2}}, \quad (1)$$

где Z_d — опасная глубина за пределами обследованной полосы; a и b — коэффициенты уравнения регрессии, соответствующего профилю рельефа в пределах обследованной полосы; Δy — отклонение судна от середины обследованной полосы; $\bar{y}$ — ордината середины обследованной полосы; t_p — коэффициент Стьюдента, соответствующий заданной доверительной вероятности p ; σ_z — показатель вертикальной расчленённости рельефа дна; y_i — ордината глубин в пределах обследованной полосы ($y_L \leq y_i \leq y_R$); y_L и y_R — ординаты точек допустимого отклонения пути судна слева и справа от обследованной полосы; n — количество отметок глубин на профиле.

Интервал $y_L \leq y \leq y_R$ разбивается на n частей, что позволяет сформировать дискретную выборку пар значений y_i и Z_i , которые используются для вычисления коэффициентов a и b по формулам [14]:

$$\left. \begin{aligned} b &= \frac{\sum_{i=1}^n y_i \cdot \sum_{i=1}^n Z_i - n \cdot \sum_{i=1}^n (y_i \cdot Z_i)}{\left(\sum_{i=1}^n y_i\right)^2 - n \cdot \sum_{i=1}^n y_i^2}; \\ a &= \frac{\sum_{i=1}^n y_i \cdot \sum_{i=1}^n (y_i \cdot Z_i) - \sum_{i=1}^n y_i^2 \cdot \sum_{i=1}^n Z_i}{\left(\sum_{i=1}^n y_i\right)^2 - n \cdot \sum_{i=1}^n y_i^2}. \end{aligned} \right\} \quad (2)$$

Показатель вертикальной расчленённости σ_z вычисляется по этой же выборке глубин Z_i по формуле [13]:

$$\sigma_z = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (z_i - \bar{z})^2}{n-2}}, \quad (3)$$

где верхняя черта означает среднее значение измеренного параметра.

Результаты вычисления приведены в табл. 2.

Таблица 2

**Оценки допустимых пределов отклонений судна
от границ участков высокоширотных трасс**

Номер участка трассы	Минимальная глубина, м	Оценка допустимого отклонения при доверительной вероятности, мили		
		0,68	0,95	0,999
1 – 2	44,0	7,1	7,0	6,5
2 – 3	25,0	2,0	1,9	1,6
3 – 4	45,6	7,7	7,6	7,3
4 – 5	27,4	2,7	2,5	2,3
5 – 6	27,4	2,7	2,5	2,3
10 – 11	24,4	1,9	1,7	1,5
12 – 13	19,4	0,5	0,4	0,1
13 – 14	21,0	0,9	0,8	0,5
8a – 10a	23,1	1,5	1,4	1,1
11 – 8a	24,4	1,9	1,7	1,5
14 – 15	22,0	1,2	1,1	0,8
15 – 16	22,4	1,3	1,2	0,9
16 – 17	20,9	0,9	0,8	0,5
10a – 15	28,6	3,0	2,9	2,6

При расчётах за опасную глубину принималась глубина 17 м.

Результаты вычислений позволяют отметить следующие закономерности. Минимально допустимые отклонения относятся к участку 12 – 13. При доверительной вероятности 0,68 минимально допустимое отклонение составляет 0,5 миль, при доверительной вероятности — 0,95 – 0,4 мили и при доверительной вероятности — 0,999 – 0,1 мили.

Максимальные допустимые отклонения относятся к участку 3 – 4. При доверительной вероятности 0,68 максимально допустимое отклонение составляет 7,7 миль, при доверительной вероятности — 0,95 – 7,6 миль и при доверительной вероятности — 0,999 – 7,3 миль.

На участке 12 – 13 минимальная глубина отличается от опасной глубины на 2,4 м. Этот участок самый мелководный и поэтому отклонение от его границ влево и вправо практически недопустимо. На участке 3 – 4 допустимы максимальные отклонения от его границ, так как этот участок самый глубоководный из приведённых в табл. 1 и 2 на трассе. Минимальная глубина на этом участке отличается от опасной глубины на 28,6 м.

Для каждого участка величина допустимого предела отклонения зависит от выбранной для него доверительной вероятности. Чем больше доверительная вероятность оценки отклонения, тем её величина меньше. Эта зависимость нелинейная. Её нелинейный характер сильнее проявляется на участках, где разность между минимальной и опасной глубинами наименьшая.

Выводы

1. Задача количественной оценки допустимых пределов отклонения судна от границ обследованной полосы является новой, так как её постановка и предложение решений стало возможным только после появления и применения в гидрографии многолучевых акустических систем, обеспечивающих площадное непрерывное обследование дна.

2. Методика количественной оценки допустимых пределов отклонения судна от границ обследованной полосы, предложенная в работе [8], показала свою работоспособность.

3. Результаты расчётов не противоречат сложившимся представлениям о безопасном судоходстве в условиях недостаточной гидрографической изученности.

4. Методика может быть использована при разработке рекомендаций по плаванию крупнотоннажных судов по высокоширотным трассам, обследованным в ограниченной полосе.

5. Эта методика может быть использована при планировании и выполнении спасательных операций, а также при планировании гидрографических работ.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Олерский В. Комплексный проект развития Северного морского пути / В. Олерский // Транспортная стратегия — XXI век. — 2015. — № 29 (2). — С. 8–9.
2. Давыденко А. А. Северный морской путь — комплексный инфраструктурный проект / А. А. Давыденко // Транспортное дело России. — 2010. — № 3. — С. 3–4.
3. Проблемы Северного морского пути / под ред. А. Г. Гранберга, В. И. Пересыпкина. — М.: Наука, 2006. — 581 с.
4. Рукша В. В. Структура и динамика грузоперевозок по Северному морскому пути: история, настоящее и перспективы / В. В. Рукша, М. С. Белкин, А. А. Смирнов [и др.] // Арктика: экология и экономика. — 2015. — № 4 (20). — С. 104–110.
5. Сазонов К. Е. Влияние мелководья на ледовые качества судна / К. Е. Сазонов, А. В. Рыжков // Мир транспорта. — 2013. — Т. 11. — № 4 (48). — С. 40–47.
6. Баталин Г. А. Навигационно-гидрографическое обеспечение в Арктическом регионе / Г. А. Баталин, С. В. Решетняк // Морской флот. — 2008. — № 3. — С. 34–38.
7. ФГУП «Гидрографическое предприятие» [Электронный ресурс]: официальный сайт. — Режим доступа: <http://www.hydro-state.ru/> (дата обращения: 06.01.17).
8. Королёв И. Ю. Оценка допустимого отклонения пути судна от обследованной полосы / И. Ю. Королёв // Вестник Государственного университета морского и речного флота имени адмирала С. О. Макарова. — 2016. — № 6 (40). — С. 105–112. DOI: 10.21821/2309-5180-2016-8-6-105-112.
9. Решетняк С. В. Гидрографическая изученность подводного рельефа арктических морей России / С. В. Решетняк // Геодезия и картография. — 2006. — № 4. — С. 57–60.
10. Афонин А. Б. Особенности построения изобат в условиях недостаточной гидрографической изученности подводного рельефа / А. Б. Афонин, С. А. Лутков, А. Л. Тезиков // Вестник Государственного университета морского и речного флота имени адмирала С. О. Макарова. — 2015. — № 4 (32). — С. 90–95.
11. Афонин А. Б. Разработка методов оценки проходных глубин на трассах Северного морского пути в зависимости от подробности съёмки рельефа дна / А. Б. Афонин, Е. О. Ольховик, А. Л. Тезиков // Вестник Государственного университета морского и речного флота имени адмирала С. О. Макарова. — 2016. — № 4 (38). — С. 62–68. DOI: 10.21821/2309-5180-2016-8-4-62-68.
12. IHO Standards for Hydrographic Surveys. — 5th Edition. — February 2008. — Special Publication № 44. — International Hydrographic Bureau, Monaco. — 27 p.
13. Правила гидрографической службы № 4. Съёмка рельефа дна. — МО СССР ГУНиО, 1984. — Часть II. Требования и методы. — 263 с.
14. Дрейпер Н. Прикладной регрессионный анализ / Н. Дрейпер, Г. Смит. — ООО «И. Д. «Вильямс», 2007. — 912 с.

REFERENCES

1. Olerskii, V. “Kompleksnyi proekt razvitiya Severnogo morskogo puti.” *Transportnaya strategiya — XXI vek* 29(2) (2015): 8–9.
2. Davydenko, A. A. “Severnii morskoi put’ — kompleksnyi infrastrukturnyi proekt.” *Transport business of Russia* 3 (2010): 3–4.
3. Granberg, A. G., and V. I. Peresyarkin, eds. *Problemy Severnogo morskogo puti*. M.: Nauka, 2006.

4. Ruksha, V. V., M. S. Belkin, A. A. Smirnov, and V. G. Arutyunyan. "Structure and dynamics of cargo transportation along the Northern Sea Route: the history, present and prospects." *Arctic: ecology and economy* 4(20) (2015): 104–110.
5. Sazonov, Cyril E., and Alexander V. Ryzhkov. "Shallow water impact on ice performance of the ships". *Mir transporta* 11.4(48) (2013): 40–47.
6. Batalin, G., and S. Reshetnyak. "The navigational and hydrographic support for shipping in the Arctic region." *Marine Fleet* 3 (2008): 34–38.
7. FGUP «Gidrograficheskoe predpriyatie». Web. 6 Jan. 2017 <<http://www.hydro-state.ru/>>.
8. Korolev, I. Yu. "Evaluation of the tolerance path of the vessel from the surveyed strip." *Vestnik Gosudarstvennogo universiteta morskogo i rechnogo flota imeni admirala S. O. Makarova* 6(40) (2016): 105–112. DOI: 10.21821/2309-5180-2016-8-6-105-112.
9. Reshetnyak, S. V. "Hydrographic study of the Arctic sees underwater relief of Russia." *Geodesy and cartography* 4 (2006): 57–60.
10. Afonin, A. B., S. A. Lutkov, and A. L. Tezikov. "Features creation of depth contours in the conditions of insufficient hydrographic study of the seabed." *Vestnik Gosudarstvennogo universiteta morskogo i rechnogo flota imeni admirala S. O. Makarova* 4(32) (2015): 90–95.
11. Afonin, A. B., E. O. Ol'hovik, and A. L. Tezikov. "Development of the assessment methods of anadromous depths on the northern sea route depending on the detail of survey of the bottom relief." *Vestnik Gosudarstvennogo universiteta morskogo i rechnogo flota imeni admirala S. O. Makarova* 4(38) (2016): 62–68. DOI: 10.21821/2309-5180-2016-8-4-62-68.
12. *IHO Standards for Hydrographic Surveys*. 5th Edition, February 2008. Special Publication No. 44. International Hydrographic Bureau, Monaco.
13. *Pravila gidrograficheskoi sluzhby № 4. S'emka rel'efa dna*. MO SSSR GUNiO, 1984. Chast' II. Trebovaniya i metody.
14. Drejper, N., and G. Smit. *Prikladnoj regressionnyj analiz*. Izdatelskij dom «Viljams», 2007.

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРЕ

Королев Иван Юрьевич — аспирант
Научный руководитель:
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: i.korolev@fertoing.ru

INFORMATION ABOUT THE AUTHOR

Korolev, Ivan Ju. — postgraduate
Supervisor:
Tezikov Aleksandr L'vovich —
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: i.korolev@fertoing.ru

Статья поступила в редакцию 16 января 2017 г.
Received: January 16, 2017.

DOI: 10.21821/2309-5180-2017-9-1-95-110

THE USE OF MODERN MEANS OF STRAIN MEASURING AT RESEARCH OF INSTALLATIONS OF VOLGOGRAD HYDROELECTRIC COMPLEX

R. V. Kozlov¹, V. Li², K. P. Morgunov³

1 — JSC «NIIES», Moscow, Russian Federation

2 — LLC «Firma G.F.K.», Moscow, Russian Federation

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

Watching lock chambers gateway number 30 and number 31 of the Volgograd hydroelectric during the operation showed that the main parameters to be controlled are the piezometric levels of groundwater in fillings chambers values pressure on the bottom of the camera, the concrete situation and the movement of the top wall chambers under different operating loads. Measuring movement of the top of the wall is the most problematic in the existing now in the current monitoring system of hydroelectric — available means of geodetic measurement of dynamic deformations of the walls of the cameras is almost impossible. Ongoing measurement facilities allow only finite values of relative displacement chamber walls during the filling-emptying. To determine the independent movement of each element in the process of changing the water level in the chamber is not possible by existing methods. Processes occurring in the locking of vessels, rather dynamic, the duration of the passage of the ship through the gateway are within 40–60 minutes. During this time the chamber is filled, and its walls are deflected in the direction of filling, then in the process of emptying the chamber top wall is moved in the axis of the chamber. The deviation depends on the design of the walls, the nature of backfill soil, the groundwater level in the filling, and other factors. The dynamics of these processes (the movement speed and amplitude) affect the stability of constructions gateway and magnitude of the stresses arising in them, which in turn determines the operational safety of locking processes. Performed on shipping Volgograd hydroelectric plants pilot project on the measurement of displacements structures using Total Station has demonstrated the ability to produce a whole range of information about the movements of structural elements. Analysis of such information creates the possibility of a more objective assessment of the state of the ship lock.

Keywords: ship lock, filling and emptying of the lock chamber, constructions movement, total station, observing program, redefinition of the coordinates.

For citations:

Kozlov, Roman V., Vladimir Li, and Konstantin P. Morgunov. "The use of modern means of strain measuring at research of installations of Volgograd hydroelectric complex." *Vestnik Gosudarstvennogo universiteta morskogo i rechnogo flota imeni admirala S.O. Makarova* 9.1 (2017): 95–110. DOI: 10.21821/2309-5180-2017-9-1-95-110.

УДК 626.42

ИСПОЛЬЗОВАНИЕ СОВРЕМЕННЫХ СРЕДСТВ ИЗМЕРЕНИЯ ДЕФОРМАЦИЙ ПРИ ИССЛЕДОВАНИИ СООРУЖЕНИЙ ВОЛГОГРАДСКОГО ГИДРОУЗЛА

Р. В. Козлов¹, В. Ли², К. П. Моргунов³

1 — АО «НИИЭС», Москва, Российская Федерация

2 — ООО «Фирма Г.Ф.К.», Москва, Российская Федерация

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

Наблюдение за состоянием камер шлюзов № 30 и № 31 Волгоградского гидроузла в процессе эксплуатации показало, что основными параметрами, которые необходимо контролировать, являются пьезометрические уровни грунтовых вод в засыпках камер, значения противодействия на днища камер, состояние бетона и перемещение верха стен камер под воздействием различных эксплуатационных

нагрузок. Измерение перемещения верха стен является наиболее проблемным в существующей ныне на действующих гидроузлах системе мониторинга — имеющимися геодезическими средствами измерять динамику деформаций стен камер практически невозможно. Проводимые на объектах измерения позволяют получать только конечные значения относительных перемещений стен камер шлюза в процессе наполнения — опорожнения. Определить независимые перемещения каждого элемента в процессе изменения уровня воды в камере существующими методами нельзя. Процессы, происходящие при шлюзовании судов, достаточно динамичны, длительность прохода судна через шлюз находится в пределах 40 – 60 мин. В течение этого времени камера наполняется, и её стены отклоняются в сторону засыпки, затем в процессе опорожнения верх стен камеры перемещается в сторону оси камеры. Величина отклонения зависит от конструкции стен, характера грунтов засыпки, уровня грунтовых вод в засыпке и других факторов. Динамика этих процессов (скорости и амплитуды перемещений) влияет на устойчивость конструкций шлюза и величины напряжений, возникающих в них, что, в свою очередь, определяет эксплуатационную безопасность процессов судопропуска. Выполненный на судоходных сооружениях Волгоградского гидроузла пилотный проект по измерениям перемещений конструкций с использованием электронного тахеометра продемонстрировал возможность получения целого комплекса информации о перемещениях элементов конструкций. Анализ такой информации создает возможность более объективной оценки состояния судоходного шлюза.

Ключевые слова: судоходный шлюз, наполнение и опорожнение камеры шлюза, перемещение конструкций, автоматический тахеометр, программа наблюдений, переопределение координат

Для цитирования:

Козлов Р. В. Использование современных средств измерения деформаций при исследовании сооружений Волгоградского гидроузла / Р. В. Козлов, В. Ли, К. П. Моргунов // Вестник Государственного университета морского и речного флота имени адмирала С. О. Макарова. — 2017. — Т. 9. — № 1. — С. 95–110. DOI: 10.21821/2309-5180-2017-9-1-95-110.

Введение

Одним из важнейших параметров, который необходимо наблюдать в процессе функционирования судоходных гидротехнических сооружений, является перемещение верха стен камер под воздействием различных эксплуатационных нагрузок [1], [2]. При этом проводимые на российских шлюзах измерения с использованием инварной проволоки или лазерных дальнометров позволяют получать только конечные значения относительных перемещений стен камер при наполнении — опорожнении. Определить независимые (абсолютные) перемещения каждого элемента в процессе изменения уровня воды в камере используемыми методами невозможно, несмотря на то, что такие данные представляли бы значительный интерес для оценки напряженно-деформированного состояния конструкций и устойчивости сооружения. Кроме того, зная характер деформирования стен по мере роста нагрузки, можно было бы оценить, как ведет себя днище камеры.

Несмотря на то, что и осадки, и горизонтальные перемещения конструкций камер шлюзов № 30 и 31 Волгоградского гидроузла в течение последних 20 лет наблюдений стабилизировались [3], [4], тем не менее наблюдаемый в последние годы процесс изменения интенсивности судопропуска на шлюзах может вызвать дополнительные деформации. Более того, как показали опытные прецессионные измерения, характер деформаций стен камер со стороны межшлюзья отличается от деформации внешних стен камер. Безусловно, для детальной оценки поведения камер шлюзов недостаточны редкие геодезические замеры и измерения ширины камеры, желательно использовать более точные методы измерений, которые позволили бы получать полную информацию о перемещениях каждой из стен камер в процессе опорожнения — наполнения камеры, а также при перемещениях, вызванных температурными воздействиями (суточными и сезонными).

В последние годы появились новые средства измерения перемещений и деформаций — автоматические тахеометры [5] – [12]. Эти приборы дают возможность измерять весьма незначительные величины деформаций в динамике, что создает возможность наблюдать перемещения

элементов конструкции камеры шлюза. Хотя из-за незначительности перемещений верха стен камер при наполнении и опорожнении (1,5 – 2,0 мм) даже использование такого современного прибора может не дать нужного результата. Но, во всяком случае, что точно можно будет уловить, это перемещения стен камеры при сезонных температурных колебаниях. Получение даже этих сведений могло явиться серьезным успехом в совершенствовании системы мониторинга, а также расширить наши представления о процессах деформирования камеры шлюза в период эксплуатации.

В рамках выполнения комплексного анализа состояния судоходных сооружений Волгоградского гидроузла был опробован пилотный проект использования электронного тахеометра для наблюдения за динамикой деформирования камер шлюзов.

1. Алгоритм работы системы, использующей электронный тахеометр

Электронный тахеометр — это геодезический прибор для измерения расстояний и углов. Расстояния определяются по разности фаз испускаемого и отраженного луча. Прямоугольные координаты объектов тахеометры определяют путем преобразования полярных координат (расстояний до наблюдаемых точек и углов) по формулам:

$$x = r \cos \varphi; y = r \sin \varphi.$$

По результатам анализа изменения положения нескольких контролируемых точек можно сделать выводы о состоянии как отдельных конструктивных элементов, так и сооружения в целом. При этом необходимо обеспечить стабильность положения самого тахеометра, координаты которого можно также периодически переопределять *методом обратной засечки* и, при необходимости, выполнять перерасчет его координат.

В рамках решения задачи по наблюдению за перемещением стен шлюза алгоритм работы электронных тахеометров-автоматов может состоять из следующих действий:

- тахеометр устанавливается в удобной и по возможности неподвижной точке гидроузла и позиционируется относительно опорных точек (такими опорными точками могут служить как пункты, зафиксированные в локальной системе координат гидроузла, так и пункты государственного геодезического обоснования, стабильность которых не вызывает сомнений);
- определяются контрольные точки на элементах конструкции шлюза, положение которых будет наблюдаться индивидуально (абсолютные перемещения) или попарно (перемещения точек друг относительно друга);
- составляется программа наблюдений контрольных точек: очередность их опроса, периодичность наблюдений;
- вводится формула для вычисления горизонтальных проложений (расстояний) между контрольными точками;
- после запуска системы периодически переопределяются координаты тахеометра относительно опорных точек, измеряются координаты контрольных точек и горизонтальные проложения между ними и от них до тахеометра.

Результаты выполненных измерений могут в графическом или табличном виде быть представлены пользователю (оператору).

В случае включения автоматического тахеометра в систему мониторинга и управления возможна оценка полученных данных по заданным критериям, выработка с использованием специализированного программного обеспечения управленческих команд и передача их на исполнительные механизмы системы. Общий алгоритм работы такой системы представлен на рис. 1.

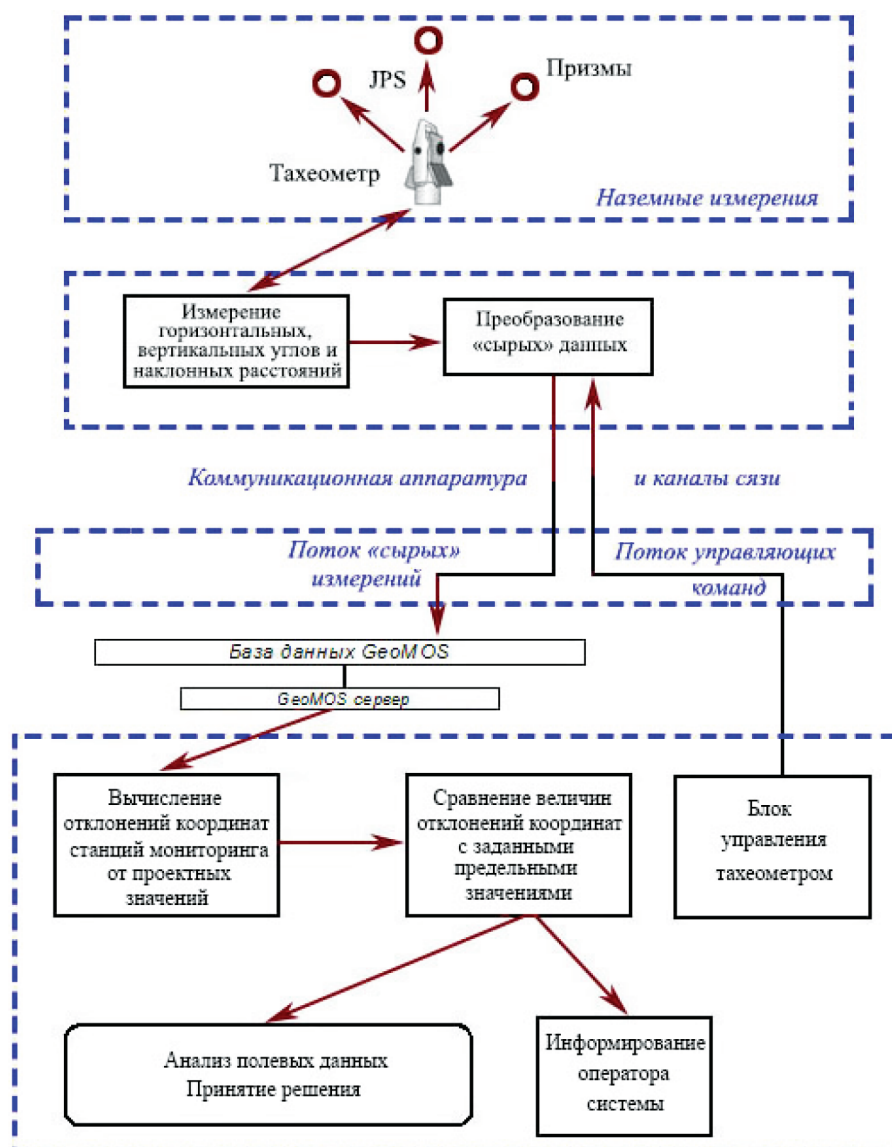


Рис. 1. Алгоритм работы системы, основанной на электронных тахеометрах

2. Установка оборудования на сооружениях Волгоградского гидроузла

Для изучения возможностей использования электронных тахеометров по наблюдению за перемещениями конструкций на шлюзах Волгоградского гидроузла была проведена серия измерений. При этом предполагалось решение следующих задач:

- периодическое переопределение горизонтальных проложений между парными контрольными точками, расположенными на противоположных стенах шлюза, что позволяет судить об изменениях этого относительного расстояния под влиянием различных факторов;
- периодическое переопределение координат контрольных точек относительно опорных пунктов, что позволяет судить об изменении их абсолютного положения в пространстве.

Для проведения измерений на сооружениях шлюзов № 30 и 31 был использован электронный тахеометр Leica TM30 [13]. В соответствии с техническими данными прибора, он обеспечивает угловую точность измерения 0,5" и точность измерения расстояния до миллиметра на расстояниях до 1000 м. Выполнение программы наблюдений обеспечивалось управляющим программным обеспечением (ПО) GeoMos.

По результатам рекогносцировочных работ, проведенных на гидроузле, были выбраны места установки оборудования, общая схема расстановки которого приведена на рис. 2.

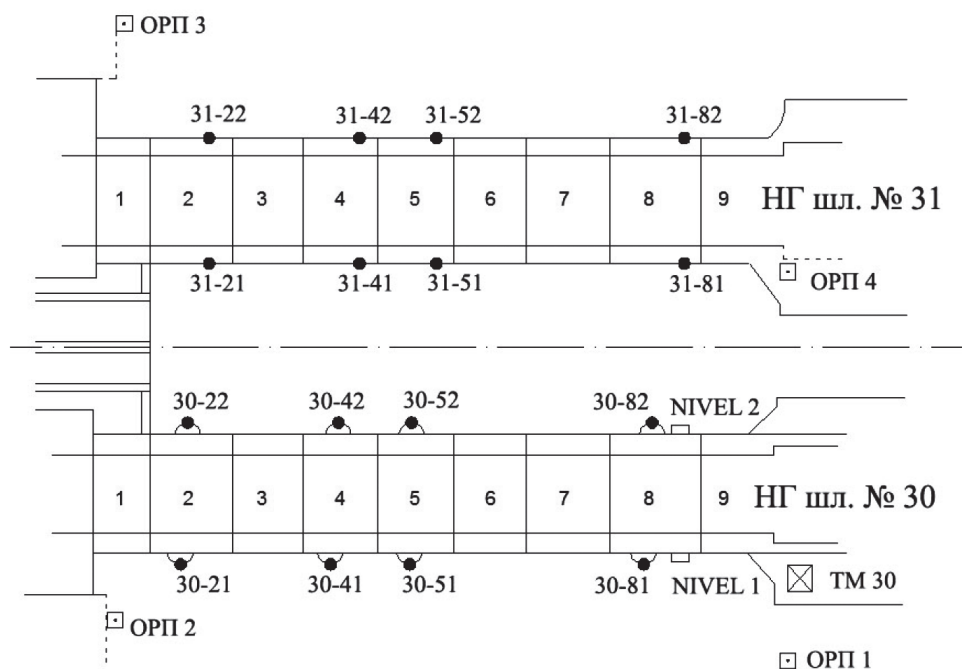


Рис. 2. Схема установки оборудования на гидроузле:
TM 30 — тахеометр; NIVEL 1 и NIVEL 2 — датчики углов наклона;
ОПР 1 – ОПР 4 — опорные ориентирные пункты

Тахеометр был установлен в районе нижней головы шлюза № 30 на пилоне трубчатой конструкции, управляющий промышленный компьютер смонтирован в специальном ящике в непосредственной близости от пилона и соединен с тахеометром кабелем. Над пилоном смонтирован навес для защиты прибора от осадков (рис. 3).

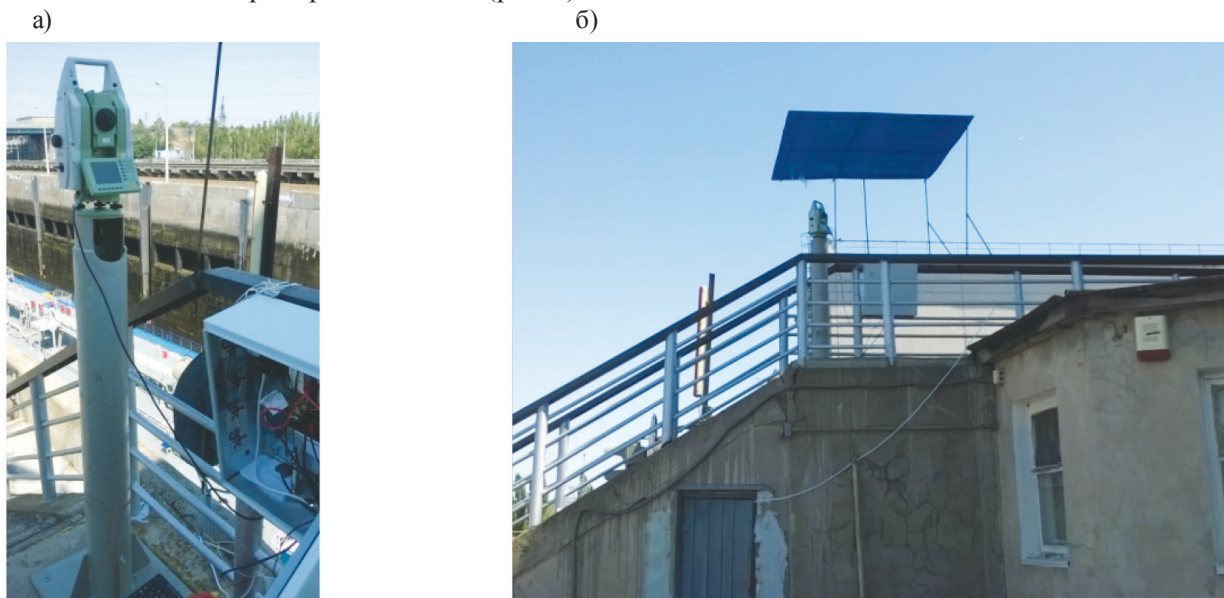


Рис. 3. Установка тахеометра:

а — тахеометр на пилоне (рядом компьютер); б — тахеометр под навесом

Для периодического переопределения координат точки установки электронного тахеометра в каждом цикле измерений было предусмотрено использование четырех ориентирных твердых пунктов ОПР 1 – ОПР 4 (рис. 4, а). Пункты были закреплены L-образными призмами на стабильном осно-

вании. Два датчика углов наклона Nivel [14] были смонтированы на противоположных сторонах восьмой секции шлюза № 30 (рис. 4, б). К местам установки датчиков подведено электропитание напряжением 220 В, данные от датчиков в управляющий компьютер поступали по беспроводной сети Wi-Fi.

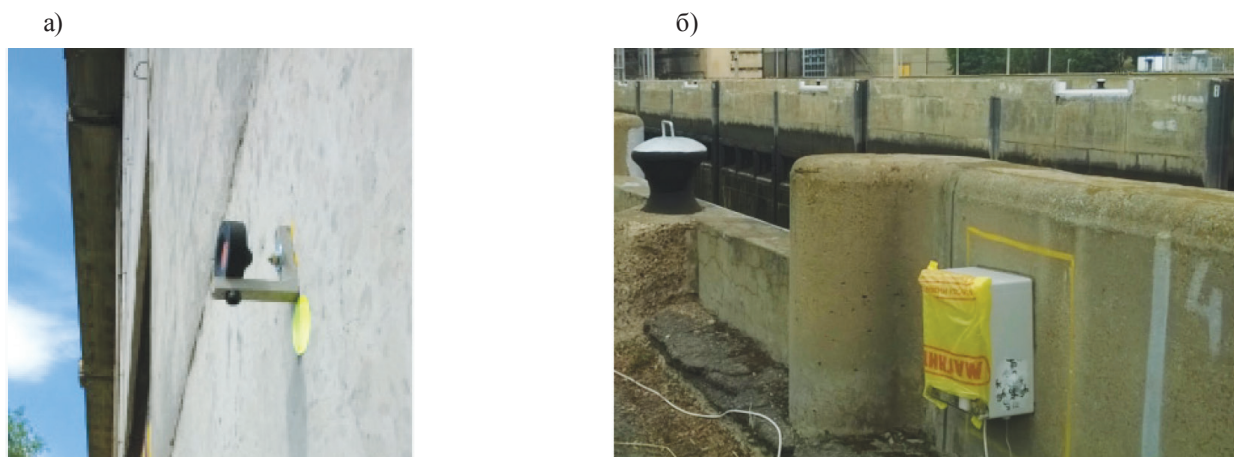


Рис. 4. Установка оборудования:
а — опорный пункт ОРП 1; б — датчик углов наклона Nivel

Контролируемые точки были закреплены призмами попарно на секциях 2, 4, 5, 8 шлюзов № 30 и 31. На шлюзе № 30 точки закреплены посередине секций на ограждении рымных камер, на шлюзе № 31 призмы установлены на ограждении секций (рис. 5). Расстояние от тахеометра до самой дальней точки (31-22) составило 266,5 м, до самой ближней (30-81) — 46,7 м (см. рис. 2).



Рис. 5. Установка отражательных призм на секциях шлюзов:
а — призма на камере плавучего рыма; б — призма на ограждении секции камеры

Программа наблюдений предполагала периодическую установку тахеометра на пилоне для проведения очередного цикла наблюдений и следующий алгоритм измерений:

- периодическое переопределение координат базовой точки и ориентирование прибора методом обратных засечек перед началом очередного цикла наблюдений;
- определение координат контрольных точек полярным способом при двух кругах каждые 5 мин;
- снятие отсчетов с комбинированного датчика температуры и давления каждые 10 мин (полученные данные используются для автоматического введения поправок в измеренные тахеометром линии).

Контрольные точки на шлюзах № 30 и 31 были объединены в две группы, для каждой из которых действовала вышеописанная программа. Данные поступали на управляющий компьютер

и хранились в базе данных, средствами приложений GeoMos просматривалась и визуализировалась как оперативная информация, так и информация, полученная из базы данных.

Относительное плановое положение стенок шлюзов как за длительный период, так и в периоды шлюзований определялось с помощью вычислений или непосредственных измерений горизонтальных проложений между парными точками на противоположных стенках секций. Горизонтальные проложения в данном проекте получались с использованием нескольких способов, основанных на разных принципах. Сходимость результатов, полученных разными способами, подтвердила их надежность.

Первый способ — периодическое вычисление расстояний между двумя контрольными точками по их координатам, полученным тахеометром. Этот способ был реализован при помощи виртуального датчика (вставленной в управляющее ПО формулы), для которого назначается программа наблюдений (вычислений) с периодичностью 5 мин. Преимущество этого способа состоит в том, что количество определяемых расстояний может быть достаточно велико, без существенного увеличения стоимости оборудования. Ограничения — точность полученных полярным методом координат контрольных точек и, соответственно, вычисленных расстояний зависит от внешних условий. В проекте вычислялось восемь линий.

Второй способ — определение горизонтальных перемещений контрольных точек в направлении, перпендикулярном оси шлюза, при помощи высокоточных датчиков углов наклона. Два датчика Nivel были установлены на противоположных стенках восьмой секции шлюза № 30. Управление датчиками осуществлялось ПО GeoMos. Для вычисления горизонтальных смещений также может применяться виртуальный сенсор (формула) для пересчета угла наклона в линейное смещение. Для получения общего изменения длины линии между двумя противоположными стенками результаты, полученные по формулам для каждого датчика, складываются и могут быть выведены в виде графика как отдельный виртуальный сенсор. Преимуществами способа являются полностью автоматическая и практически не обслуживаемая работа после установки и наладки, высокая чувствительность датчиков, прямое измерение величин наклонов стенок шлюза в двух плоскостях. Ограничением служит достаточно высокая стоимость при большом количестве датчиков.

Третий способ — непосредственное измерение расстояний между двумя противоположными стенками с помощью тахеометра. При этом тахеометр устанавливается на штативе или специальном кронштейне в створе с парой точек, ориентируясь на дальнюю точку из пары, запускается управляющая программа, выполняются автоматические измерения с заданной периодичностью, формируется текстовый файл отчета с измеренными расстояниями. Затем оборудование может быть переставлено на следующую пару точек.

Во время проведения работ было опробовано два способа контроля стабильности положения самого тахеометра:

- периодическое переопределение координат методом обратной линейно-угловой засечки;
- методом линейной засечки.

Засечка выполнялась автоматически с периодом 15 – 40 мин. Координаты станции, от которых рассчитывались координаты контрольных точек, принимались по результатам засечки, выполненной вручную в начале каждого рабочего дня, результаты автоматических повторных измерений использовались только для оценки работы системы. В процессе проведения измерений выяснилось, что пилон с тахеометром перемещается вместе с сооружением. При этом разброс результатов, полученных из линейной засечки, был в 2 раза меньше разброса координат линейно-угловой засечки. С учетом перемещения самого тахеометра корректировались измеряемые величины перемещений контрольных точек.

3. Анализ результатов наблюдений

Наблюдения на шлюзах № 30 и 31 Волгоградского гидроузла проводились в летне-осенний период 2015 г. Температуры наружного воздуха достигали значений +35 – 37 °С.

Трехмерные перемещения контрольных точек

На графике рис. 6 приведен характерный для всего периода наблюдений короткий отрезок времени, содержащий данные по трем шлюзованиям в период с 11 ч 30 мин до 14 ч 20 мин 07 августа 2015 г. Среднее расстояние для данных контрольных точек от тахеометра составляет 46,7 м. Возвратные деформации в плане по точке 30-81 в среднем составляют 0,4 – 0,5 мм, по точке 30-82 в среднем 4,2 – 4,5 мм в направлении, перпендикулярном оси шлюза, в направлении вдоль оси — в среднем 0,3 – 0,5 мм для обеих точек. По высоте видны четко зафиксированные упругие деформации величиной 2 мм для обеих точек.

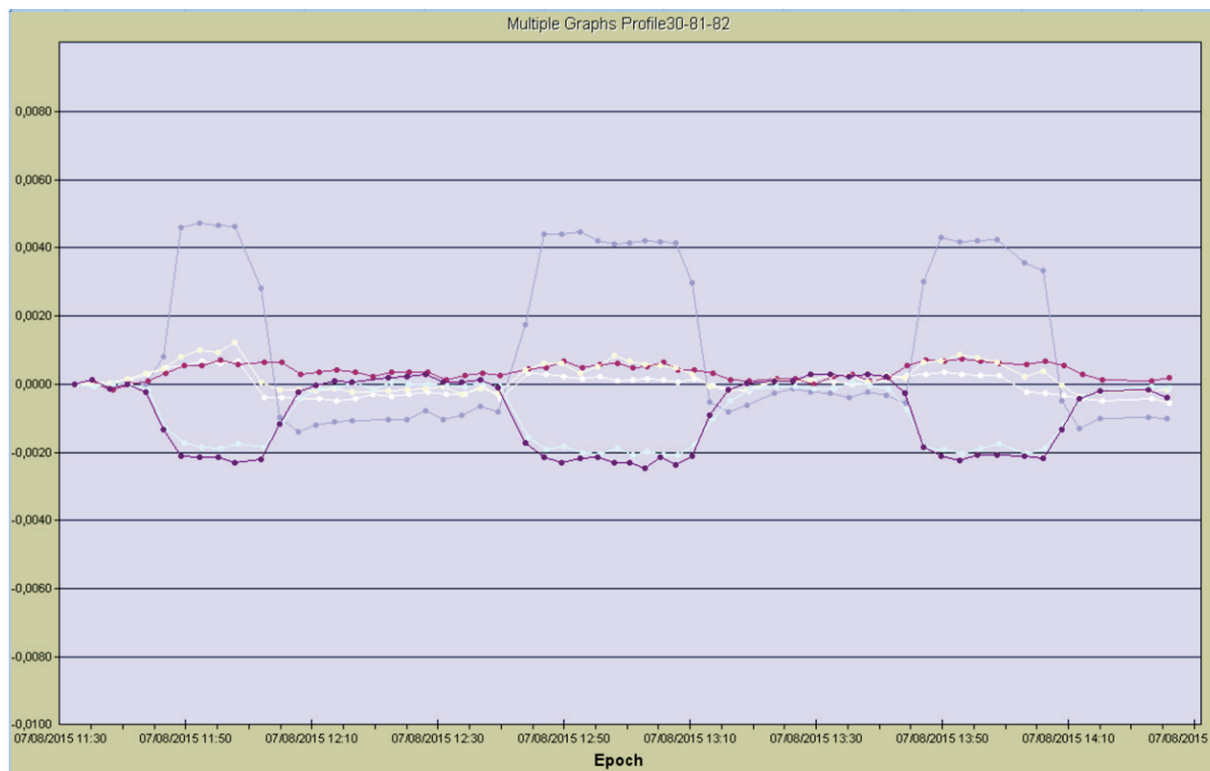


Рис. 6. Данные тахеометра о перемещении конструкций при шлюзовании, расстояние от тахеометра до контрольных точек — 46,7 м:

— 30-81TPS (LongDisp)	— смещение точки 30-81 перпендикулярно оси шлюза;
— 30-82TPS (LongDisp)	— смещение точки 30-82 перпендикулярно оси шлюза;
— 30-81TPS (TransDisp)	— смещение точки 30-81 вдоль оси шлюза;
— 30-82TPS (TransDisp)	— смещение точки 30-82 вдоль оси шлюза;
— 30-81TPS (HeightDisp)	— смещение точки 30-81 по высоте;
— 30-82TPS (HeightDisp)	— смещение точки 30-82 по высоте

Результаты измерений за длительный период (с 8 июля по 3 августа 2015 г.) для контрольной точки 30-82 приведены на рис. 7. Поскольку измерения выполнялись только в рабочее время с 8 ч утра до 17 ч, на графике видны группы измерений по каждому такому отрезку времени.

Выбросы вверх от каждой группы — это зафиксированные в момент шлюзования смещения. На графиках зафиксированы смещения относительно нулевого цикла наблюдений, направленные перпендикулярно оси шлюза (белый цвет) и вдоль оси шлюза (голубой). Из графика рис. 7 видно, что колебания величины смещения точки 30-82 за весь период наблюдений лежат в диапазоне плюс-минус 2 мм, а возвратные деформации при шлюзовании не превышают 5 мм (с учетом того, что все замеры выполнялись днем при средней температуре +35 °C).

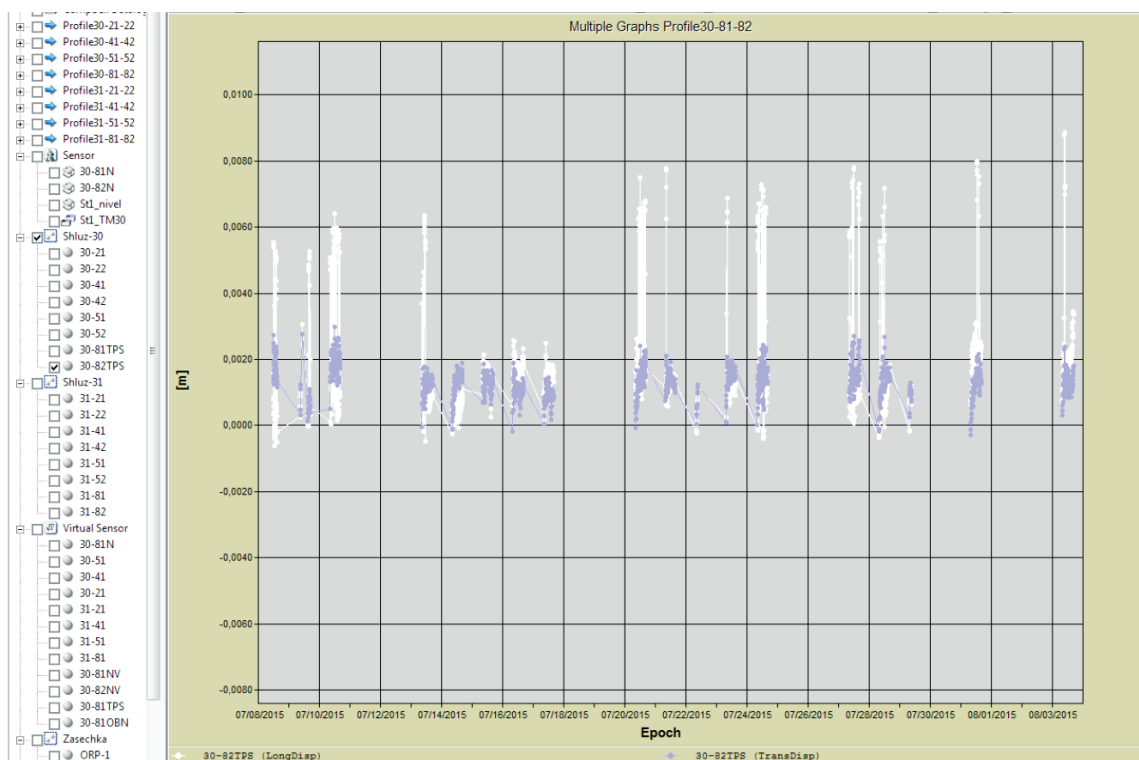


Рис. 7. Результаты измерений за период с 8 июля по 3 августа 2015 г.
для контрольной точки 30-82 шлюза № 30

Измерения трехмерных перемещений контрольных точек зафиксировали также интересное явление: при наполнении шлюза № 30 шлюз № 31 «всплывает» на 2,0 — 2,5 мм, т. е. его контрольные точки перемещаются вверх (рис. 8). В противоположном случае, когда наполняется шлюз № 31, шлюз № 30 не «всплывает».

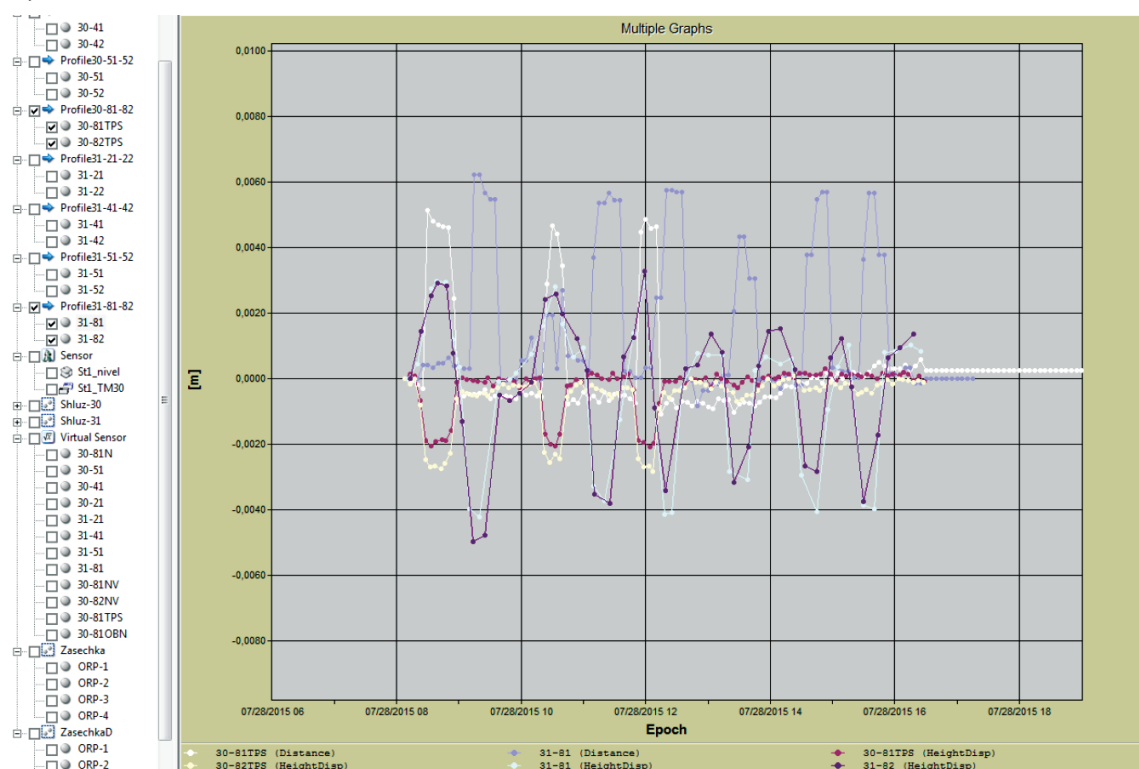


Рис. 8. Зависимость перемещений контрольных точек шлюза № 31 от наполнения шлюза № 30

Измерение расстояний между стенками шлюзов полярным способом по результатам измерений тахеометром

На графике рис. 9 представлены вычисленные расстояния между контрольными точками, удаленными от тахеометра на расстояниях 144, 174 и 235 м. Измерения проводились с 11 ч 30 мин до 14 ч 20 мин 07 августа 2015 г.

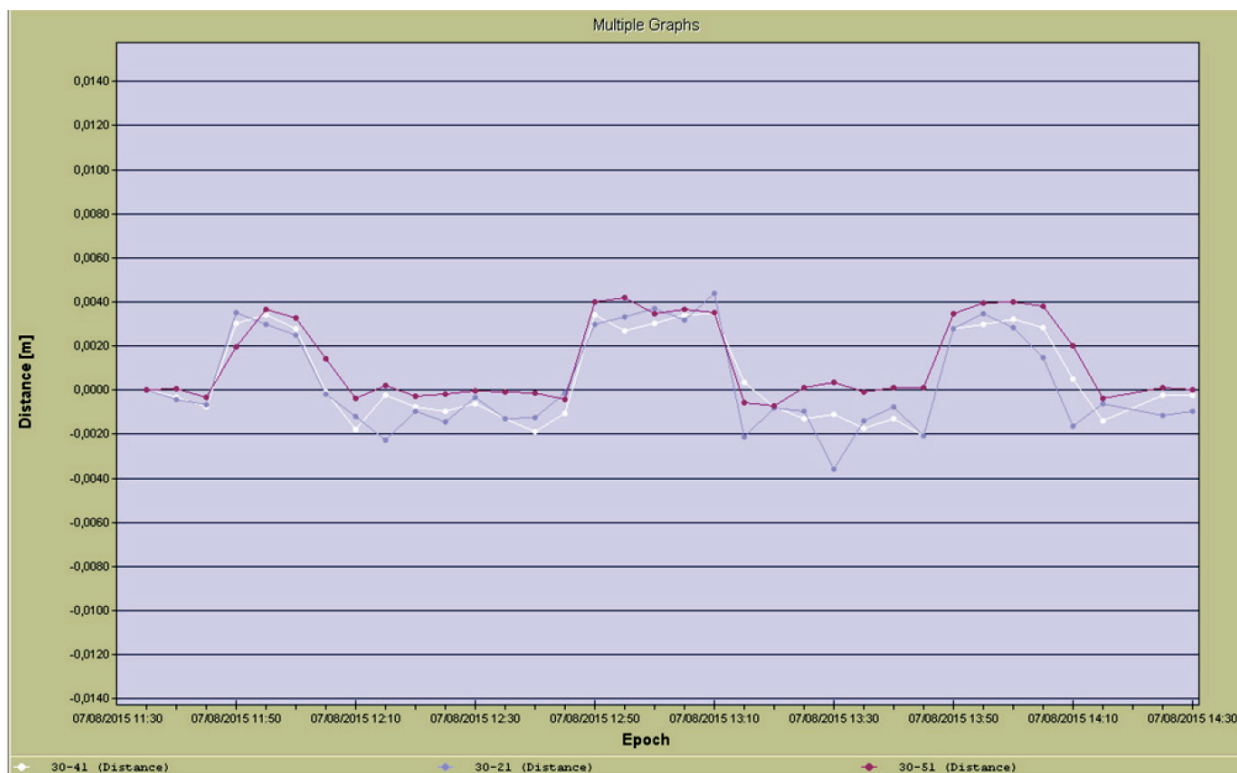


Рис. 9. Изменение расстояний между контрольными точками во время шлюзований

Из графика видно, что качество определения расстояния непосредственно до каждой отдельной контрольной точки в значительной степени зависит от влияния внешних условий и удаленности от прибора. При этом значение вычисленного относительного расстояния между контрольными точками менее подвержено такому влиянию. Поскольку время измерения координат пары точек очень мало и составляет несколько секунд, внешние условия за такой короткий промежуток измениться практически не успевают. Соответственно результаты определения изменения расстояния между парой контрольных точек во время шлюзования наилучшим образом отражают динамику перемещения стенок шлюза. Среднее изменение расстояния на секциях шлюза № 30 составило 4,2 мм.

На рис. 10 приведен пример представления изменения расстояний между стенками шлюза как в относительной мере от начала выделенного периода, так и в абсолютной, в виде собственно значений расстояний.

На рис. 11 приведены результаты измерения расстояний между стенками шлюза № 30 в отсутствие шлюзований. Прибор показывает «шум» с разбросом результатов в пределах 1 мм, при этом «шум» при определении собственно координат контрольных точек существенно выше. Это свидетельствует о том, что расстояние между стенками определяется более надежно, чем собственно координаты контрольных точек, по которым оно вычислено при одинаковых внешних условиях наблюдений.

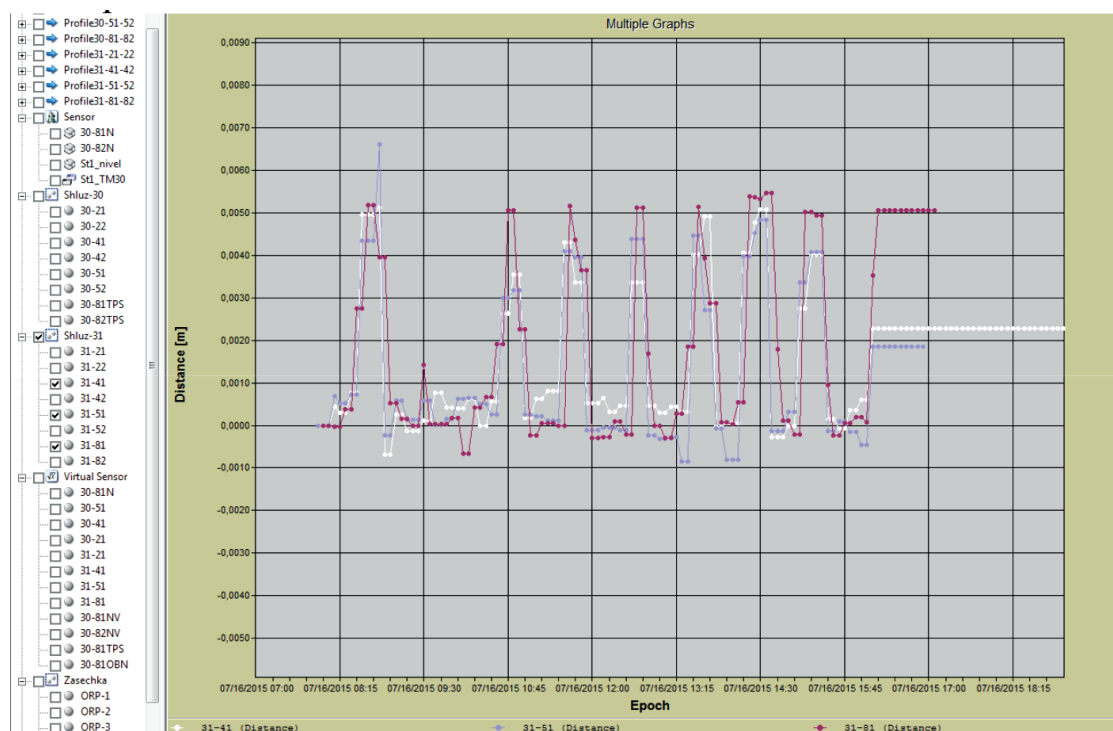


Рис. 10. Шлюз 31, секции 4, 5, 8

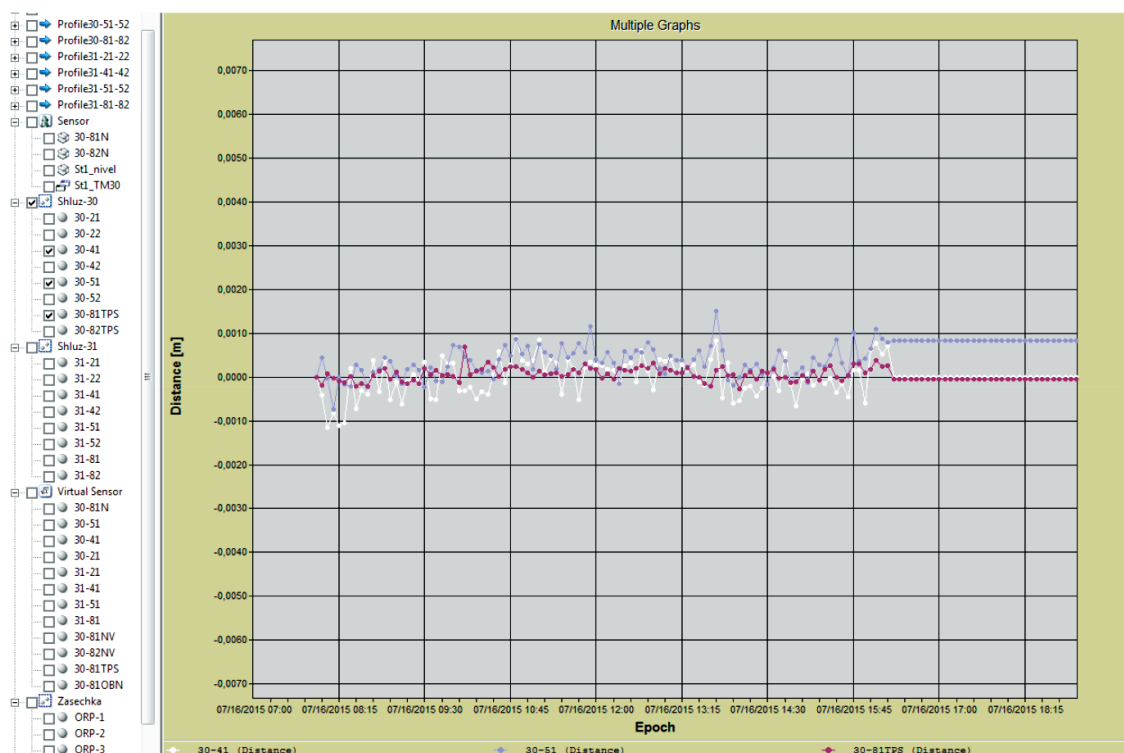


Рис. 11. Расстояние между стенками шлюза 30 в отсутствие шлюзований

Измерение расстояний между стенками шлюзов по показаниям датчиков углов наклона Nivel

Датчики углов наклона Nivel измеряют наклон в двух взаимно перпендикулярных плоскостях: ось Y направлена вдоль оси шлюза, ось X — перпендикулярно. На графиках рис. 12

приведен пример наблюдений за перемещениями точек 30-81 и 30-82 с 15 ч 07.07.2015 г. до 15 ч 07.09.2015 г. Для наглядности перемещения отображены относительно начала выбранного периода. Из графиков видно, что верх противоположных стенок шлюза имеет разные величины смещений. Точка 30-81 смещается на расстояние около 1 мм, точка 30-82 — на расстояние около 3 мм. Среднее суммарное значение относительного перемещения составляет около 4,1 мм. Смещения в линейном выражении получены автоматически по встроенной формуле, которая «работает» как виртуальный датчик. Точно такая же динамика зафиксирована и при помощи тахеометра.

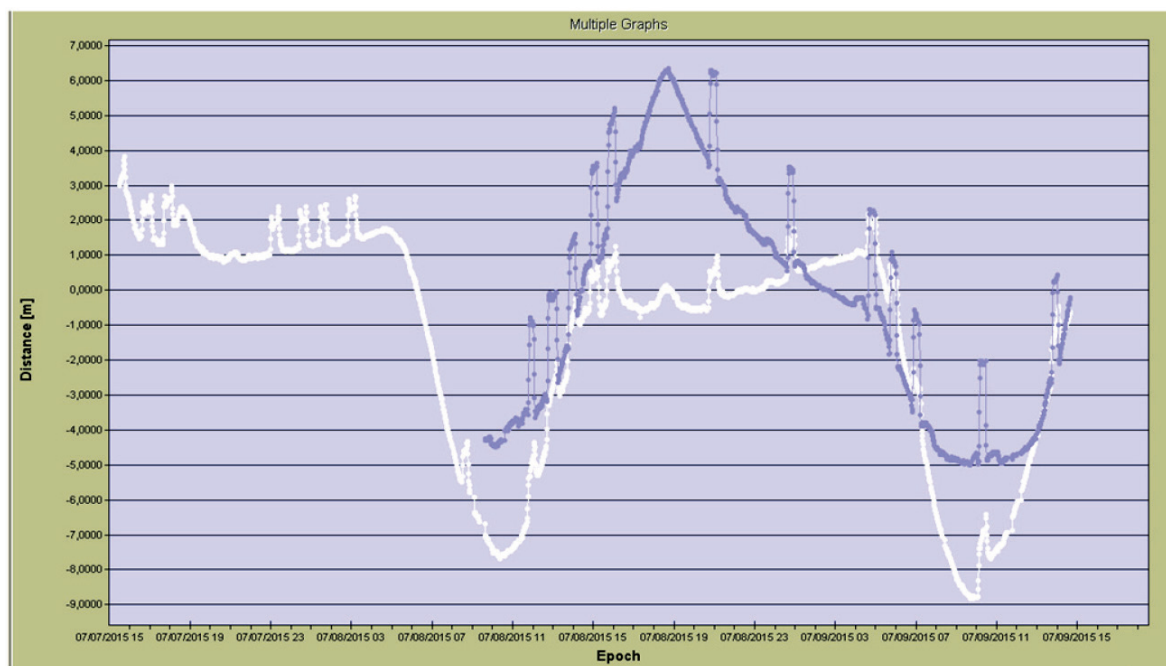


Рис. 12. Перемещение верха стен восьмой секции камеры шлюза № 30:

30-81NV (Distance) — горизонтальные смещения по оси X точки 30-81;
30-82NV (Distance) — горизонтальные смещения по оси X точки 30-82

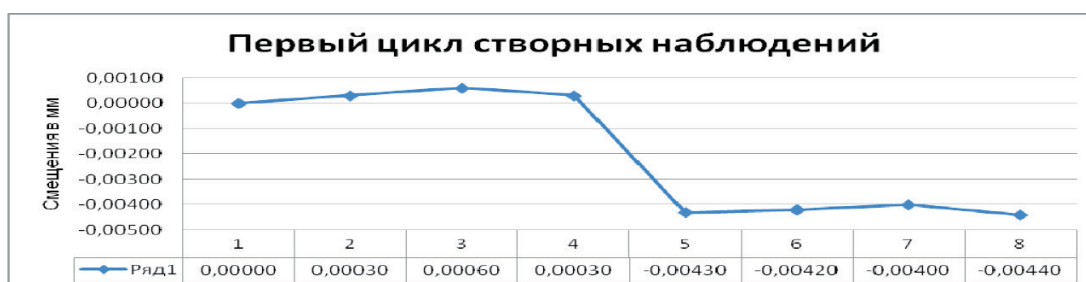
Заметим, что если рассматривать суточные движения контрольных точек, фиксируемые датчиками углов наклона, то максимальный разброс (видно на графике) составит 10 – 11 мм. Это не означает, что точки перемещаются в таком диапазоне в действительности. Причиной таких искажений служит неравномерный нагрев как измерительного оборудования, так и стен камеры шлюза. Верхняя часть стены нагревается сильнее и деформируется больше. Соответственно результаты, полученные по формуле, где предполагается, что стена высотой 20 м наклоняется целиком без изгибов, искажены.

Для более точных выводов необходимо проводить дополнительные исследования: как минимум защитить места крепления датчиков наклона от прямого воздействия солнечных лучей и сравнить результаты, полученные с помощью датчиков углов наклона, с результатами, полученными от электронных тахеометров. При этом величины горизонтальных перемещений стенок шлюзов в моменты шлюзования датчиками наклона фиксируются корректно, и они полностью совпадают с величинами, полученными с использованием тахеометра.

Измерение расстояний между стенками шлюзов по результатам линейных измерений тахеометром, установленным в створе измеряемой линии

Наблюдения проводились 07 августа 2015 г. с 17 ч 40 мин до 18 ч 50 мин на восьмой секции шлюза № 30 (рис. 13).

а)



б)



Рис. 13. Линейные измерения в створе восьмой секции шлюза № 30:
а — первый цикл измерений; б — второй цикл измерений

Первый цикл начался в момент полного наполнения шлюзовой камеры и включил в себя наполнение и затем сброс воды. Второй цикл содержал наполнение и опорожнение камеры шлюза. Среднее изменение горизонтального проложения между призмами на противоположных стенках шлюза в момент шлюзования составило 4,3 мм.

Заключение

Выполненная работа подтвердила, что система мониторинга горизонтальных и вертикальных перемещений стен камер шлюзов, основанная на использовании высокоточных тахеометров-автоматов, позволяет фиксировать относительные пространственные перемещения контрольных точек с точностью 1 мм и меньше. Для обеспечения точности измерений в течение длительного периода наблюдений необходимо выполнять периодическое переопределение координат тахеометра, что подразумевает организацию стабильной опорной геодезической сети. В идеале сам пилон с тахеометром должен быть стабилен. При этом подтверждено, что для обеспечения наилучших результатов необходимо для переопределения координат тахеометра использовать метод линейной засечки.

В процессе проведения эксперимента было выявлено влияние смещений отдельных зданий и конструктивных элементов шлюзов друг на друга, что повлияло на результаты, поскольку оказалось, что выбранные опорные точки закреплены в местах, имеющих циклическое перемещение в диапазоне порядка 2 – 3 мм. Кроме того, наполнение или опорожнение одного шлюза сказывалось на перемещении элементов соседнего шлюза, что существенно затрудняло оценку результатов и наглядность представления результатов в виде графиков.

Изменения трехмерного положения контрольных точек в моменты шлюзования при помощи высокоточного электронного тахеометра определяются достаточно надежно. Опытным путем для конкретных условий проведения эксперимента и расположения оборудования установлено, что наилучшие результаты получены при удалении контрольных точек от тахеометра не более 170 – 180 м. Максимальное удаление от тахеометра контрольных точек составило 260 м, оценка трехмерных смещений в этом случае оказалась затруднена из-за искажений результатов измерений вертикальной и горизонтальной рефракцией, но относительное расстоя-

ние между парой контрольных точек определялось достаточно хорошо и совпадало с результатами, полученными при ручных измерениях. Система надежно фиксировала горизонтальные перемещения в моменты шлюзования в пределах 4 – 5 мм, высотные перемещения составили 2 мм. Были также зафиксированы неравномерные горизонтальные смещения стенок шлюзов внешних (примыкающих к грунту), их смещения в среднем составили 1,5 – 2,5 мм, и внутренних (соединенных между собой лотком для сброса воды), их смещения составляли в среднем 4 – 5,5 мм.

Подтвердилась возможность фиксировать изменение горизонтальных смещений стенок секций шлюзов с использованием высокоточных датчиков наклона Nivel. Направление кренов в продольном и поперечном направлении в моменты шлюзования, а также вычисленные значения горизонтальных поперечных смещений полностью совпадают с данными тахеометров. Это дает основание утверждать, что стенки камеры шлюза при наполнении и опорожнении наклоняются равномерно, без изломов.

При суточных наблюдениях влияние температурного фактора становится очень существенным. Корректную оценку кренов и перемещений в этом случае провести без дополнительных исследований оказалось невозможно. Например, необходимо учитывать характер деформаций от солнечного нагрева бетонной стенки (какая часть стабильна, а какая деформируется), а также периоды затенения от местных предметов и другие подобные факторы. При долгосрочных наблюдениях следует устанавливать датчики в местах, защищенных от прямых солнечных лучей.

Метод измерения расстояний между стенками шлюзов, когда тахеометр устанавливается в створе измеряемой линии, хоть и не дает общего представления о деформациях всего объекта в целом, но вполне может заменить измерения с применением инварных проволок.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Инструкция по наблюдениям и исследованиям на судоходных гидротехнических сооружениях. — М.: Транспорт, 1981. — 96 с.
2. Методические рекомендации по контролю технического состояния и оценке уровня безопасности судоходных гидротехнических сооружений / Утв. Федеральным агентством морского и речного транспорта от 15 апреля 2011 г. — М.: Росморречфлот, 2011. — 136 с.
3. Королева А. А. Анализ состояния судоходных сооружений Волгоградского гидроузла на основе данных наблюдений и измерений / А. А. Королева, С. В. Лапин, К. П. Моргунов, В. И. Щербина // Гидротехника. XXI век. — 2016. — № 3 (27). — С. 60–68.
4. Моргунов К. П. Анализ напряженно-деформированного состояния элементов камер шлюзов Волгоградского гидроузла при различных условиях эксплуатации / К. П. Моргунов, М. В. Красникова // Вестник Государственного университета морского и речного флота имени адмирала С. О. Макарова. — 2016. — № 4 (38). — С. 74–85. DOI: 10.21821/2309-5180-2016-8-4-74-85.
5. ГОСТ Р 51774-2001. Тахеометры электронные. Общие технические условия. — М.: ИПК Изд-во стандартов, 2001. — 10 с.
6. Электронный тахеометр [Электронный ресурс]. — Режим доступа: <http://strport.ru/instrumenty/elektronnyj-takheometr> (дата обращения: 01.12.2016).
7. Электронные геодезические тахеометры [Электронный ресурс]. — Режим доступа: <http://stroy-masterden.ru/elektronnyj-taxeometr-delaem-pravilnyj-vyibor.html> (дата обращения: 01.12.2016).
8. Характеристики тахеометров [Электронный ресурс]. — Режим доступа: <http://bcoreanda.com/ShowArticle.aspx?ID=2921> (дата обращения: 01.12.2016).
9. Никонов А. В. Опыт применения тригонометрического нивелирования с использованием электронных тахеометров для наблюдения за осадками сооружений / А. В. Никонов // Интерэкспо Гео-Сибирь. — 2013. — Т. 1. — № 1. — С. 78–86.

10. Скрипников В. А. Создание высокоточных малых линейно-угловых сетей с применением электронных тахеометров / В. А. Скрипников, М. А. Скрипникова // Интерэкспо Гео-Сибирь. — 2014. — Т. 1. — № 1. — С. 84–87.
11. Мельников Е. В. Разработка системы контроля состояния гидротехнических сооружений судоходного шлюза / Е. В. Мельников, В. Н. Морозов, И. Л. Краснощекhov // Современные технологии автоматизации. — 2012. — № 4. — С. 80–84.
12. Морозов В. Н. Комплексная система автоматизации судопропуска Шекснинского гидроузла / В. Н. Морозов, И. Л. Краснощекhov, Л. А. Павлович [и др.] // Известия Самарского научного центра Российской академии наук. — 2015. — Т. 17. — № 2–4. — С. 843–850.
13. Описание и характеристики электронного тахеометра Leica TM30 [Электронный ресурс]. — Режим доступа: http://www.gfk-leica.ru/files/catfiles/tps/TM30_brochure_ru.pdf (дата обращения: 01.12.2016).
14. Высокоточный датчик наклона для структурного мониторинга Leica Nivel 210/Nivel 220 [Электронный ресурс]. — Режим доступа: http://www.gfk-leica.ru/files/catfiles/sensors/Nivel210-220_brochure_ru.pdf (дата обращения: 01.12.2016).

REFERENCES

1. *Instruktsiya po nablyudeniym i issledovaniyam na sudokhodnykh gidrotekhnicheskikh so-oru-zheniyakh*. Transport, 1981.
2. *Metodicheskie rekomendatsii po kontrolyu tekhnicheskogo sostoyaniya i otsenke urovnya bezopasnosti sudokhodnykh gidrotekhnicheskikh sooruzhenii. Utverzhdeny FAMiRT 15 aprelya 2011 g.* М.: ROSMORRECH-FLOT, 2011.
3. Koroleva, A. A., S. V. Lapin, K. P. Morgunov, and V. I. Shcherbina. “Analiz sostoyaniya sudokhodnykh sooruzhenii Volgogradskogo gidrouzla na osnove dannykh nablyudenii i izmerenii.” *Gidrotekhnika. XXI vek* 3(27) (2016): 60–68.
4. Morgunov, K. P., and M. V. Krasnikova. “Analysis of stress-strain state elements lock chamber Volgograd hydroelectric complex under different operating conditions.” *Vestnik Gosudarstvennogo universiteta morskogo i rechnogo flota imeni admirala S. O. Makarova* 4(38) (2016): 74–85. DOI: 10.21821/2309-5180-2016-8-4-74-85.
5. Russian Federation. State Standard GOST R 51774-2001. Electronic tacheometers. General specification. М.: ИПК Издатel'stvo standartov, 2001.
6. Elektronnyi takheometr. Web. 1 Dec. 2016 <<http://strport.ru/instrumenty/electronnyi-takheometr>>.
7. Elektronnye geodezicheskie takheometry. Web. 1 Dec. 2016 <<http://stroy-masterden.ru/electronnyj-taxeometr-delaem-pravilnyj-vyibor.html>>.
8. Kharakteristiki takheometrov. Web. 1 Dec. 2016 <<http://bcoreanda.com/ShowArticle.aspx?ID=2921>>.
9. Nikonov, Anton V. “Experience of application of trigonometric levelling with use electronic total stations for measuring deformations of constructions.” *Interexpo Geo-Siberia* 1.1 (2013): 78–86.
10. Skripnikov, Victor A., and Margarita A. Skripnikova. “Establishment of high-accuracy minor linear-angular networks using total station.” *Interexpo Geo-Siberia* 1.1 (2014): 84–87.
11. Mel'nikov, E. V., V. N. Morozov, and I. L. Krasnoshchekov. “Razrabotka sistemy kontrolya sostoyaniya gidrotekhnicheskikh sooruzhenii sudokhodnogo shlyuza.” *Sovremennye tekhnologii avtomatizatsii* 4 (2012): 80–84.
12. Morozov, Viktor, Igor Krasnoshchekov, Lev Pavlovich, Igor Pavlovich, Dmitriy Krasinskiy, Ivan Danilushkin, Evgeniy Melnikov, and Sergey Kolpashchikov. “Crafts passing automation complex system at sheksninskiy water-engineering system.” *Proceedings of the Samara Scientific Center of the Russian Academy of Sciences* 17.2–4 (2015): 843–850.
13. Opisaniye i kharakteristiki jelektronnogo taheometra Leica TM30. Web. 1 Dec. 2016 <http://www.gfk-leica.ru/files/catfiles/tps/TM30_brochure_ru.pdf>.
14. Vysokotochnyi datchik naklona dlya strukturnogo monitoringa Leica Nivel 210/Nivel 220. Web. 1 Dec. 2016 <http://www.gfk-leica.ru/files/catfiles/sensors/Nivel210-220_brochure_ru.pdf>.

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

Козлов Роман Валерьевич —

начальник отделения ИДС

АО «НИИЭС»

125362, Российская Федерация, Москва, а/я 393,

Строительный проезд 7А

e-mail: kozlovrv@niies.ru

Ли Владимир — ведущий эксперт

ООО «Фирма Г.Ф.К.»

109004, Российская Федерация, Москва,

Шелапутинский пер. 6

e-mail: kaf_gsk@gumrf.ru

Моргунов Константин Петрович —

кандидат технических наук, доцент

ФГБОУ ВО «ГУМРФ имени

адмирала С. О. Макарова»

198035, Российская Федерация, Санкт-Петербург,

ул. Двинская 5/7

e-mail: morgunovkp@gumrf.ru

INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Kozlov, Roman V. —

Director of IDS Department

JSC «NIIES»

7A Stroitel'nyi proezd, Moscow, a/ya 393, 125362,

Russian Federation

e-mail: kozlovrv@niies.ru

Li, Vladimir — leading expert

LLC "Firma G.F.K."

6 Shelaputinsky lane, Moscow, 109004, Russian

Federation

e-mail: kaf_gsk@gumrf.ru

Morgunov, Konstantin P. —

PhD, associate professor

Admiral Makarov State University

of Maritime and Inland Shipping

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

Russian Federation

e-mail: morgunovkp@gumrf.ru

Статья поступила в редакцию 14 декабря 2016 г.

Received: December 14, 2016.

СУДОСТРОЕНИЕ И СУДОРЕМОНТ

DOI: 10.21821/2309-5180-2017-9-1-111-120

TECHNIQUE OF ASSESSMENT OF THE SAFE NAVIGATION IN THE «CONSTRAINED» WATER AREA

M. P. Lebedeva, S. D. Aizinov, A. O. Lebedev

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

The concise description of new method of ship safe passage in restricted waters of harbor was described. This method was introduced by employees of the laboratory of Seaworthiness and Makarov Training center specially to solve the problem of ship's safe (accident-free) operation in Saint-Petersburg seaport. The method can be used with ship of any displacement maneuvering in real fairways.

The method consists of two parts – calculated part – used to analyse all possible variants of the problem, and the ship motion simulation to analyse the ship motion ability in real time taking into account navigation restrictions.

The calculated part based on simplified mathematical model. It allows to consider greater number of variants of ships and ship's steering scenarios. The simplified mathematical model differs from the full one only by the ship's environment absence. Method allows to change mathematical description of forces and moments acting on the ship, and easily adapt it to particular situation. It enables to obtain more accurate result.

The result of analysis allows to exclude negative variants and thus reduce number of ship's steering scenarios to test. This reduce the total amount of time required for the work.

The second part of the method includes the ship motion investigation using the navigation simulator. One or several models are tested in real time. The experienced pilots con the models to examine the problem, taking into account all peculiarity of navigation situation.

Keywords: ship maneuverings, restricted waters, shallows, aerodynamic properties, mathematical model, ship motion simulation.

For citation:

Lebedeva, Marina P., Sergei D. Aizinov, and Aleksei O. Lebedev. "Technique of assessment of the safe navigation in the «constrained» water area." *Vestnik Gosudarstvennogo universiteta morskogo i rechnogo flota imeni admirala S.O. Makarova* 9.1 (2017): 111–120. DOI: 10.21821/2309-5180-2017-9-1-111-120.

УДК 629.12

МЕТОДИКА ОЦЕНКИ БЕЗОПАСНОГО ДВИЖЕНИЯ СУДОВ В СТЕСНЕННОЙ АКВАТОРИИ

М. П. Лебедева, С. Д. Айзинов, А. О. Лебедев

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

В работе приводится краткое описание новой методики оценки безопасного маневрирования судна на закрытой акватории порта. Методика разработана совместно лабораторией мореходных качеств судов и Морского УТЦ ГУМРФ им. адмирала С. О. Макарова для решения задач о возможности прохода судов к причалам Санкт-Петербургского морского порта. Методика применима для решения указанной задачи применительно к любому водоизмещающему судну, маневрирующему на любой акватории. Метод включает две части: расчетную часть, которая позволяет выполнить анализ всех возможных сценариев управления судном, и моделирование движения на морских тренажерах, где рассматриваются наиболее опасные для этой акватории случаи. В основу расчетной части положена упрощенная математическая модель, которая позволяет существенно расширить область исследуемых вариантов решения задачи. Однако упрощение модели означает только отказ от подробного моделирования внешней обстановки и формирования пространственного изображения судна. Первая часть методики позволяет изменять

алгоритм описания сил и моментов, действующих на судно, легко адаптировать модель к конкретному случаю и, как следствие, получить более точный результат. По результатам анализа различных «сценариев» движения судна можно отбросить те из них, которые очевидно не позволяют выполнить заданный маневр, сокращая, таким образом, общее время выполнения работы. Вторая часть включает исследование возможности движения на морском тренажере одной или нескольких моделей судов. Объектами исследования являются наиболее опасные из возможных «сценариев» движения, выявленные на первом этапе. Испытания выполняются в режиме реального времени опытными судоводителями с целью оценки достаточности судовой обстановки для выполнения поставленной перед судном задачи.

Ключевые слова: маневренные качества, стесненная акватория, мелководье, аэродинамические характеристики, математическая модель, тренажер.

Для цитирования:

Лебедева М. П. Методика оценки безопасного движения судов в стесненной акватории / М. П. Лебедева, С. Д. Айзинов, А. О. Лебедев // Вестник Государственного университета морского и речного флота имени адмирала С. О. Макарова. — 2017. — Т. 9. — № 1. — С. 111–120. DOI: 10.21821/2309-5180-2017-9-1-111-120.

Введение

При строительстве новых причалов или переоборудовании старых, при изменении размеров судов или появлении судов нового назначения возникает проблема обеспечения безопасного маневрирования как самого судна, так и сохранности портовых сооружений [1] – [7]. Особую важность этот вопрос имеет для крупнотоннажных судов.

Сложность поставленной задачи состоит в том, что один и тот же фарватер является трудно проходимым для одних судов и легко проходимым для других. Это связано с размерениями судна, относительной площадью парусности, характеристиками управляемости, типом движительно-рулевого комплекса и др. Оценить степень опасности маневрирования «на глаз» не всегда возможно. В предлагаемой статье приводится краткое описание методики количественной оценки возможности безопасного маневрирования.

Методика была разработана сотрудниками лаборатории мореходных качеств судов и Тренажерного центра ГУМРФ и применима для водоизмещающих судов любого типа, маневрирующих на акватории ограниченной глубины в условиях ветра и течения. В настоящее время методика позволяет реализовать следующие процедуры: выполнять оценку возможности безопасного подхода конкретного судна к заданному причалу; рассчитывать предельную длину судна, способного выполнить все необходимые маневры; определять (в случае необходимости) радиусы закругления подходного канала; оценивать достаточность навигационной обстановки; рассчитывать степень риска при маневрировании и др.

1. Согласование параметров судна и акватории

Целью разработки методики является комплексное рассмотрение вопроса о возможности безаварийного маневрирования судна при различных «сценариях» управления им. Перед началом работ выполняется согласование параметров возможного движения рассматриваемого судна [8], [9] и геометрических особенностей акватории, в пределах которой судно должно маневрировать. В качестве критерия соответствия принимается относительная кривизна траектории судна и относительная кривизна линии его перемещения, определяемая принятым «сценарием» управления судном.

Разрабатываемый «сценарий» движения судна предполагает задание начальной точки маневра, относительной кривизны траектории и времени разворота, обусловленное геометрическими характеристиками участка фарватера, изображенного на карте рассматриваемого района. В качестве примера на рис. 1 приведены результаты предварительной обработки карты района Новой Канонерской гавани.

Обработка карты выполняется в два этапа. На первом этапе на основе анализа глубин и с учетом осадки судна определяются и наносятся на карту границы фарватера (рис. 1, синий пункт). При этом должно учитываться, что глубина водоема не может быть менее 1,1 осадки

судна. На этой стадии выполнения работы можно сделать предварительный вывод о возможности движения судна в заданной акватории: *если осадка судна превышает значения существующих глубин, то заход судна на акваторию порта невозможен и рассмотрение задачи прекращается на первом этапе.*

На втором этапе выполняется разработка «сценариев» движения. «Сценарии» управления судном выполняются с участием опытных судоводителей. Из нескольких предложенных «сценариев» для дальнейших расчетов выбирается наиболее опасный.

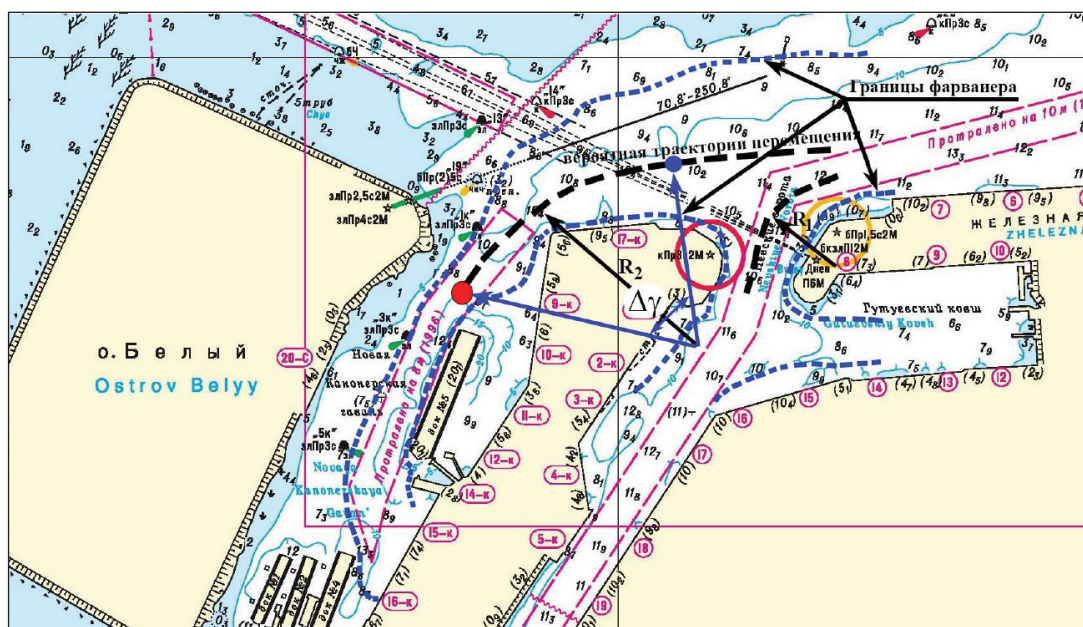


Рис. 1. Подготовка карты района

В качестве примера на рис. 1 черным пунктиром показана траектория перемещения судна при заходе в Новую канонерскую гавань. Принятый для расчета «сценарий» был следующим: судно, движущееся Морским каналом, в районе Невских ворот выполняет разворот вправо, останавливается, а затем буксируется задним ходом в Новую Канонерскую гавань. Предполагаемая траектория движения судна разбивается на отдельные элементы, состоящие из прямолинейных участков и участков постоянной кривизны. Затем рассчитывается относительный радиус кривизны $\bar{R}_{tk}$ и кривизна каждого участка $\bar{\omega}_{tk}$ по формулам:

$$\bar{R}_{tk} = \frac{R_{tk}}{L}; \quad \bar{\omega}_{tk} = \frac{1}{R_{tk}}, \quad (1)$$

где R_{tk} — радиус кривизны выделенного участка траектории; L — длина рассматриваемого судна; $\bar{\omega}_{tk}$ — относительная кривизна выделенного участка траектории.

Далее определяется угол между радиус-векторами точек начала и окончания маневра $\Delta\gamma$ и оценивается длина пути, который должно пройти судно при выполнении маневра, т. е. $S = R_{tk} \cdot \Delta\gamma$, и определяется контрольное время выполнения маневра:

$$t_k = \frac{S}{V}, \quad (2)$$

где V — скорость движения судна перед началом разворота.

На второй стадии выполнения работы можно сделать следующий вывод о возможности движения судна в заданной акватории: *если относительная кривизна траектории при входе судна в циркуляцию с максимальным углом перекладки руля превышает относительную кривизну выделенного участка траектории, то движение в соответствии с заданным «сценарием» возможно.*

Для выполнения работ по согласованию данных необходимо иметь карту района и данные о судне, включающие главные размерения, тип движительно-рулевого комплекса, буклет маневренных характеристик.

2. Анализ возможности безопасного маневрирования

Первое приближение

При рассмотрении задачи в первом приближении должны быть получены ответы на следующие вопросы:

- какова скорость хода судна, по достижении которой возможен удар корпуса о грунт;
- способно ли судно самостоятельно выполнить разворот по траектории заданной кривизны в условиях тихой погоды;
- способно ли судно самостоятельно выполнить разворот по траектории заданной кривизны в условиях ветра;
- какова минимально допустимая скорость хода судна при ветре;
- какова суммарная тяга буксиров, при которой разворот судна обеспечен как в условиях безветрия, так и при ветре.

Рассмотрим последовательность решения указанных вопросов.

Определение максимально допустимой скорости хода судна. Предельно допустимая скорость хода судна может быть рассчитана по любой из существующих методик, например, по методике Данда и Фергюссона [10], [11]. Согласно результатам исследований, при движении на мелководье с увеличением скорости хода изменяется посадка судна, что может завершиться ударом корпуса о грунт. Задача решается применительно к наиболее опасному случаю прямолинейного движения судна.

Величина относительной просадки судна ($\Delta T/L$) может быть рассчитана по формуле [10]:

$$\Delta T/L = (0,027 - 0,152F_{nh} + 1,894F_{nh}^2), \quad (3)$$

где $F_{nh} = \frac{V}{\sqrt{gh}}$ — число Фруда по глубине.

Расчет по формуле (3) позволяет оценить запас воды под килем в условиях крайнего мелководья при различных скоростях хода. Уменьшение запаса воды под килем, наблюдаемое с ростом скорости хода, приведено на рис. 2, откуда следует, что с ростом скорости хода запас воды под килем уменьшается, и при скорости хода, большей 10 уз, возможен удар о грунт.



Рис. 2. Изменение запаса воды под килем при увеличении скорости хода: $h/T = 1,16$

Если скорость хода рассматриваемого судна не превышает 10 уз, то проход судна по заданному фарватеру будет безударным.

Оценка возможности судна самостоятельно выполнить разворот по траектории заданной кривизны. Способность судна самостоятельно выполнить разворот по траектории заданной кривизны оценивается расчетом с привлечением специально разработанной математической модели рассматриваемого судна.

Математическая модель представляет собой систему трех нелинейных дифференциальных уравнений первого порядка. Система уравнений имеет вид [8], [9]:

$$\frac{dV_x}{dt} \cdot (m + \lambda_{11}) = X_{bh}(\beta, \bar{\omega}) + F_{\text{цб}} \cdot \sin \beta + T_p(J_p) + X_a(\gamma_k); \quad (4)$$

$$\frac{dV_y}{dt} \cdot (m + \lambda_{22}) = Y_{bh}(\beta, \bar{\omega}) + F_{\text{цб}} \cdot \cos \beta + Y_R(\beta, \bar{\omega}, \delta) + Y_a(\gamma_k); \quad (5)$$

$$\frac{d\omega_z}{dt} \cdot (I_z + \lambda_{66}) = M_{bh}(\beta, \bar{\omega}) + Y_R(\beta, \bar{\omega}, \delta) \cdot l_R + M_a(\gamma_k), \quad (6)$$

где V_x, V_y, ω_z — продольная и боковая скорость хода; m, J_z — соответственно масса судна и момент инерции относительно оси z ; X_{bh}, Y_{bh}, M_{bh} — соответственно продольная и боковая составляющие гидродинамической силы и гидродинамический момент на корпусе судна; X_a, Y_a, M_a — соответственно продольная и боковая составляющие аэродинамической силы и аэродинамический момент на надводной части корпуса судна; T_p — тяга гребного винта; Y_R — боковая сила на руле; l_R — плечо руля.

Система координат и силы, действующие на корпус судна при вращении, показаны на рис. 3. Результатом решения этой системы уравнений будут изменения во времени значений относительной кривизны движения судна: $\bar{\omega} = L/R$, где R — мгновенный радиус кривизны траектории.

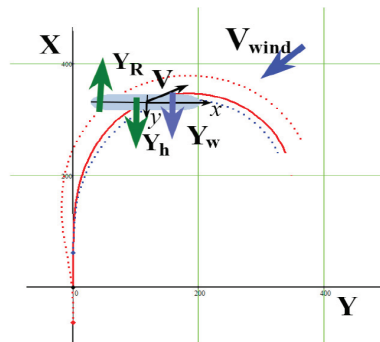


Рис. 3. Схема действия сил на судне

Вывод о способности судна выполнить маневр делается на основе сопоставления относительной кривизны траектории, которая может быть обеспечена рулевым устройством судна, и относительной кривизны траектории, нанесенной на карте района.

Изменения относительной кривизны траектории $\bar{\omega}$, обеспечиваемой судном, полученные с помощью расчета, представляются в виде зависимости от времени. Параметром служит угол перекадки руля (рис. 4). Расчет может выполняться как для условий безветрия, так и при ветре. В качестве примера на рисунке приведены значения относительной кривизны одновинтового сухогрузного судна.

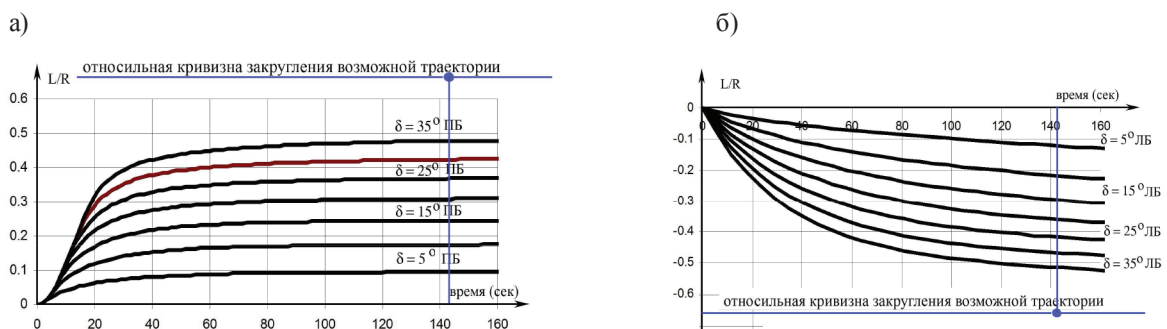


Рис. 4. Вид кривых изменения во времени относительной кривизны траектории при различных углах перекадки руля на одновинтовом судне:

а — правая циркуляция; б — левая циркуляция

На тех же графиках приведены значения относительной кривизны траектории для выбранного «сценария» движения $\bar{\omega}_{ik}$. Время выполнения маневра $t_k = 145$ с.

Отсутствие общих точек на кривых $\bar{\omega}(\delta)$ и $\bar{\omega}_{ik}$ указывает на то, что судно самостоятельно выполнить маневр не сможет.

Таким образом, рассматриваемое судно в условиях безветрия не сможет развернуться самостоятельно при выбранном «сценарии» движения.

Возможность самостоятельно выполнить разворот по траектории заданной кривизны при ветре рассчитывается с применением той же математической модели. Расчет должен выполняться при значениях начальной скорости хода, соответствующей минимальным устойчивым оборотам главного двигателя. Направление ветра задается в системе координат, связанной с Землей, и для каждого варианта расчета сохраняется неизменным. Расчет повторяется для двенадцати направлений ветра в пределах от 0° (направление на север) до 360° для каждого из пятнадцати вариантов угла перекадки руля. Для расчетов использовались аэродинамические характеристики, приведенные в работе [12]. На рис. 5 приведены значения относительной кривизны траектории судна для максимальных углов перекадки руля при различных направлениях скорости ветра.

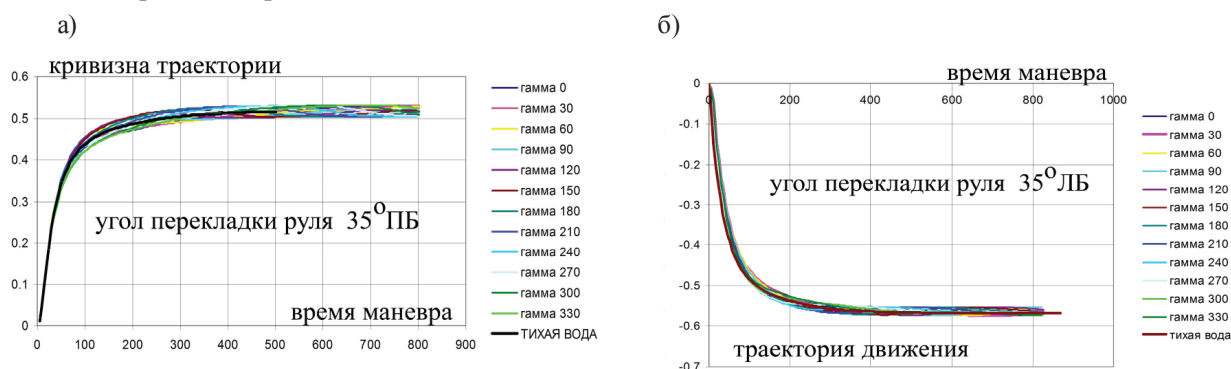


Рис. 5. Вид кривых изменения во времени относительной кривизны траектории при различном направлении ветра:

а — правая циркуляция; б — левая циркуляция

Из графиков, приведенных на рисунке, следует, что влияние ветра на параметры движения рассматриваемого судна невелико, что объясняется сравнительно небольшой площадью парусности. Максимальные значения относительной кривизны траектории при правой циркуляции составляет $\bar{\omega}(\delta) < 0,55$, а при левой циркуляции $\bar{\omega}(\delta) < 0,58$, что меньше требуемого значения относительной кривизны вероятной траектории, которая составляет $\bar{\omega}_i = 0,65$.

Таким образом, рассматриваемое судно, движущееся самым малым ходом в условиях ветра силой 6 баллов, не сможет развернуться самостоятельно при выбранном «сценарии» движения.

Оценка возможности разворота судна с помощью буксиров. Для приближенной оценки количества буксиров, необходимых для проводки судна, рассчитывалась величина дополнительной силы, приложенной в кормовой оконечности, при которой обеспечено движение по траектории заданной кривизны (рис. 6).

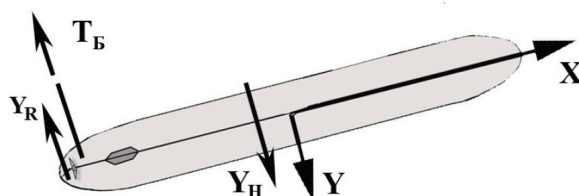


Рис. 6. К определению необходимой тяги буксира

Для расчета использовалась система уравнений движения (4) – (6), в которой в качестве дополнительного параметра добавлялась тяга двух буксиров. Тяга одного из них направлена вдоль диаметральной плоскости и по нормали к ней. Система уравнений имеет вид:

$$\frac{dV_x}{dt} \cdot (m + \lambda_{11}) = X_{bh}(\beta, \bar{\omega}) + F_{цб} \cdot \sin \beta + T_p(J_p) + X_a(\gamma_k) + T_{xб}; \quad (7)$$

$$\frac{dV_y}{dt} \cdot (m + \lambda_{22}) = Y_{bh}(\beta, \bar{\omega}) + F_{цб} \cdot \cos \beta + Y_R(\beta, \bar{\omega}, \delta) + Y_a(\gamma_k) + T_{yб}; \quad (8)$$

$$\frac{d\omega_z}{dt} \cdot (I_z + \lambda_{66}) = M_{bh}(\beta, \bar{\omega}) + Y_R(\beta, \bar{\omega}, \delta) \cdot l_R + M_a(\gamma_k) + T_{yб} \cdot l_b, \quad (9)$$

где $T_{xб}$, $T_{yб}$ — дополнительная тяга буксира.

Относительная кривизна траектории полагается равной $\bar{\omega}_{ik}$. Решением системы уравнений (7) – (9) является потребная тяга буксиров. Потребная тяга буксиров может быть определена как в условиях безветрия, так и при ветре.

В качестве примера на рис. 7 приведена сила на гаке буксира, создающего тягу, нормальную к диаметральной плоскости, в зависимости от скорости ветра.

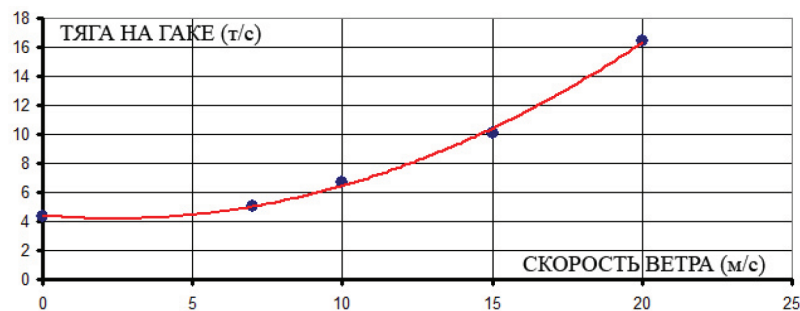


Рис. 7. Результаты расчета потребной тяги буксира

Таким образом, судно может развернуться на заданной акватории и при максимально возможном ветре с помощью двух буксиров: буксира, создающего продольную составляющую тяги, и буксира, создающего тягу, нормальную к диаметральной плоскости. Значения тяги будут зависеть от скорости ветра.

Второе приближение

Во втором приближении производится компьютерная визуализация движения судна с учетом реальных размеров судна, формы обводов корпуса, особенностей береговой линии и глубин в районе плавания. Визуализация движения судна производится с использованием программного обеспечения, разработанного сотрудниками лаборатории мореходных качеств судов (рис. 8).

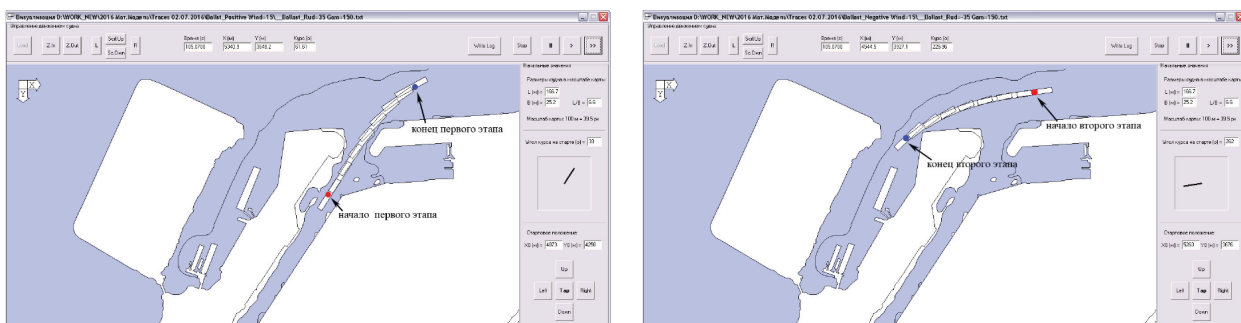


Рис. 8. Визуализация решения для двух этапов маневра входа в Канонерскую гавань

Процесс визуализации выполняется в следующей последовательности.

1. Разрабатывается электронная карта района плавания с отображением границ фарватера и траектории, соответствующей заданному «сценарию».
2. Корректируется математическая модель судна в соответствии с данными, полученными в процессе первого приближения.
3. Разрабатывается схематизированная модель контура судна, имеющего соответствующие значения длины и ширины.

Разработка электронной карты района плавания производится на основе растровых изображений существующей карты. Электронная карта представляет собой совокупность ломаных линий (заданных координатами их вершин), обозначающих береговую линию и изолинии глубин нужных значений. Простота способа создания позволяет быстро подготовить карту любого необходимого района.

Рисование контура судна производится в автоматическом режиме в соответствии с рассчитанными значениями кинематических параметров движения. Масштабы карты и судна согласованы, это позволяет определять точное положение объектов на экране. Признаком того, что судно способно выполнить маневр, является отсутствие точек касания движущегося контура и границы судового хода. В случае касания процесс визуализации автоматически останавливается и делается вывод о невозможности прохождения судном заданного участка района плавания в соответствии с принятым «сценарием».

Другим важным фактором, оказывающим влияние на результат решения, является правильность задания начальных условий, а именно: координаты точки начала маневра, начального угла курса, угла перекладки руля, скорости хода судна, силы и направления ветра.

Начальные условия, оказывающие влияние на траекторию движения судна, и факт касания контуров, определяющих судно и канал, могут свидетельствовать не только о невозможности выполнения маневра, но и о неверно установленных начальных условиях. Поэтому для получения достоверной информации о возможности прохода к месту швартовки необходимо убедиться в том, что принятый «сценарий» является оптимальным.

Третье приближение

При выполнении расчетов в рамках первого и второго приближений определяется принципиальная возможность выполнить заданным судном, принятый к рассмотрению «сценарий». Однако при этом из рассмотрения полностью оказывается исключен человеческий фактор, который чаще всего и является причиной аварий. Поэтому окончательное заключение о возможности безаварийного маневрирования судна дается по результатам моделирования движения на тренажере маневрирования и управления судном с использованием публикаций [1] – [7]. Работа выполняется опытными судоводителями и лоцманами с учетом результатов, полученных в процессе первых двух приближений.

Визуальная модель, используемая в тренажере, кроме динамики движения судна определяет размеры «мертвой зоны», положение буев, створные знаки и др. Наблюдение за движением судна ведется в режиме реального времени. На тренажере имеется возможность проверки работы судна самостоятельно и с помощью буксиров.

Меняя судоводителей и внешние условия при проведении судна по заданному фарватеру, можно оценить риски возникновения аварийных ситуаций.

Выводы

1. Предлагаемая методика может быть использована для решения задачи о безопасном маневрировании применительно к любому водоизмещающему судну, маневрирующему на любой акватории. Это позволяет использовать ее при проектировании новых портов, оценке допустимых размеров судов, заходящих в действующий порт, оценке потребной мощности буксиров, обеспечивающих проводку и швартовку судна, разработку требований к метеорологическим условиям в районе порта и др.

2. Методика включает два разных этапа моделирования: расчетную оценку возможности судна выполнить маневр в соответствии с заданным «сценарием» и оценку возможности управлять судном в реальных условиях и в режиме реального времени с учетом человеческого фактора.

3. Используемая на первом этапе исследования упрощенная модель судна позволяет изменять алгоритм описания сил и моментов, действующих на это судно, легко адаптировать модель к каждому конкретному случаю и, как следствие, быстрее получать более точный результат.

4. Визуальная модель, используемая в тренажере, кроме динамики движения судна определяет размеры «мертвой зоны», положение буйев, створные знаки и др. Наблюдение за движением судна ведется в режиме реального времени. На тренажере можно проверить возможность работы судна самостоятельно и с помощью буксиров. Выполняя замену судоводителей и изменяя внешние условия или при замене судоводителей и изменении внешних условий при проведении судна по заданному фарватеру, можно оценить риски возникновения аварийных ситуаций.

Авторы выражают искреннюю благодарность за помощь в разработке методики сотрудникам тренажерного центра ГУМРФ имени адмирала С. О. Макарова: доценту кафедры навигации старшему инструктору МУТЦ Владимиру Евгеньевичу Кузьмину и лоцману I-й категории старшему инструктору МУТЦ Евгению Александровичу Воронину.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Корнараки В. А. Справочник лоцмана / В. А. Корнараки. — М.: Транспорт, 1975. — 168 с.
2. Снопков В. И. Управление судном / В. И. Снопков. — Изд-во «Профессионал», 2004. — 536 с.
3. Алексеев Л. Л. Практическое пособие по управлению морским судном / Л. Л. Алексеев. — СПб.: ЗАО «ЦНИИМФ», 1996. — 188 с.
4. Пламмер Дж. К. Маневрирование судов в узкостях / Дж. К. Пламмер. — Л.: Судостроение, 1986. — 80 с.
5. Погосов С. Г. Швартовка крупнотоннажных судов / С. Г. Погосов. — М.: Транспорт, 1976. — 172 с.
6. Третьяк А. Г. Практика управления морским судном / А. Г. Третьяк, Л. А. Козырь. — М.: Транспорт, 1988. — 112 с.
7. Удалов В. И. Управление крупнотоннажными судами / В. И. Удалов, И. Ф. Массанюк, В. Г. Матевосян, С. Б. Ольшамовский. — М.: Транспорт, 1986. — 229 с.
8. Справочник по теории корабля / под ред. Я. И. Войткунского. — Л.: Судостроение, 1985. — Т. 3. — 544 с.
9. Басин А. М. Ходкость и управляемость судов: учеб. пособие для вузов водного транспорта / А. М. Басин. — М.: Транспорт, 1977. — 456 с.
10. Басин А. М. Гидродинамика судов на мелководье / А. М. Басин, И. О. Веледницкий, А. Г. Ляховицкий. — М.: Судостроение, 1976. — 320 с.
11. Dand I. W. The squat of full ship in shallow water / I. W. Dand, A. M. Ferguson // Transactions of the Royal Institution of Naval Architects. — 1973. — Vol. 115. — Pp. 237–255.
12. Manoeuvring Technical Manual / Group of experts; edited by Capt. Dipl.-Ing. J. Brix. — Hamburg, Germany: Seehafen Verlag, 1993. — 266 p.

REFERENCES

1. Kornaraki, V. A. *Spravochnik locmana*. M.: Transport, 1975.
2. Snopkov, V. I. *Upravlenie sudnom*. Izd. Professional, 2004.
3. Alekseev, L. L. *Prakticheskoe posobie po upravleniyu morskim sudnom*. SPb.: ZAO TsNIIMF, 1996.
4. Plammer, Dzh. K. *Manevrirovanie sudov v uzkostyakh*. L.: Sudostroenie, 1986.
5. Pogosov, S. G. *Shvartovka krupnotonnazhnykh sudov*. M.: Transport, 1976.
6. Tret'yak, A. G., and L. A. Kozyr'. *Praktika upravleniya morskim sudnom*. M.: Transport, 1988.
7. Udalov, V. I., I. F. Massanyuk, V. G. Matevosyan, and S. B. Ol'shamovskii. *Upravlenie krupnotonnazhnyimi sudami*. M.: Transport, 1986.

8. Voitkunsii, Ya. I., editor. *Spravochnik po teorii korablya*. L.: Sudostroenie, 1985. Vol. 3.
9. Basin, A. M. *Khodkost' i upravlyaemost' sudov. Uchebnoe posobie dlya VUZov vodnogo transporta*. M.: Transport, 1977.
10. Basin, A. M., I. O. Velednitskii, and A. G. Lyakhovitskii. *Gidrodinamika sudov na melkovod'e*. M.: Sudostroenie, 1976.
11. Dand, I. W., and A. M. Ferguson. "The squat of full ship in shallow water." *Transactions of the Royal Institution of Naval Architects* 115 (1973): 237–255.
12. Brix, J., editor. *Manoeuvring Technical Manual*. Hamburg, Germany: Seehafen Verlag, 1993.

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

Лебедева Марина Петровна —
кандидат технических наук
Лаборатория «Мореходных качеств судов»
ФГБОУ ВО «ГУМРФ имени
адмирала С.О. Макарова»
198035, Российская Федерация, Санкт-Петербург,
ул. Двинская 5/7
e-mail: Imp45@yandex.ru, LebedevaMP@gumrf.ru

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

Лебедев Алексей Олегович —
научный сотрудник
Лаборатория «Мореходных качеств судов»
ФГБОУ ВО «ГУМРФ имени
адмирала С.О. Макарова»
198035, Российская Федерация, Санкт-Петербург,
ул. Двинская 5/7
e-mail: Imp45@yandex.ru

INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Lebedeva, Marina P. — PhD
Laboratory of Seaworthiness
Admiral Makarov State University
of Maritime and Inland Shipping
5/7 Dvinskaya Str., St. Petersburg 198035,
Russian Federation
e-mail: Imp45@yandex.ru,
LebedevaMP@gumrf.ru

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

Lebedev, Aleksei O. —
Researcher
Laboratory of Seaworthiness
Admiral Makarov State University
of Maritime and Inland Shipping
5/7 Dvinskaya Str., St. Petersburg 198035,
Russian Federation
e-mail: Imp45@yandex.ru

Статья поступила в редакцию 26 декабря 2016 г.
Received: December 26, 2016.

DOI: 10.21821/2309-5180-2017-9-1-121-131

MATHEMATICAL MODEL ELABORATION OF MULTI-PASS ARC WELDING

A. V. Makarchuk¹, N. V. Makarchuk¹, V. N. Startsev²

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

2 — Academician I. V. Gorynin Central Research Institute of Structural Materials “Prometey”,
St. Petersburg, Russian Federation.

The article discusses approaches to the creation of predictive models of metal microstructure and mechanical properties of welded joints in multi-pass welding. The main component of this model is the calculation of thermodynamic cycles of weld passes for a particular point of the weld and heat-affected zone (HAZ). The mathematical model of multi-pass arc welding, based on physical processes, taking into account phase transitions at melting, solidification and evaporation of metal was elaborated. Introduction in the developed model, the function state of the metal (metal part in the solid state) has allowed to take into consideration the release and absorption of latent heat of phase transition during melting and solidification in the source term of the conductivity equation. The developed model allows to evaluate the influence of welding parameters, sequence of welding passes, design and dimensions of the structure and heating conditions on the thermal cycle which determines mechanical properties and structure of the metal in the weld zone and in HAZ. Additionally, calculation the equation of conductivity in this form, moving seamlessly from the temperature's dependencies by the coordinate into dependencies by time. The developed mathematical model was applied to the calculation of thermal cycles in multi-pass welding sheet material, low carbon and low alloy steel with a thickness of 20 mm with a V-shaped groove of the joint. The calculation results allowed to determine the transverse shape of welded joint and the position of the main temperature lines in the area of the weld and heat-affected zone. The following main parameters of the thermal cycle at multi-pass welding were evaluated: maximal temperatures, holding time and rate of heating and cooling of the metal in the weld zone and in HAZ in temperature transformation range of the austenite. In multi-pass welding each point of the weld and heat-affected zone undergoes a large number of different thermal cycles. Such repeated thermal cycles affect the metal previously completed passes of weld and HAZ. In the result, the welded joint is an assembly of layers with heterogeneous structure and mechanical properties. Microstructure in the weld zone and in HAZ is predicted based on the calculated thermal cycles.

Keywords: mathematical model, multi-pass arc welding, thermal cycle, heat-affected zone, microstructure.

For citation:

Makarchuk, Aleksandra V., Nataliya V. Makarchuk, and Vasilii N. Startsev. “Mathematical model elaboration of multi-pass arc welding.” *Vestnik Gosudarstvennogo universiteta morskogo i rechnogo flota imeni admirala S.O. Makarova* 9.1 (2017): 121–131. DOI: 10.21821/2309-5180-2017-9-1-121-131.

УДК 621.791

РАЗРАБОТКА МАТЕМАТИЧЕСКОЙ МОДЕЛИ МНОГОПРОХОДНОЙ ДУГОВОЙ СВАРКИ

А. В. Макаrchук¹, Н. В. Макаrchук¹, В. Н. Старцев²

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

2 — ГНЦ ФГУП «ЦНИИ КМ «Прометей» НИЦ «Курчатовский институт»,
Санкт-Петербург, Российская Федерация.

В статье рассматриваются подходы к созданию модели прогнозирования микроструктуры металла и механических свойств сварного соединения при многопроходной сварке. Основной составляющей этой модели является математический расчет термодинамических циклов проходов сварки для конкретной точки сварного шва и зоны термического влияния. На основе физических процессов, сопровождающих сварку, разработана математическая модель многопроходной дуговой сварки с учетом фазовых переходов при плавлении, затвердевании и испарении металла. Введение в разработанную модель функции состояния металла

(доля металла в твердом состоянии) позволила учесть выделение и поглощение скрытой теплоты фазового перехода при плавлении и затвердевании в источниковом члене уравнения теплопроводности. Разработанная квазистационарная модель позволяет установить влияние режима сварки, последовательности укладки сварочных валиков, формы и размеров изделия и условий подогрева на термический цикл, от которого зависят структура и свойства основного металла в зоне термического влияния. Кроме того, решение уравнения теплопроводности в данной форме позволяет легко переходить от температурных зависимостей по координате к зависимостям по времени. Разработанная математическая модель применена к расчету термических циклов при многопроходной сварке листового материала малоуглеродистой низколегированной стали толщиной 20 мм с V-образной разделкой кромок стыка. Результаты расчета позволили определить поперечную форму сварного соединения и положение основных температурных линий в зоне шва и зоны термического влияния. Определены основные количественные параметры термических циклов при многопроходной сварке, такие как максимальные температуры, время пребывания и скорости нагрева и охлаждения металла шва и зоны термического влияния в интервалах температур превращения аустенита. При многопроходной сварке каждая точка шва и зоны термического влияния проходит большое количество разных термических циклов. Такие повторные термические циклы воздействуют на металл ранее выполненных проходов шва и зоны термического влияния. В результате сварное соединение представляет собой агрегат слоев с неоднородной структурой и механическими свойствами. На основании рассчитанных термических циклов прогнозируется микроструктура зоны шва и зоны термического влияния.

Ключевые слова: математическая модель, многопроходная сварка, термический цикл, зона термического влияния, микроструктура.

Для цитирования:

Макарчук А. В. Разработка математической модели многопроходной дуговой сварки / А. В. Макарчук, Н. В. Макарчук, В. Н. Старцев // Вестник Государственного университета морского и речного флота имени адмирала С. О. Макарова. — 2017. — Т. 9. — № 1. — С. 121–131. DOI: 10.21821/2309-5180-2017-9-1-121-131.

Введение

В современном судостроении широко применяется многопроходная дуговая сварка для сборки судовых конструкций. Особые требования предъявляются к работоспособности корпусных конструкций, где сосредоточено основное количество сварных швов, выполненных многопроходной дуговой сваркой. Сварка сопровождается большим количеством физико-химических процессов, связанных с нагревом, плавлением, охлаждением и кристаллизацией металла шва, его взаимодействием с флюсами, шлаками и газами, структурными и объемными превращениями основного металла в зоне термического влияния. Таким образом, тепловые процессы в зоне сварки определяют физико-химические и механические свойства сварного шва [1] – [3].

В связи с этим большой интерес представляет моделирование физических процессов, происходящих при сварке. При этом моделирование теплового состояния объекта сварки является наиболее востребованным, так как температурное поле определяет форму осей кристаллитов, а, следовательно, и микроструктуру металла шва, что влияет на характер распределения деформаций и деформационную способность металла в температурном интервале хрупкости. Теоретическое исследование процессов теплообмена в настоящее время в значительной степени базируется на их численном моделировании с использованием ЭВМ [3] – [6].

Предлагаемая модель многопроходной сварки дается в приложении к автоматической многопроходной сварке под флюсом. Применение ее к другим видам многопроходной сварки (в газовой защите или ручной плавящимися электродами) потребует минимальных изменений в граничных условиях.

Математическая модель многопроходной дуговой сварки

Физическую картину многопроходной автоматической дуговой сварки под флюсом можно описать следующим образом. Имеются два листа металла, которые образуют сборку, определяемую чертежами конструкции. Листы металла имеют в месте стыка заданную разделку кромок. Место разделки кромок и часть поверхности свариваемых листов покрыта слоем флюса. Сквозь слой

флюса к поверхности металла в разделке подается сварочная проволока, между ней и металлом горит электрическая дуга. Сварочная проволока движется вдоль кромок по разделке основного металла. Расплавленный металл проволоки и основного металла формирует валик наплавленного металла и нагревает листы основного металла. Валики накладываются последовательно друг за другом в определенном порядке, заполняя разделку листов.

Сформулируем математическую модель распространения тепла в металле в соответствии с описанной физической картиной. Так как предполагается произвольная сборка листов металла, будем искать решение в трехмерной области XYZ (X — продольное направление, Y — ширина, Z — высота). Движением жидкого металла в ванне расплава пренебрегаем. Физические параметры металла, такие как плотность, теплоемкость, теплопроводность, являются функциями температуры. Тогда уравнение нестационарной теплопроводности и движения электрода можно записать в следующем виде:

$$\rho(T) \cdot C_p(T) \cdot \frac{dT}{dt} - \operatorname{div}(\lambda(T) \cdot \operatorname{grad}(T)) = S; \quad (1)$$

$$\frac{dx}{dt} = V_{\text{св}}, \quad (2)$$

где $\rho(T)$ — плотность; $C_p(T)$ — теплоемкость; $\lambda(T)$ — теплопроводность; S — объемные источники тепла; T — температура; $V_{\text{св}}$ — скорость сварки; t — время; x — продольное направление сварки.

Введем в рассмотрение функцию фазового состояния металла (долю металла в твердом состоянии):

$$\text{Solid} = 0,5 \cdot \operatorname{erfc}\left(\frac{4(T - T_L)}{T_L - T_S} + 2\right), \quad (3)$$

где T_S — температура солидуса; T_L — температура плавления.

Эта функция равна единице, если $T < T_S$, и равна нулю, если $T > T_L$, а в интервале температур $T_S < T < T_L$ принимает значение от 1 до 0. При фазовом переходе от твердого состояния к жидкому или от жидкого к твердому поглощается или выделяется скрытая теплота плавления. Если предположить, что количество тепла, выделившееся при фазовом переходе, пропорционально количеству расплавленного металла, то

$$Q = \int_0^1 L \cdot d(\text{Solid}), \quad (4)$$

где L — скрытая теплота плавления; Q — теплота.

Тогда объемный источник тепла в уравнении (1) будет иметь вид

$$S = \rho(T) \cdot L \cdot \frac{d(\text{Solid})}{dt}. \quad (5)$$

Перейдем теперь к системе координат, связанной с электродом. Тогда вместо системы уравнений (1) – (2) получим одно стационарное уравнение:

$$\rho(T) \cdot C_p(T) \cdot V_{\text{св}} \cdot \frac{dT}{dx} = \operatorname{div}(\lambda(T) \cdot \operatorname{grad}(T)) + \rho(T) \cdot L \cdot V_{\text{св}} \cdot \frac{d(\text{Solid})}{dx}. \quad (6)$$

Для задания граничных условий построим методику расчета наплавки одного валика. Разделка кромок металла по высоте делится в соответствии с чертежами на сварку на n слоев. Причем высота предыдущего слоя является верхней поверхностью внутри разделки. В точке с координатами X_0, Y_0, Z_0 на площади, ограниченной радиусом r , действует поверхностный источник тепла с заданным распределением плотности мощности q . Высота металла валика шириной $S_{\text{вал}}$ увеличивается от этой координаты на длине $L_{\text{напл}}$ от высоты предыдущего слоя валиков до высоты следующего слоя, и далее до конца разделки по длине высота валика остается постоянной. Считается, что металл непрерывно поступает в плоскости $Y-Z$ в начале координат и на участке роста высоты

валика в направлении оси X со скоростью $V_{\text{св}}$. После расчета температурного поля переходят к расчету следующего валика и так далее до полного заполнения разделки.

Таким образом, граничные условия можно описать в следующем виде.

В начале расчетной области в плоскости $Y - Z$ и на участке роста высоты валика задается начальная температура и скорость сварки:

$$T = T_0; \quad V = V_{\text{св}}. \quad (7)$$

На верхней поверхности листов основного металла в полосе шириной h в обе стороны от оси разделки, которая покрыта флюсом, задается условие теплоизоляции

$$\frac{dT}{dn} = 0, \quad (8)$$

где n — направление нормали.

На остальной части верхней поверхности, боковой и нижней части листов задается условие конвективного теплообмена

$$\lambda \cdot \frac{dT}{dn} = -\alpha \cdot k \cdot (T - T_{\text{воз}}), \quad (9)$$

где α — коэффициент теплоотдачи; k — коэффициент, учитывающий направление нормали к направлению силы тяжести.

В области воздействия теплового источника задан тепловой поток и учитывается его изменение, связанное с фазовыми переходами плавления и испарения металла:

$$\lambda \cdot \frac{dT}{dn} = q - \rho \cdot V_{\text{св}} \cdot L - m \cdot LL, \quad (10)$$

где q — плотность теплового потока сварочного источника; L — скрытая теплота плавления; LL — скрытая теплота испарения; m — поток пара металла с единицы поверхности.

Следует отметить, что учет испарения металла с поверхности ванны расплава является важной составляющей баланса тепла, так как при плотности теплового потока, превышающей 10^4 Вт/см^2 , температура поверхности сварочной ванны в области воздействия дуги будет превышать температуру кипения от нескольких десятков до сотен градусов. Расчет потока испаряющегося металла с поверхности ванны расплава проводился в рамках одномерной модели испарения Найта [7].

Таким образом, решение уравнений (3), (6) совместно с граничными условиями (7) – (10) определяют распределение температуры при наложении одного валика металла при многопроходной сварке.

Особенностью данного расчета является то, что температурные поля в различных сечениях по координате X соответствуют температурным полям для одного сечения, но при разном времени. При этом время определяется как отношение координаты к скорости сварки, а скорость нагрева и охлаждения металла — как произведение скорости сварки на производную температуры по координате X (11):

$$t = \frac{X}{V_{\text{св}}}; \quad \frac{dT}{dt} = V_{\text{св}} \cdot \frac{dT}{dx}. \quad (11)$$

Поскольку форма термического цикла зависит от способа сварки, знание характера термического цикла металла околошовной зоны имеет большое значение. Поэтому, используя эти соотношения, можно рассчитать термические циклы сварки для любой точки поперечного сечения сварного шва и зоны термического влияния. Для построения профилей линий сплавления и других изолиний в зоне термического влияния при многопроходной сварке необходимо провести расчеты всех валиков согласно их схеме раскладки и определить максимальные температуры, которые будут достигнуты в каждой точке поперечного сечения шва. Максимальная температура в конкретной точке поперечного сечения шва находится как T_{max} по результатам тепловых расчетов проходов всех валиков.

Результаты численного моделирования многопроходной сварки

Разработанная математическая модель была применена к расчетной оценке параметров термического цикла сварного шва и зоны термического влияния при сварке листовой малоуглеродистой низколегированной стали толщиной 20 мм. Рассматривается *V*-образная разделка кромок с углом 45° и притуплением 1 мм. Раскладка валиков внутри разделки листов металла осуществлялась в шесть слоев. Расчет проводился только в разделке, области усиления сварных швов не рассчитывались. Теплофизические характеристики в расчетах были следующие: теплоемкость $C = 690$ Дж/кг·К, теплопроводность $\lambda = 0,268$ Вт/см·К, плотность $\rho = 0,0078$ кг/см³, температура плавления $T_{пл} = 1500$ °С. Скорость сварки в расчетах варьировалась в диапазоне $V_{св} = 10 - 20$ мм/с. В пятне нагрева радиусом $r = 6,5$ мм плотность мощности принималась $q = 18$ кВт/см². Начальная температура листов металла для проведенных расчетов принималась 20 °С.

Работоспособность сварного соединения при действии внешних нагрузок зависит от локальной микроструктуры и локальных механических свойств сварного шва, зоны термического влияния и основного металла. Классическая схема структурных изменений металла шва и зоны термического влияния основана на схеме однопроходной сварки, в которой каждая зона проходит один раз свой термический цикл. Максимальная температура цикла, скорость нагрева в интервале температур от температуры критической точки $A_{с3}$ до T_{max} , время пребывания металла выше критической точки $A_{с3}$ соответственно при нагреве, охлаждении и суммарное, скорости охлаждения в интервалах температур превращения аустенита $800\text{ }^\circ\text{C} - 500\text{ }^\circ\text{C}$ и $600\text{ }^\circ\text{C} - 500\text{ }^\circ\text{C}$, а также соответствующие этим интервалам температур длительности охлаждения; мгновенная скорость охлаждения при температуре наименьшей устойчивости аустенита T_{min} являются важнейшими параметрами термических циклов сварки [3], [4], [8], [9]. Характер изменений структуры зависит от химического состава основного металла и его предшествующей термической и механической обработки. Здесь необходимо отметить, что при многопроходной сварке каждая точка шва и зоны термического влияния проходит большое количество разных термических циклов. Такие повторные термические циклы воздействуют на металл ранее выполненных проходов шва и зоны термического влияния. В результате сварное соединение представляет собой агрегат слоев с неоднородной структурой и механическими свойствами (рис. 1). На фотографии шлифа хорошо видны зоны термического влияния от валиков, наложенные на зоны термического влияния ранее наплавленных валиков.

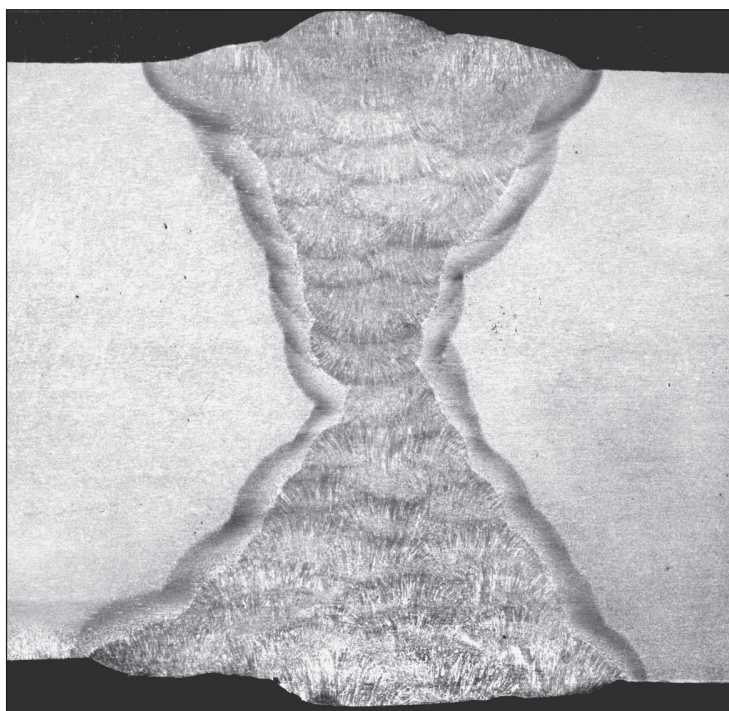


Рис. 1. Макроструктура сварного шва и зоны термического влияния с *X*-образной разделкой кромок листа, выполненного MIG/MAG сваркой

Поскольку для оценки получающихся структур в зоне термического влияния большое значение имеют термические циклы сварки, в расчетах им уделялось основное внимание.

Результаты расчета позволили получить поперечную форму сварного шва и положение основных температурных линий в зоне термического влияния (рис. 2). Нумерация валиков не связана с очередностью сварочных проходов.

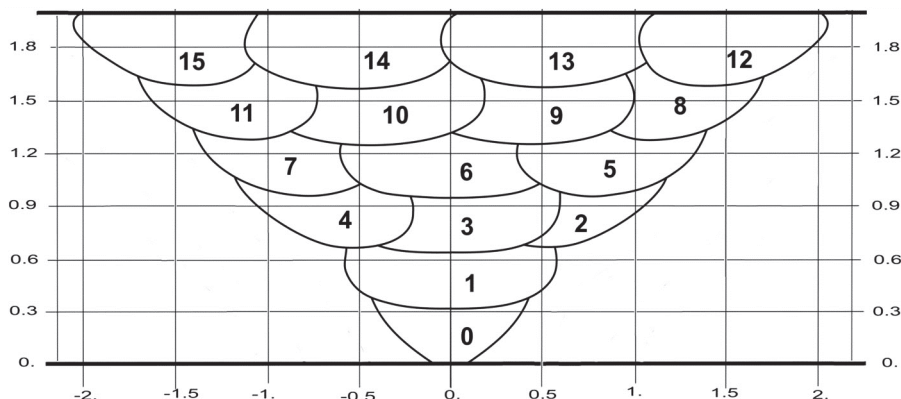


Рис. 2. Расчетная форма линий сплавления при многопроходной сварке с V-образной разделкой кромок листа толщиной 20 мм (номера валиков не связаны с очередностью наплавки валиков)

Рассмотрим термические циклы небольшой области металла вокруг точки с координатами $Y = 1,0$ см, $Z = 0,8$ см вблизи от границы сплавления валика 2 и основного металла (рис. 3).

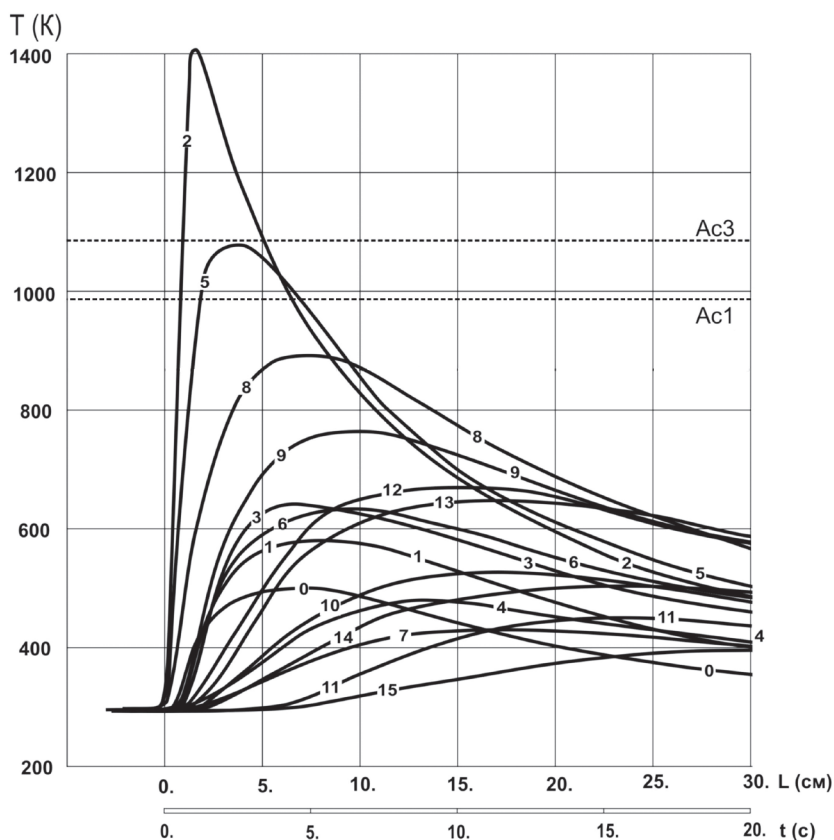


Рис. 3. Термические циклы при многопроходной сварке для малой области с координатами центра $Y = 1,0$ см, $Z = 0,8$ см со скоростью $V_{св} = 15$ мм/с (циклы приведены к единому началу)

На графике приведены термические циклы от всех сварочных проходов (номера линий соответствуют номерам валиков рис. 2). По результатам расчетов видно, что эта область попадает

при наложении различных сварочных валиков в разные зоны термического влияния. Рассматриваемая область металла нагревается до максимальной температуры от валика 2 и достигает величины чуть больше $T_{\max} = 1400 \text{ K}$ ($\sim 1130^\circ \text{C}$), которая несколько превышает температуру A_{c3} $\alpha \rightarrow \gamma$ превращения, т. е. находится на участке перекристаллизации (нормализации). Время пребывания металла при температуре выше критической точки A_{c3} составляет $\Delta t_{\text{проб}} = 2,8 \text{ с}$, из них нагрев осуществляется в течение $\Delta t_{\text{нагр}} = 0,44 \text{ с}$ со средней скоростью $\partial T / \partial t_{\text{нагр}} = 743 \text{ K/c}$, охлаждение металла до точки A_{c3} проходит со средней скоростью $\partial T / \partial t_{\text{охл}} = -138 \text{ K/c}$. Длительности охлаждения в интервалах температур превращения аустенита $1073 - 773 \text{ K}$ ($800^\circ \text{C} - 500^\circ \text{C}$) и $873 - 773 \text{ K}$ ($600^\circ \text{C} - 500^\circ \text{C}$), а также соответствующие этим интервалам температур скорости охлаждения, соответственно, равны $\Delta t_{8/5} = 4,5 \text{ с}$, $\partial T / \partial t_{8/5} = -67 \text{ K/c}$ и $\Delta t_{6/5} = 1,9 \text{ с}$, $\partial T / \partial t_{6/5} = -52 \text{ K/c}$. Мгновенная скорость охлаждения в точке минимальной устойчивости аустенита равна $\partial T / \partial t_{\min} = -97 \text{ K/c}$. При выполнении этого прохода металл переходит в состояние аустенита, который при последующем охлаждении распадается, и можно ожидать образования мартенситно-бейнитной микроструктуры. В малоуглеродистой низколегированной стали на участке нормализации образуется мелкозернистая структура, характеризующаяся в целом достаточно высоким комплексом механических свойств (прочностью, пластичностью, вязкостью). На закаливающихся сталях после данного прохода металл в данной точке будет соответствовать микроструктуре закалки.

Вторым по значимости термическим циклом для данной области является наплавка валика 5. Максимальная температура, достигаемая при проходе 5, чуть ниже температуры A_{c3} , $T_{\max} = 1060 \text{ K}$ ($\sim 790^\circ \text{C}$), т. е. наша точка оказывается в области неполной перекристаллизации (см. рис. 3 и 4). Его основными параметрами являются: время пребывания металла в межкритическом интервале температур $\Delta t_{\text{проб}} = 3,55 \text{ с}$, $\Delta t_{\text{нагр}} = 1,18 \text{ с}$ со средней скоростью $\partial T / \partial t_{\text{нагр}} = 74 \text{ K/c}$ и охлаждение после достижения $T_{\max}$ со средней скоростью $\partial T / \partial t_{\text{охл}} = -40 \text{ K/c}$. В интервале температур распада аустенита параметры термического цикла: $\Delta t_{8/5} = 5,9 \text{ с}$, $\partial T / \partial t_{8/5} = -51 \text{ K/c}$ и $\Delta t_{6/5} = 2,0 \text{ с}$, $\partial T / \partial t_{6/5} = -50 \text{ K/c}$. Нагрев и охлаждение малоуглеродистой низколегированной стали по термическому циклу 5 не изменяет его структуру. Она остается мартенситно-бейнитной, но размер зерна может измениться. Качество сварного соединения значительно меньше зависит от изменений структуры при наплавке валика 5, чем это было при наложении валика 2.

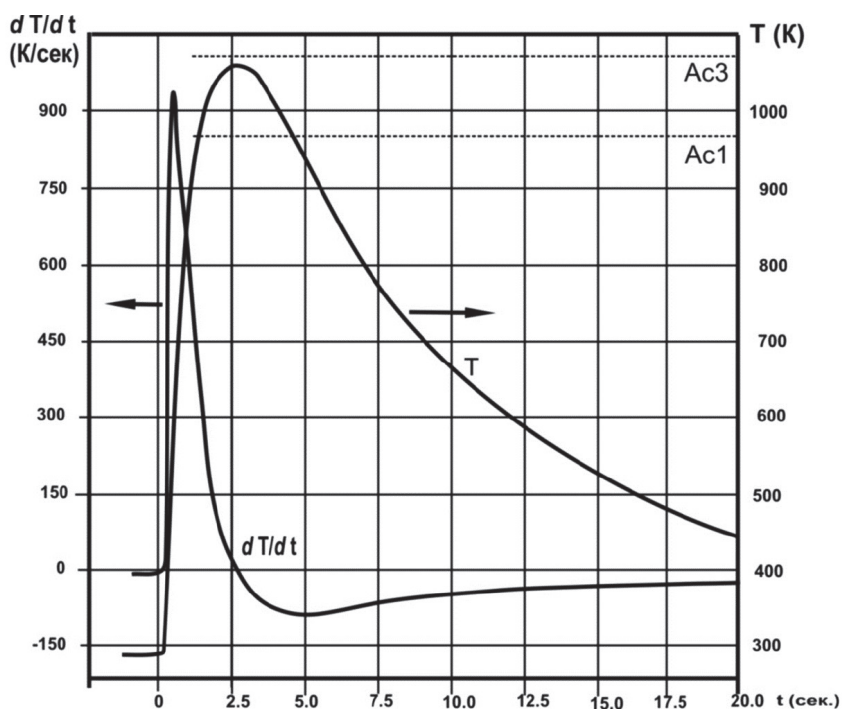


Рис. 4. Графики термического цикла и скорости нагрева, охлаждения металла в точке $Y = 1,0 \text{ см}$, $Z = 0,8 \text{ см}$ при наплавке валика 5

При наплавке валика 8 максимальная температура в рассматриваемой точке достигает $T_{\max} = 900 \text{ K}$ ($\sim 630^\circ \text{C}$). Это участок рекристаллизации, на котором металл, нагревается от 800 K ($\sim 500^\circ \text{C}$) до температуры несколько ниже A_{c1} . Время достижения максимальной температуры от начала нагрева составляет около 5 с. После начала охлаждения, рассматриваемая область сразу попадает в зону интервала температур $873 - 773 \text{ K}$ ($600^\circ \text{C} - 500^\circ \text{C}$), параметры которой $\Delta t_{6/5} = 3,53 \text{ с}$, $\partial T / \partial t_{6/5} = -28 \text{ K/с}$. Структура и свойства металла при нагреве в этом диапазоне могут быть различными в зависимости от исходного его состояния перед сваркой. Холодная пластическая деформация металла перед сваркой при нагреве до температур ниже A_{c1} вызывает рекристаллизацию к значительному росту зерна.

Термический цикл от валика 9 проходит по нижней границе участка рекристаллизации $T_{\max} = 770 \text{ K}$ ($\sim 500^\circ \text{C}$). Максимальная температура достигается за 6,6 с. Скорость охлаждения на начальном участке составляет $\partial T / \partial t = -20 \text{ K/с}$. Поэтому структура металла, полученная после наплавки валиков 2, 5 и 8, после термического цикла валика 9, как и от всех остальных валиков, термические циклы которых располагаются ниже его, в процессе сварки не будет претерпевать видимых изменений.

Выстраивая рассчитанные термические циклы в последовательности выполнения сварочных проходов, получим полную тепловую картину для данной точки при многопроходной сварке.

Аналогичным образом можно получить термическую картину для любой точки сварного шва и зоны термического влияния — например для области разделки листов, где материалом заполнения в основном является сварочная проволока. Рассмотрим область с центром в точке с координатами $Y = 1,2 \text{ см}$, $Z = 1,2 \text{ см}$. Термические циклы, которые испытывает металл в зоне шва, носят особый характер, так как часть из них имеет максимальную температуру выше температуры плавления, а другая часть меньше нее (рис. 5). Время пребывания металла выше точки A_{c3} достигает от 4 – 5 с при скорости сварки 20 мм/с и до 8 – 10 с при скорости 10 мм/с . Максимальные температуры нагрева в этой области $2500 - 2800 \text{ K}$ свидетельствуют о большом перегреве металла. Повторные термические циклы могут иметь максимальные температуры в диапазоне $500 - 1800 \text{ K}$. После того как металл стал твердым, скорость охлаждения изменяется от $200 - 250 \text{ K/с}$ в начале до $10 - 20 \text{ K/с}$ в конце. Для повторных термических циклов скорость охлаждения находится в диапазоне $80 - 10 \text{ K/с}$.

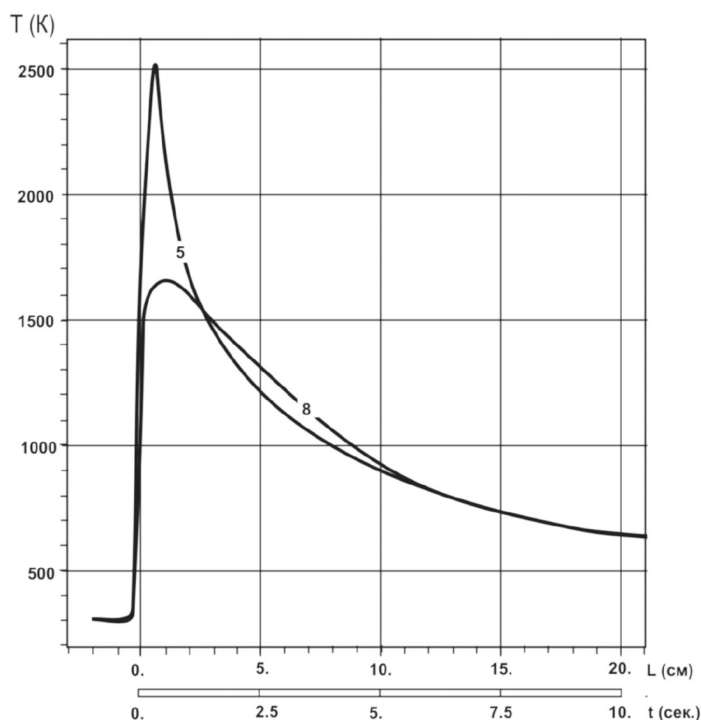


Рис. 5. Графики термических циклов при наплавке валиков 5 и 8 в области зоны шва с координатами центра $Y = 1,2 \text{ см}$, $Z = 1,2 \text{ см}$ со скоростью сварки $V_{\text{св}} = 20 \text{ мм/с}$

Как уже отмечалось, химический состав стали и термический цикл сварки определяет локальные микроструктурные и механические свойства шва и зоны термического влияния. Вместе с тем, взаимозависимость этих связей изучена недостаточно, поэтому на практике используются регрессивные модели образования фаз и механических свойств (твердость HV, временное сопротивление σ_B , предел текучести $\sigma_{0.2}$, относительное удлинение δ , относительное сужение ψ , энергию удара KVC) [10] – [12], которые учитывают влияние максимальной температуры термических циклов, времени пребывания и скорости охлаждения в интервалах температур превращения аустенита $\Delta t_{8/5}$, $\partial T / \partial t_{8/5}$.

Выводы

1. На основе физических процессов, сопровождающих сварку, разработана математическая модель многопроходной дуговой сварки. Введение в разработанную модель функции состояния металла (доля металла в твердом состоянии) позволила учесть выделение и поглощение скрытой теплоты фазового перехода при плавлении и затвердевании металла свариваемой конструкции. Кроме того, в граничных условиях принято во внимание изменение теплового потока дугового источника, связанное с плавлением и испарением наплавляемого металла. Учет скрытой теплоты плавления и затвердевания, которая оказывает влияние на форму и размеры сварочной ванны, позволяет в целом более точно рассчитать температурные поля при сварке, а, следовательно, и термические циклы для конкретных точек сварного соединения.

2. Проведенное численное исследование показало, что разработанная модель позволяет установить влияние режима сварки, последовательности укладки сварочных валиков, формы и размеров изделия и условий подогрева на термический цикл, от которого зависят структура и свойства основного металла в зоне термического влияния.

3. Определены важнейшие параметры термических циклов многопроходной сварки: максимальная температура цикла; скорость нагрева в интервале температур от критической точки *Ac3* до максимальной температуры; время пребывания металла выше критической точки *Ac3* соответственно при нагреве, охлаждении и их сумма; скорости охлаждения в интервалах температур превращения аустенита 800 °С – 500 °С и 600 °С – 500 °С, а также соответствующая этим интервалам температур длительность охлаждения; мгновенная скорость охлаждения при температуре наименьшей устойчивости аустенита.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Березовский Б. М.* Математические модели дуговой сварки: монография / Б. М. Березовский. — Челябинск: Изд-во «Челябинский ЦНТИ», 2006. — Т. 4. Основы тепловых процессов в свариваемых изделиях. — 547 с.
2. *Березовский Б. М.* Математические модели дуговой сварки: монография / Б. М. Березовский. — Челябинск: Изд-во «Челябинский ЦНТИ», 2008. — Т. 5. Температурные поля свариваемых изделий и термические циклы сварных соединений. — 656 с.
3. *Кархин В. А.* Тепловые процессы при сварке: монография / В. А. Кархин. — СПб.: Изд-во СПбГПУ, 2013. — 646 с.
4. *Ерофеев В. А.* Физико-математическая модель процесса многопроходной дуговой сварки / В. А. Ерофеев, А. В. Масленников // Известия ТулГУ. Сер. Компьютерные технологии в соединении материалов. — 2005. — № 3. — С. 246–255.
5. *Собко С. А.* Моделирование тепловых процессов при аргонодуговой сварке / С. А. Собко, И. С. Гареев, М. С. Писарев, Е. В. Брунеткина // Сварочное производство. — 2013. — № 4. — С. 6–10.
6. *Rao R. V.* Multi-pass turning process parameter optimization using teaching-learning-based optimization algorithm / R. V. Rao, V. D. Kalyankar // Scientia Iranica. — 2013. — Vol. 20. — Is. 3. — Pp. 967–974. DOI: 10.1016/j.scient.2013.01.002.
7. *Кривцун И. В.* Численный анализ процессов нагрева и конвективного испарения металла при обработке излучением импульсного лазера / И. В. Кривцун, И. Л. Семенов, В. Ф. Демченко // Автоматическая сварка. — 2010. — № 1. — С. 5–10.

8. Донченко Б. А. Расчет термодинамических циклов точек при автоматической сварке и наплавке с учетом особенностей плавления основного металла / Б. А. Донченко // Сварочное производство. — 2011. — № 9. — С. 3–9.
9. Донченко Б. А. Особенности расчета максимальных температур при автоматической сварке и наплавке / Б. А. Донченко // Сварочное производство. — 2011. — № 2. — С. 3–7.
10. Karkhin V. A. Prediction of microstructure and mechanical properties of weld metal with consideration for real geometry / V. A. Karkhin, P. N. Khomich, V. G. Michailov // Proceedings of Joint International Conference “Computer Technology in Welding and Manufacturing and Information Technologies in Welding and Related Processes”. — Kiev, 2006. — Pp. 162–166.
11. Касаткин О. Г. Расчетная оценка ударной вязкости низколегированного металла шва / О. Г. Касаткин // Автоматическая сварка. — 2005. — № 1. — С. 57–58.
12. Krasovsky A. On the residual stresses in multi-pass welds: coupling of welding simulation and fatigue analysis / A. Krasovsky, S. Sonnichsen, D. Bachmann // Procedia Engineering. — 2011. — Vol. 10. — Pp. 506–511. DOI: 10.1016/j.proeng.2011.04.085.

REFERENCES

1. Berezovskii, B. M. *Osnovy teplovykh protsessov v svarivaemykh izdeliyakh*. Chelyabinsk: Izd-vo «Chelyabinskii TsNTI», 2006.
2. Berezovskii, B. M. *Temperaturnye polya svarivaemykh izdelii i termicheskie tsikly svarnykh soedinenii*. Chelyabinsk: Izd-vo «Chelyabinskii TsNTI», 2008.
3. Karkhin, V. A. *Teplovy protsessy pri svarke: monografiya*. SPb.: Izd-vo SPbGPU, 2013.
4. Erofeev, V. A., and A. V. Maslennikov. “Fiziko-matematicheskaya model’ protsessa mnogoprokhodnoi dugovoi svarki.” *Izvestiya TulGU. Ser. Komp’yuternye tekhnologii v soedinenii materialov* 3 (2005): 246–255.
5. Sobko, S. A., I. S. Gareyev, M. S. Pisarev, and Ye. V. Brunetkina. “Thermal process modelling at argon-arc welding.” *Svarochnoe Proizvodstvo* 4 (2013): 6–10.
6. Rao, R. Venkata, and V. D. Kalyankar. “Multi-pass turning process parameter optimization using teaching–learning-based optimization algorithm.” *Scientia Iranica* 20.3 (2013): 967–974. DOI: 10.1016/j.scient.2013.01.002.
7. Krivtsun, I. V., I. L. Semenov, and V. F. Demchenko. “Chislennyi analiz protsessov nagreva i konvektivnogo ispareniya metalla pri obrabotke izlucheniem impul’snogo lazera.” *Avtomaticheskaya svarka* 1 (2010): 5–10.
8. Donchenko, Ye. A. “Calculation of a dot thermal cycle at machine welding and surfacing taking into consideration melting features of the parent metal.” *Svarochnoe Proizvodstvo* 9 (2011): 3–9.
9. Donchenko, Ye. A. “Calculation features of peak temperatures at automatic welding and deposition.” *Svarochnoe Proizvodstvo* 2 (2011): 3–7.
10. Karkhin, V. A., P. N. Khomich, and V. G. Michailov. “Prediction of microstructure and mechanical properties of weld metal with consideration for real geometry.” *Proceedings of Joint International Conference “Computer Technology in Welding and Manufacturing and Information Technologies in Welding and Related Processes”*. Kiev, 2006: 162–166.
11. Kasatkin, O. G. “Raschetnaya otsenka udarnoi vyazkosti nizkolegirovannogo metalla shva.” *Avtomaticheskaya svarka* 1 (2005): 57–58.
12. Krasovsky, A., S. Sönnichsen, and D. Bachmann. “On the residual stresses in multi-pass welds: coupling of welding simulation and fatigue analysis.” *Procedia Engineering* 10 (2011): 506–511. DOI: 10.1016/j.proeng.2011.04.085

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

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

INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

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

Макарчук Наталия Васильевна —

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

Старцев Василий Николаевич —

кандидат технических наук
ГНЦ ФГУП «ЦНИИ КМ «Прометей»
НИЦ «Курчатовский институт»
191015, Российская Федерация, Санкт-Петербург,
ул. Шпалерная 49
e-mail: starlv@mail.ru

Makarchuk, Nataliya V. — PhD

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

Startsev, Vasilii N. — PhD

Academician I.V. Gorynin Central
Research Institute of Structural
Materials “Prometey”
49 Shpalernaya Str., St. Petersburg, 191015,
Russian Federation
e-mail: starlv@mail.ru

Статья поступила в редакцию 20 декабря 2016 г.

Received: December 20, 2016.

DOI: 10.21821/2309-5180-2017-9-1-132-142

RESEARCH OF APPLICABILITY OF THE WELDED STEMS AND STERNS INSTEAD OF CAST ONES ON ICEBREAKERS AND ICE-CLASS SHIPS

G. B. Kryzhevich¹, A. A. Petrov²

1 — Krylov State Research Centre, St. Petersburg, Russian Federation

2 — Central Marine Research & Design Institute, St. Petersburg, Russian Federation

The requirements of acting Russian Maritime Register of Shipping (RS) Rules do not permit the usage of welded stem and stern for high arctic class vessels and icebreakers. At the same time, welded structures are more effective in the way of technology and economy, in comparison with cast and forged analogs, what is approved by the number of new projects of ships. The main purposes of this research are: determination of applicability of welded stems and sterns on ships under consideration, from the technological and scientific points of view; rate the strength of welded structure; formulate basic requirements and methods of testing of such structures. The article gives the key results of the R&D work devoted to this problem; analysis of the requirements of acting rules of different classification societies — IACS members; typical structures of welded stems, analysis of a number of strength calculations, including the Finite element method analysis (FEM); validation of the update of acting RS Rules. The authors made an analysis of existing tests of welded samples, overviewed means of their application to the welded structures, operating in low-temperature conditions. It was shown in the article that the most important strength parameters of such structures are the cold-resistance and crack growth resistance within the welding zone. In this way the authors gave recommendation for rationalization of existing criteria of the assessment of these parameters. As a result, it is stated, that for today the welded stems may be used for the ships with ice classes Icel-Arc7, and for the expansion of this assumption, a number of additional experiments are needed.

Keywords: stem, stern, ice class, icebreaker, welding, welded stem and stern.

For citation:

Kryzhevich, Gennadiy B. and Alexey A. Petrov. "Research of applicability of the welded stems and sterns instead of cast ones on icebreakers and ice-class ships." *Vestnik Gosudarstvennogo universiteta morskogo i rechnogo flota imeni admirala S.O. Makarova* 9.1 (2017): 132–142. DOI: 10.21821/2309-5180-2017-9-1-132-142.

УДК 629.5:658.588.8; 629.5.08

ИССЛЕДОВАНИЕ ПРИМЕНИМОСТИ СВАРНЫХ ШТЕВНЕЙ ВЗАМЕН ЛИТЫХ НА ЛЕДОКОЛАХ И СУДАХ ЛЕДОВОГО ПЛАВАНИЯ

Г. Б. Крыжевич¹, А. А. Петров²

1 — ФГУП «Крыловский государственный научный центр»,
Санкт-Петербург, Российская Федерация

2 — АО «Центральный научно-исследовательский и проектно-конструкторский
институт морского флота», Санкт-Петербург, Российская Федерация

Требования действующих Правил Российского морского регистра судоходства (РС) запрещают применять сварные штевни на судах высоких арктических классов и ледоколах. Вместе с тем, использование сварных конструкций более технологично и экономически выгодно, по сравнению с литыми и коваными аналогами, что нашло отражение в ряде новых проектов судов. Основные цели исследования: определить, насколько применение сварных штевней на рассматриваемых судах научно и технологически обосновано; оценить прочность сварной конструкции, аналогичной литой; сформулировать основные требования к таким конструкциям и методам их испытаний. В статье рассмотрены основные результаты научно-исследовательской работы, посвященной данной проблеме, проанализированы требования различных классификационных обществ — членов МАКО, приведены типовые конструкции сварных форштевней, проведен анализ результатов расчетов прочности литых и аналогичных сварных форштевней, выполненных по различным методикам, в том числе с использованием метода конечных элементов (МКЭ), обоснованы предложения по корректировке действующих Правил РС. Выполнен анализ существующих методов испытаний сварных об-

разцов, описана специфика их применения для сварных конструкций, работающих в условиях низких температур. Показано, что важнейшими параметрами прочности таких конструкций является хладостойкость и трещиностойкость в месте сварного шва, даны рекомендации по совершенствованию существующих критериев оценки этих параметров. Сделан вывод о применимости сварных форштевней на судах ледовых классов Ice1 – Arc7 и о необходимости проведения дополнительных модельных и / или полунатурных испытаний для распространения такого допущения на суда более высоких ледовых классов и ледоколы.

Ключевые слова: форштевень, ахтерштевень, ледовый класс, ледокол, сварка, сварные штевни.

Для цитирования:

Крыжевич Г. Б. Исследование применимости сварных штевней взамен литых на ледоколах и судах ледового плавания / Г. Б. Крыжевич, А. А. Петров // Вестник Государственного университета морского и речного флота имени адмирала С. О. Макарова. — 2017. — Т. 9. — № 1. — С. 132–142. DOI: 10.21821/2309-5180-2017-9-1-132-142.

Введение

Активное освоение Арктического региона, наряду с интенсификацией морского трафика по Северному морскому пути (СМП), ставит перед проектантами морской техники и органами, осуществляющими надзор за ее проектированием и эксплуатацией, множество сложных задач, среди которых одной из главных является поиск компромисса между экономической эффективностью и эксплуатационной надежностью объектов морской инфраструктуры, проектируемых для работы в Арктических морях. Безусловно, на сегодняшний день накоплен богатый опыт эксплуатации и технического надзора за судами ледового плавания и ледоколами в этом регионе, однако, зачастую развитие новых технологических возможностей судостроительной промышленности опережает совершенствование соответствующих нормативных документов. Российским морским регистром судоходства (РС) при участии ведущих научно-исследовательских предприятий отрасли постоянно ведется работа, направленная на модернизацию действующих Правил РС. Это реализовано во многих научно-исследовательских разработках, в числе которых выполненная АО «ЦНИИМФ» НИР по теме «Подготовка предложений для корректировки нормативных документов РС по техническому обоснованию возможности применения сварных штевней на ледоколах и судах ледовых классов Arc5 – Arc9» [1], [2]. Актуальность данной темы обусловлена тем, что согласно действующим требованиям Правил классификации и постройки морских судов РС [3], на ледоколах и судах с ледовыми классами Arc5 – Arc9 форштевень и ахтерштевень должны быть выполнены из кованой или литой стали. Вместе с тем применение сварных конструкций из катаных листов технологически и экономически более целесообразно, что нашло отражение в ряде новых проектов.

Оценка прочности сварного форштевня

Работа [1] и [2] выполнялась в два этапа с мая по октябрь 2016 г. На первом этапе НИР был выполнен анализ требований ведущих иностранных классификационных обществ — членов МАКО (ИКО), предъявляемых к сварным штевням арктических судов и ледоколов, который показал, что в правилах ИКО [4] – [7] отсутствует запрет на применение сварных штевней для арктических судов, а правила LR, BV и DNV-GL разрешают использование сварных штевней на ледоколах. Анализ современных технологий сварочного производства показал, что свойства конструкционных и сварочных материалов, допускаемых РС для изготовления арктических судов, соответствуют требованиям, предъявляемым к штевням. Исходя из технологических возможностей сварочного производства, а также из существующего опыта применения сварных штевней на судах ледового плавания и ледоколах, был сделан вывод о том, что массивная и геометрически сложная конструкция ахтерштевня крупных судов и ледоколов по-прежнему может быть выполнена только в литом исполнении, в то время как форштевень таких судов технологически может быть изготовлен из свариваемых катаных листов. Конструктивно такой форштевень может быть изготовлен двумя способами: с острыми кромками — из прямых катаных листов, или скругленной формы — из профилированных (гнутых) листов (рис. 1).

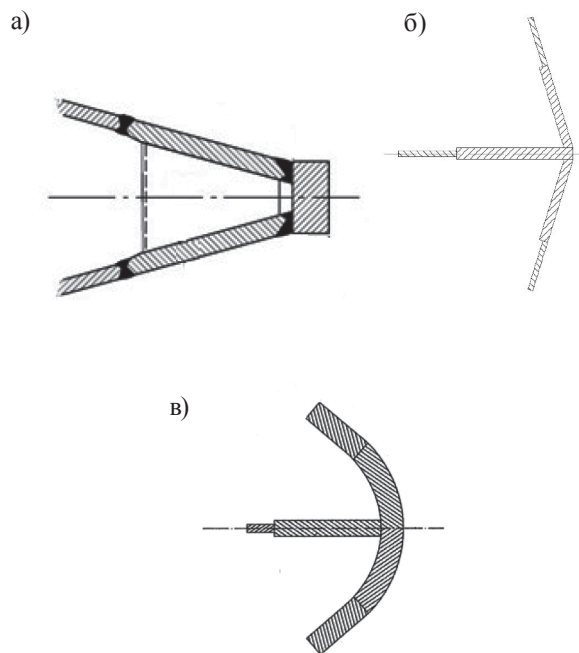


Рис. 1. Сварной форштевень: а — брусковый сварной форштевень с острыми кромками;
б — листовой сварной форштевень с острыми кромками;
в — листовой сварной форштевень с профилированным листом

Для трех проектов ледокола и судов ледового плавания выполнен анализ конструкции и прочности форштевня, который показал, что прочность форштевня обеспечивается применением высокопрочной стали, конструктивным оформлением и размерами его элементов: толщиной наружной обшивки, площадью и моментом сопротивления поперечного сечения форштевня. Предложена методика сравнительного расчета прочности конструкций литого и аналогичного сварного штевней (рис. 2), основанная на положении, что при соблюдении всех технологических требований к процессу сварки и проверке качества сварки в установленном требованиями Правил [3] порядке сварная конструкция получается равнопрочной, аналогичной литой, а различия таких конструкций заключаются только в их геометрии. Для верификации этой методики в рамках второго этапа был выполнен сравнительный расчет прочности литого и сварного форштевня в составе носовой оконечности ледокола «Капитан Драницын» с использованием метода конечных элементов (МКЭ). Расчет выполнялся в лицензионном программном комплексе ANSYS Mechanical, сертифицированном РС для расчетов конструкций на прочность в рамках линейной теории упругости. Согласно проекту, форштевень ледокола представляет собой стальную отливку, имеющую неизменное поперечное сечение в районе переменных ватерлиний (рис. 2, а). Для этого поперечного сечения был подобран аналог, который может быть выполнен из сваренных катаных листов (рис. 2, б). Сравнение геометрических характеристик поперечных сечений двух форштевней приведено в таблице.

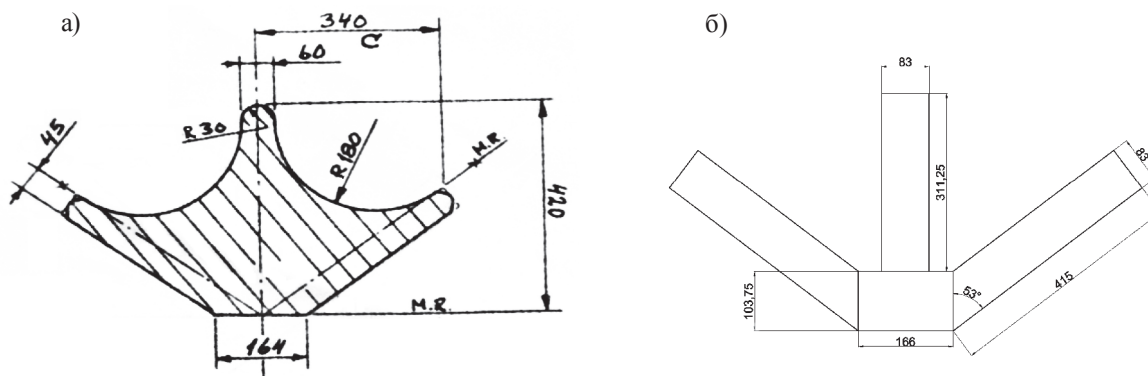


Рис. 2. Сечения литого (а) и сварного (б) форштевней

Геометрические характеристики поперечных сечений форштевней

Параметр	Обозначение, размерность	Литой	Сварной	Отношение (3) / (4)	Правила РС	Отношение	
						(3) / (6)	(4) / (6)
Площадь поперечного сечения	$S, \text{см}^2$	1150	1066	1,08	1054	1,09	1,01
Момент инерции	$J_{xx}, \text{см}^4$	83809	99435	0,84	—	—	—
Центр тяжести	$CGy, \text{см}$	15,65	17,03	0,92	—	—	—
Момент сопротивления	$W = (J_{xx} / CGy), \text{см}^3$	5355	5837	0,92	5424	0,99	1,08
Толщина листа	$s, \text{мм}$	—	83,00	—	41,50	2,00	—

В состав конечно-элементных 3D-моделей исследуемого объекта были включены конструкции от форштевня до поперечной переборки на 130 шп. — по длине, и от основной плоскости до главной палубы — по высоте (рис. 3). Конструкции форштевней (рис. 4) представлена объемными телами (Solid body), для сварного форштевня выделены отдельные тела, представляющие собой сварные швы, наружная обшивка, основной и рамный набор, платформы, палубы и переборки — двумерными оболочечными телами (Surface body).

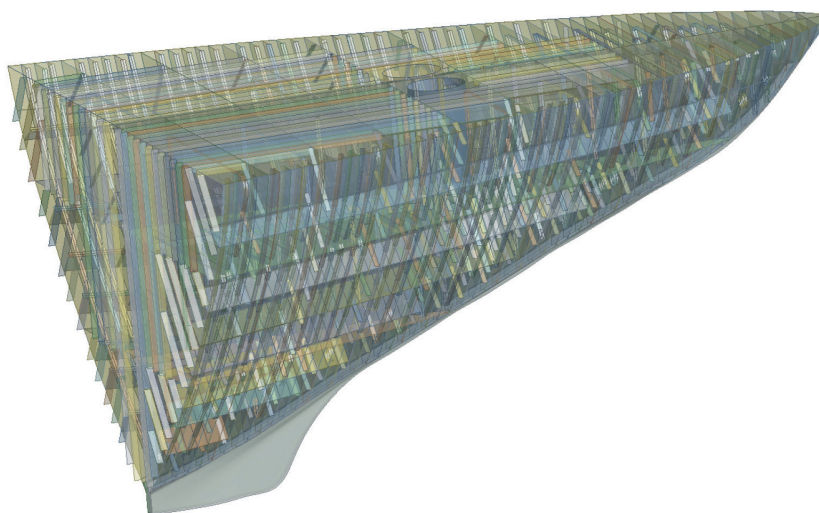


Рис. 3. Общий вид модели (в режиме прозрачности)

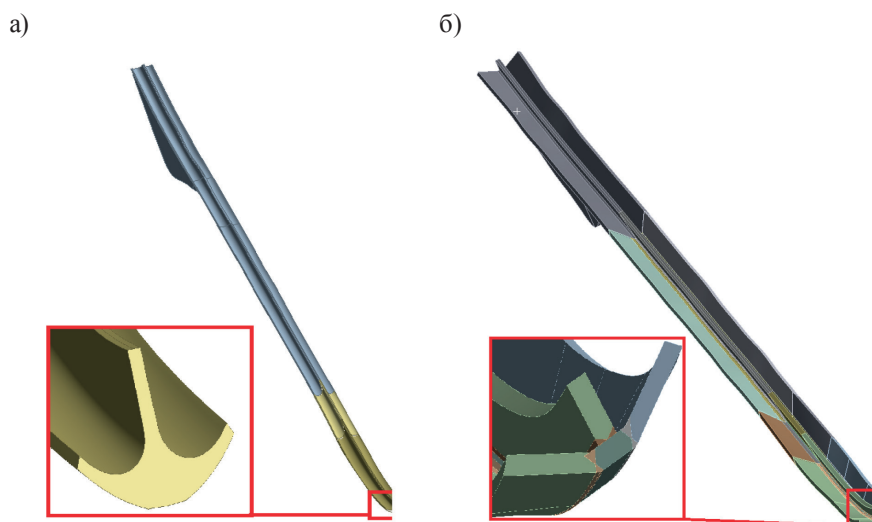


Рис. 4. Модели литого (а) и сварного (б) форштевней

В настоящее время ведется множество исследований, направленных на уточнение способов определения ледовых нагрузок, действующих на плавучие и стационарные морские сооружения, а также описывающих характер взаимодействия таких объектов с ледяными образованиями. Однако ввиду неоднозначности результатов этих исследований и относительной сложности предлагаемых расчетных методик в действующих Правилах РС отсутствуют рекомендации по назначению параметров ледовых нагрузок для прямых расчетов и оценки их результатов. Учитывая, что численные методы, в том числе МКЭ, находят все более широкое применение в проектировании и обосновании различных конструктивных решений, стоит полагать, что в ближайшем будущем эта проблема может быть решена. На данном этапе, ввиду того, что основная цель исследования — сравнительная (по сравнению с литым вариантом) оценка прочности сварного форштевня в контексте Правил РС, в расчете были приняты параметры ледового давления, определенные в соответствии с гл. 3.10 ч. II «Корпус» [3]. Для ледового класса Icebreaker 7, соответствующей построечной категории ледовых усилений LL3, это:

- интенсивность давления $p = 6169$ кПа;
- высота распределения $b = 0,758$ м;
- длина распределения $l_{\text{н}} = 8,344$ м.

Давление приложено по нормали к наружной обшивке на уровне действующей ватерлинии — 8,50 м от основной плоскости. По длине поле давлений распространяется от передней кромки форштевня в корму на 8,34 м симметрично для правого и левого бортов. Модель жестко закреплена по плоскости переборки на 130 шп. Схема приложения нагрузки и закрепления модели представлена на рис. 5.

A: Model, Static Structural
Pressure
Time: 1, s
14.09.2016 11:39
A Pressure: 6,169 MPa
B Fixed Support

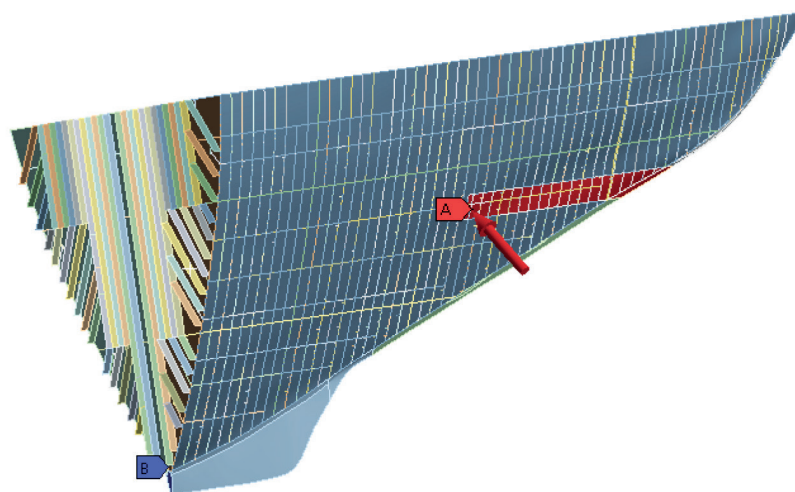


Рис. 5. Закрепление модели и схема приложения нагрузки

В результате расчета было определено, что характер распределения действующих эквивалентных напряжений по Мизесу в обеих моделях идентичен, численные значения напряжений составляют величины одного порядка (рис. 6 – 9) и в общем случае не превышают предел текучести материала ($R_{eH} = 235$ МПа), что позволило сделать вывод об обеспечении требуемого запаса прочности при эквивалентной замене литого форштевня сварной конструкцией. Исключение в характере и значениях действующих напряжений на кромке сварного форштевня (рис. 9) обусловлено сопряжением двух типов тел с сильно отличающимися толщинами: твердого тела Solid body толщиной 83 мм (лист форштевня) с оболочечным телом Surface body толщиной 45 мм (наружная обшивка), что в соответствии с требованиями п. 1.7 ч. II «Корпус» [3] в реальной конструкции невозможно.

A: Model Static Structural
Equivalent Stress
Type: Equivalent (von-Mises) Stress - Top/Bottom
Unit: MPa
Time: 1
26.09.2016 13:05

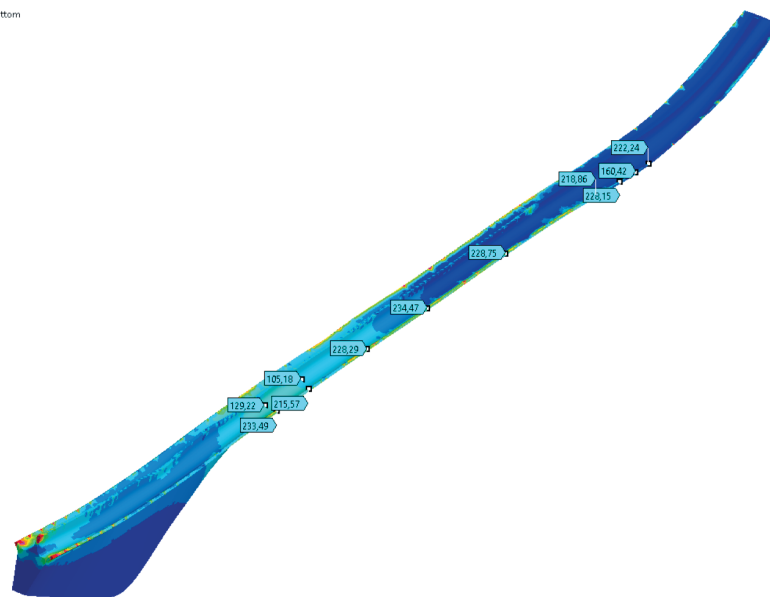


Рис. 6. Напряжения в литом формовке

A: Model Static Structural
Equivalent Stress
Type: Equivalent (von-Mises) Stress - Top/Bottom
Unit: MPa
Time: 1
13.10.2016 13:24

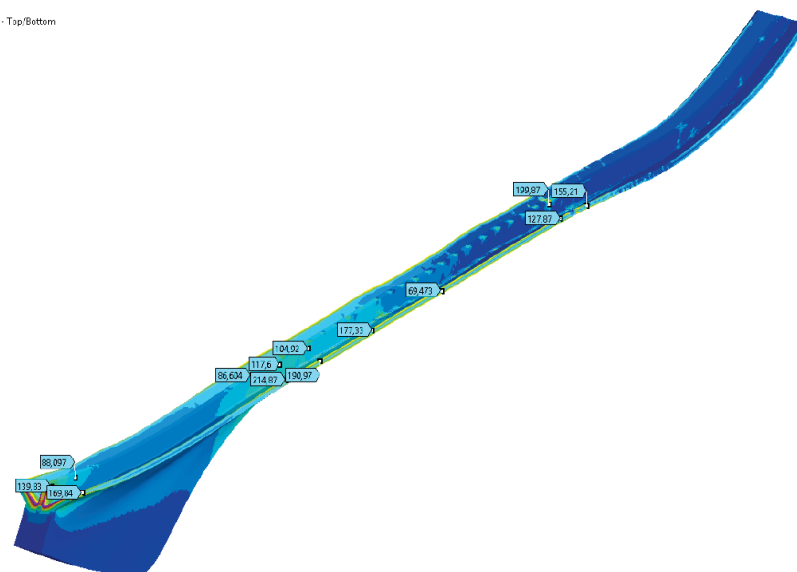
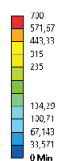


Рис. 7. Напряжения в сварном формовке

A: Model Static Structural
Equivalent Stress
Type: Equivalent (von-Mises) Stress - Top/Bottom
Unit: MPa
Time: 1
26.09.2016 14:05

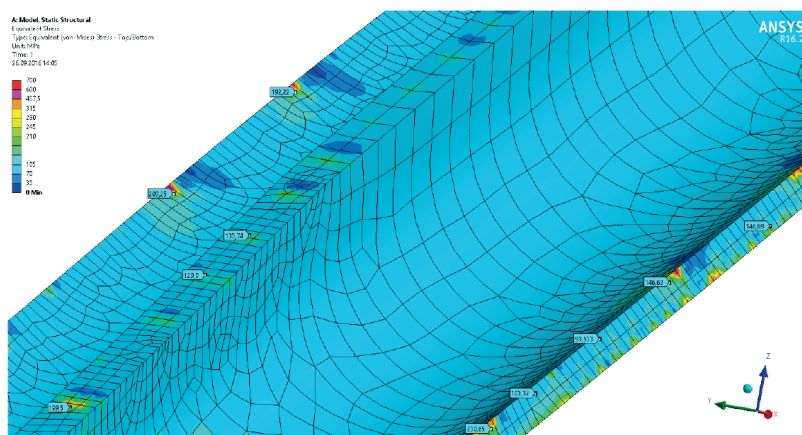
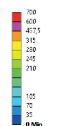


Рис. 8. Напряжения в литом формовке

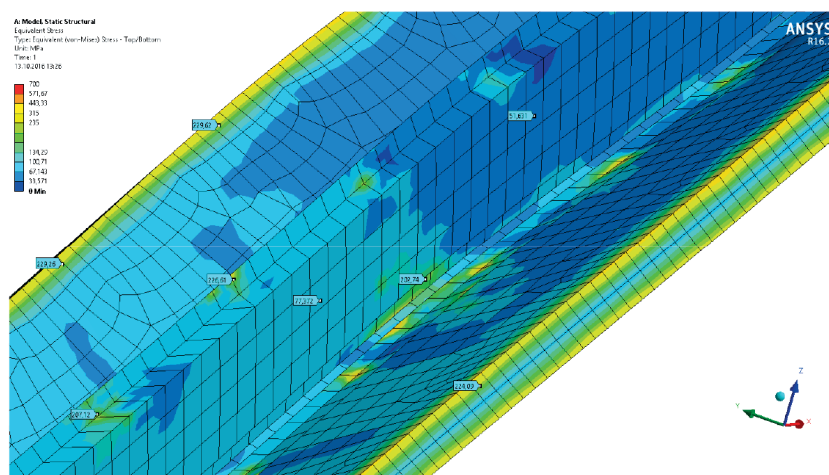


Рис. 9. Напряжения в сварном форштевне

В результате работы были сформулированы предложения по корректировке действующих Правил РС, главным из которых является допущение применения сварных форштевней на судах ледовых классов Arc5 – Arc7, в дополнение к уже разрешенным классам Ice1 – Arc4, а также разработка требований к таким конструкциям. Как было отмечено в ходе рассмотрения результатов работы на секции «Прочность и конструкция корпусов морских судов и плавучих сооружений» Научно-технического совета РС, прошедшей 23.11.2016 г., для распространения этого допущения на ледоколы и суда ледовых классов Arc8 и Arc9, отличающиеся более жесткими эксплуатационными условиями, необходим анализ опыта эксплуатации судов ледовых классов Arc5 – Arc7, а также проведение модельных и / или полунатурных испытаний.

Испытания сварных образцов конструкций, работающих при низких температурах

Помимо геометрических и конструктивных характеристик сварного форштевня, наиболее существенное влияние на его прочность оказывают конструкционные материалы и технология их сварки. Применительно к рассматриваемым судам, важнейшая особенность сталей — наличие существенного изменения их механических свойств (вязко-хрупкого перехода) при пониженных температурах и, как следствие, возможности появления хрупких разрушений. Главные факторы, способствующие хрупкому разрушению — низкая температура и высокая жесткость напряженно-деформированного состояния, вызванная концентраторами напряжений и неизбежными дефектами, приобретаемыми при изготовлении и эксплуатации конструкций. В определенной степени такому разрушению могут способствовать также и динамические ледовые нагрузки.

Толщина стали в штевнях может достигать 100 мм и более, что требует учета масштабного фактора при оценке результатов испытаний, полученных на образцах уменьшенных размеров.

В соответствии с Правилами РС [3] суда, удовлетворяющие требованиям к длительной эксплуатации при низких климатических температурах, могут получить к основному символу класса дополнительный знак WINTERIZATION(DAT), где в скобках указывается расчетная внешняя температура, обычно определяемая как минимальная суточная температура, достигаемая за пятилетний период. Например, DAT должна быть не выше минус 40 °C для ледоколов классов Icebreaker 7 – Icebreaker 9 и судов ледового плавания классов Arc7 – Arc9 [3]. Правила РС предусматривают для таких конструкций применение соответствующих марок стали с верхним индексом «Arc» и числовым значением DAT в градусах Цельсия. Такие стали могут применяться до указанной температуры без ограничений, в том числе для конструкционных элементов форштевней, подвергаемых динамическим ледовым нагрузкам. Данная практика поддерживается россий-

ской системой сертификации материалов, включающей несколько видов испытаний на хладостойкость в соответствии с требованиями Регистра.

Полный объем испытаний обычно включает определение химического состава, микроструктуры, стандартных свойств (включая испытания на растяжение в полной толщине), а также специальные испытания по определению применимости стали по хладостойкости (испытания по определению критических температур вязко-хрупкого перехода) [8]. Российская практика сертификации предусматривает следующие виды испытаний для проверки хладостойкости стали:

- общепринятое построение зависимостей работы, затрачиваемой на ударное разрушение образцов Шарпи, от температуры;

- испытания на вязкость разрушения при нескольких температурах для определения температурного диапазона, в котором удовлетворяются требования по критическому раскрытию трещины в ее вершине (оценка характеристики трещиностойкости материала CTOD);

- определение температуры нулевой пластичности (NDT) по стандарту ASTM E 208 [9], т. е. максимальной температуры, при которой стандартные образцы хрупко разрушаются при ударном трехточечном изгибе;

- определение температуры вязко-хрупкого перехода $T_{кб}$ (критической температуры, определяемой на полнотолщинных образцах с надрезом), которая соответствует 70 %-й вязкой составляющей в изломе образцов, разрушенных статическим трехточечным изгибом.

Используемый в российском судостроении метод механических испытаний для определения $T_{кб}$ предназначен для проверки условий распространения и остановки трещины, а круглый надрез приводит к достижению предельной несущей способности образцов, т. е. накоплению при испытании такого количества упругой энергии, когда энергия, высвобождаемая при продвижении трещины, не зависит от условий ее страгивания. Метод был тщательно изучен для определения значимых факторов, влияющих на результаты испытаний [10]. Для обеспечения стабильности и повторяемости результатов испытаний предусмотрена градация размеров образца и строгая регламентация условий нагружения. Принятая процедура испытаний для определения $T_{кб}$ описана в Правилах РС [3]. Хотя этот вид испытаний в большинстве случаев дает наиболее консервативную оценку хладостойкости металла листового проката, он, все же, не может заменять другие виды испытаний при сертификации.

Наибольшие трудности обычно возникают при выполнении нормативных требований к трещиностойкости сварных соединений. В качестве основной характеристики этого качества, регламентируемой Правилами РС [3], рассматривается критическое значение параметра раскрытия в вершине трещины (δ_{cr}) металла сварных соединений. Требуемые критические значения CTOD представлены в Правилах в табличном виде. Они приблизительно соответствуют следствию из условия прочности сварной конструкции по критерию хрупкого разрушения [12]:

$$\delta_{cr} \geq (1,3 - 1,4) \sigma_T s_{\max} / E, \quad (1)$$

где $s_{\max}$ — максимальная толщина конструктивного элемента; σ_T — предел текучести; E — модуль упругости.

Правилами РС предусматривается проведение испытаний по методам механики разрушения с использованием образцов типов SENB (single edge notch bend) и CT (compact tension), включенных в известные стандарты [11] – [13]. Тип SENB [11], [12] соответствует типу 4, тип CT — типу 3 по ГОСТ 25.506-85 [13]. Толщина образца должна быть по возможности приближена к максимальной толщине проката, изготавливаемого по одобренной Регистром технологии для производства Arc-сталей, или к максимальной толщине элементов конструкции, свариваемых с применением технологических процессов сварки, одобренных Регистром. Температура испытаний должна соответствовать минимальной (расчетной) температуре эксплуатации конструкции. Для районов Арктики это — минус 40 °С и ниже. Испытания листового проката «на свариваемость» проводятся для металла зоны термического влияния (ЗТВ) при расположении исходного фронта трещины в отдельных «целевых структурах», сварка осуществляется по разделке с одной прямой кромкой.

Наиболее низкие результаты обычно регистрируются для крупнозернистой составляющей зоны термического влияния у границы сплавления [14]. При квалификации сварочных процедур исходный фронт трещины располагается по оси симметрии стыкового шва. В обоих случаях плоскость надреза перпендикулярна поверхности, направление распространения разрушения — вдоль направления сварки.

Согласно [3], с требуемым значением должна сопоставляться средняя величина δ_{cr} , при этом минимальное значение должно быть не менее 0,5 от среднего. При невыполнении какого-либо из этих условий минимально необходимый объем испытаний (три корректных значения CTOD) может быть увеличен до пяти и более, что дает возможность отбросить один минимальный результат.

Оцениваемая таким образом трещиностойкость металла сварных соединений низколегированных сталей, выполненных с применением сварочных материалов, соответствующих наиболее жестким требованиям по хладостойкости, часто оказывается неудовлетворительной. Результаты определения параметра трещиностойкости CTOD при температуре минус 40 °C и ниже в толщинах более 30 мм часто не удовлетворяют требованиям Правил РС.

Аналогичные результаты и выводы получены зарубежными исследователями, анализирующими применимость материалов в условиях Арктики. В ряде работ (например, [15]) отмечается, что существующие редакции стандартов Norsok M 101, ISO 19902, ISO 19904-1, регламентирующих строительство конструкций океанотехники, фактически не распространяются на низкие температуры (ниже минус 30 °C). Для оценки возможности применения существующих в них критериев по CTOD (близких к указываемым в Правилах РС) при низких температурах проводились обширные исследования трещиностойкости металла сварных соединений, выполненных по принятым для офшорных конструкций технологиям. Авторы ряда публикаций, представленных в материалах ежегодной международной конференции ISOPE (International Society of Offshore and Polar Engineers) [15], [16] и др., приходят к тем же выводам: при температуре испытаний стандартных образцов типа SENB натурной толщины ниже минус 40 °C для металла крупнозернистой зоны термического влияния и металла сварного шва низколегированных сталей характерно экстремальное рассеяние данных по CTOD с высокой вероятностью получения неприемлемо низкой трещиностойкости.

В этой связи одним из основных направлений зарубежных исследований, направленных на разработку требований к трещиностойкости сварных соединений, стал анализ корректности применяемых методик испытаний. При таком анализе пытаются удостовериться, в том что величины, получаемые при стандартных испытаниях на трещиностойкость образцов SENB натурной толщины, не являются чрезмерно консервативными.

Несмотря на всю сложность методической стороны экспериментальной оценки трещиностойкости, существующие требования Правил РС [3] применительно к сварным конструкциям штевной должны выполняться, хотя дальнейшие исследования этого вопроса могут привести к корректировке норм трещиностойкости.

Выводы

1. В результате исследования установлено, что в настоящее время, ввиду технологических и научно-экспериментальных достижений в сварочном производстве, а также эксплуатационных особенностей, сварными могут быть форштевни на судах ледовых классов Ice1 – Arc7, что нашло отражение в предложениях по корректировке действующих Правил РС.

2. Сформулированные предложения научно обоснованы и имеют ряд технологических и экономических преимуществ; эти предложения одобрены Научно-техническим советом РС и используются в ряде новых проектов судов.

3. Для более широкого применения сварных конструкций на судах высоких арктических классов и ледоколах необходимо проведение серии модельных и / или полунатурных испытаний в разных температурных условиях.

4. Особое внимание при использовании толстостенных сварных штевней необходимо уделять обеспечению хладостойкости зон сварных швов и термического влияния и точному выполнению всех соответствующих нормативов по трещиностойкости, изложенных в [2].

5. При невозможности строгого выдерживания этих нормативов и эксплуатации судов при температуре порядка минус 40 °С и ниже необходимы дополнительные обоснования для отступления от них путем проведения соответствующих расчетных и экспериментальных работ.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Маркозов Г. В. Подготовка предложений для корректировки нормативных документов РС по техническому обоснованию возможности применения сварных штевней на ледоколах и судах ледовых классов Arc5 – Arc9: промежуточный отчет о НИР. — № Гос. рег. АААА-А16116061710099-5. — Инв. № 8542 (НТБ АО «ЦНИИМФ»). — СПб.: АО «ЦНИИМФ», 2016. — 83 с.

2. Маркозов Г. В. Подготовка предложений для корректировки нормативных документов РС по техническому обоснованию возможности применения сварных штевней на ледоколах и судах ледовых классов Arc5 – Arc9: окончательный отчет о НИР. — № Гос. рег. АААА-А16116061710099-5. — Инв. № 8543 (НТБ АО «ЦНИИМФ»). — СПб.: АО «ЦНИИМФ», 2016. — 102 с.

3. Правила классификации и постройки морских судов: в 3 т. — СПб.: Российский морской регистр судоходства, 2015. — Т. 1. — 580 с.

4. Rules and Regulations for the Classification of Ships. — Lloyd's Register Group Limited, 2016. — 1658 p.

5. Rules for the Classification of POLAR Class and Icebreaker Ships. — Bureau Veritas, 2013. — 38 p.

6. Rules for Building and Classing - Steel Vessels. — Houston, USA: American Bureau of Shipping, 2016. — 301 p.

7. Rules for Classification DNVGL-RU-0050. General regulations. — DNV GL AS, 2016. — 29 p.

8. Башаев В. К. Об определении хладостойкости современных высокопрочных сталей для арктических конструкций / В. К. Башаев, А. В. Ильин, В. Ю. Филин, М. А. Гусев // Научно-технический сборник Российского морского регистра судоходства. — 2015. — № 38–39. — С. 74–79.

9. ASTM E208-06 (2012). Standard Test Method for Conducting Drop-Weight Test to Determine Nil-Ductility Transition Temperature of Ferritic Steels. — West Conshohocken, PA: ASTM International, 2012. — 14 p. DOI: 10.1520/E0208-06R12.

10. Данилов Г. И. К проблеме оценки хладостойкости листов из сталей натурной толщины по температуре вязкохрупкого перехода $T_{\text{кв}}$ / Г. И. Данилов, А. В. Ильин, В. П. Леонов, Т. А. Фёдорова // Вопросы материаловедения. — 2005. — № 1. — С. 69–78.

11. ASTM E 399-09. Standard Test Method for Plain-Strain Fracture Toughness of Metallic Materials. — West Conshohocken, PA: ASTM International, 2009. — 31 p. DOI: 10.1520/E0399-09.

12. BS 7448-1: 1991. Fracture Mechanics Toughness Test. Part 1. Method for determination of K_{Ic} , critical CTOD and critical J values of metallic materials. — BSI, 1991. — 48 p.

13. ГОСТ 25.506-85. Методы механических испытаний металлов. Определение характеристик трещиностойкости (вязкости разрушения) при статическом нагружении. — М.: Изд-во стандартов, 1985. — 18 с.

14. Виноградов О. П. Научно-методические вопросы аттестационных испытаний на трещиностойкость структурно-неоднородного металла сварных соединений / О. П. Виноградов, А. В. Ильин, В. Ю. Филин // Вопросы материаловедения. — 2004. — № 1. — С. 75–89.

15. Horn A. M. Material Challenges for Arctic Offshore Applications, a Reliability Study of Fracture of a Welded Steel Plate Based on Material Toughness Data at -60°C / A.M. Horn, M. Hauge // The Twenty-first International Offshore and Polar Engineering Conference. — International Society of Offshore and Polar Engineers, 2011.

16. Hauge M. Arctic offshore materials and platform winterization / M. Hauge // The Twenty-second International Offshore and Polar Engineering Conference. — International Society of Offshore and Polar Engineers, 2012.

REFERENCES

1. Markozov, G. V. *Podgotovka predlozhenii dlya korrektyrovki normativnykh dokumentov RS po tekhnicheskomu obosnovaniyu vozmozhnosti primeneniya svarnykh shtevnei na ledokolakh i sudakh ledovykh klassov Arc5-Arc9*. Preliminary research report. № Gos. reg. АААА-А16116061710099-5. Inv. № 8542 (NTB AO «TsNIIMF»). SPb.: AO «TsNIIMF», 2016.

2. Markozov, G. V. *Podgotovka predlozhenii dlya korrektyrovki normativnykh dokumentov RS po tekhnicheskomu obosnovaniyu vozmozhnosti primeneniya svarnykh shtevnei na ledokolakh i sudakh ledovykh klassov Arc5-Arc9*. Final research report. № Gos. reg. AAAA-A16116061710099-5. Inv. № 8543 (NTB AO «TsNIIMF»). SPb.: AO «TsNIIMF», 2016.
3. *Pravila klassifikatsii i postroiki morskikh sudov: v 3 t.* SPb.: Rossiiskii morskoi registr sudokhodstva, 2015. Vol. 1.
4. *Rules and Regulations for the Classification of Ships*. Lloyd's Register Group Limited, 2016.
5. *Rules for the Classification of POLAR Class and Icebreaker Ships*. Bureau Veritas, 2013.
6. *Rules for Building and Classing - Steel Vessels*. Houston, USA: American Bureau of Shipping, 2016.
7. *Rules for Classification DNVGL-RU-0050. General regulations*. DNV GL AS, 2016.
8. Bashaev, V. K., A. V. Il'in, V. Yu. Filin, and M. A. Gusev. "Ob opredelenii khladoistoikosti sovremennykh vysokoprochnykh stalei dlya arkticheskikh konstruktssii." *Nauchno-tekhnicheskii sbornik Rossiiskogo morskogo registra sudokhodstva* 38-39 (2015): 74–79.
9. *ASTM E208-06 (2012). Standard Test Method for Conducting Drop-Weight Test to Determine Nil-Ductility Transition Temperature of Ferritic Steels*. West Conshohocken, PA: ASTM International, 2012. DOI: 10.1520/E0208-06R12.
10. Danilov, G. I., A. V. Ilyin, V. P. Leonov, and T. A. Fedorova. "Regarding problem of coldresistance of steels having natural thickness under temperature of elastic-brittle transition $T_{\kappa 6}$." *Voprosy materialovedeniya* 1 (2005): 69–78.
11. *ASTM E 399 - 09. Standard Test Method for Plain-Strain Fracture Toughness of Metallic Materials*. West Conshohocken, PA: ASTM International, 2009. DOI: 10.1520/E0399-09.
12. *BS 7448-1: 1991. Fracture Mechanics Toughness Test. Part 1. Method for determination of K_{Ic} , critical CTOD and critical J values of metallic materials*. BSI, 1991.
13. Russian Federation. State Standard 25.506-85. *Metody mekhanicheskikh ispytaniy metallov. Opredelenie kharakteristik treshchinostoikosti (vyazkosti razrusheniya) pri staticheskom nagruzhении*. Vved. 1986-01-01. M.: Izd-vo standartov, 1985.
14. Vinogradov, O. P., A. V. Ilyin, and V. Yu. Filin. "Scientific and methodical problems of fracture toughness certification for of the welded joint structurally heterogeneous metal." *Voprosy materialovedeniya* 1 (2004): 75–89.
15. Horn, Agnes Marie, and Mons Hauge. "Material challenges for arctic offshore applications, a reliability study of fracture of a welded steel plate based on material toughness data at -60 C." *The Twenty-first International Offshore and Polar Engineering Conference*. International Society of Offshore and Polar Engineers, 2011.
16. Hauge, Mons. "Arctic offshore materials and platform winterisation." *The Twenty-second International Offshore and Polar Engineering Conference*. International Society of Offshore and Polar Engineers, 2012.

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

Крыжевич Геннадий Брониславович — доктор технических наук, профессор
ФГУП «Крыловский государственный научный центр»
196158, Российская Федерация, Санкт-Петербург, Московское шоссе 44
e-mail: G_Kryzhevich@ksrc.ru
Петров Алексей Анатольевич — соискатель
Научный руководитель:
Крыжевич Геннадий Брониславович
АО «Центральный научно-исследовательский и проектно-конструкторский институт морского флота»
191015, Российская Федерация, Санкт-Петербург, Кавалергардская ул. 6, лит. А.
e-mail: alpetrov.ru@gmail.com

INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Kryzhevich, Gennadiy B. — Dr. of Technical Sciences, professor
Krylov State Research Centre
44 Moskovskoe Shosse, St. Petersburg, 196158, Russian Federation
e-mail: G_Kryzhevich@ksrc.ru
Petrov, Alexey A. — Applicant
Supervisor:
Kryzhevich Gennadiy B.
Central Marine Research & Design Institute
6A Kavalergardskaya Str., St. Petersburg, 191015, Russian Federation
e-mail: alpetrov.ru@gmail.com

Статья поступила в редакцию 9 января 2017 г.
Received: January 9, 2017.

DOI: 10.21821/2309-5180-2017-9-1-143-156

DEVELOPMENT OF HIGH-EFFICIENT LASER WELDING AND CLADDING TECHNOLOGIES FOR THE CURRENT SHIPBUILDING

V. V. Veselkov¹, N. A. Afanasev^{1, 2}, A. G. Zhmurenkov^{1, 2}

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

² JSC "Shipbuilding & Shiprepair Technology Center",
St. Petersburg, Russian Federation.

Analysis of marine diesel engines shows, that high-loaded parts, uses in their constructions (pistons, valves, valve lands) and in constructions of coolers (tube plates of heat exchangers), can break before the planning engine overhaul. For this purpose, it is necessary to withdrawal these constructions for repairing high-loaded parts and as result is a financial loss. JSC SSTC engineers set the tasks for the development of high-efficient technologies based on the production tasks for quality development of engine and related systems. One of the ways of solving these tasks was the laser technologies application. Main advantages of laser technologies comparing to conventional arc techniques are high processing speed, minimal heat affected zone, low requirement of welding consumables and practical absence of welding deformations, which considerably reduced due to low heat input (several times less, than with conventional arc method). Although laser technologies are a complicated multi-parameter process, their massive implementation is one of the ways to improve quality in shipbuilding and heavy engineering production. The article describes the experience of Laser Shipbuilding Centre in technological development of tube plates laser welding and engines valves laser cladding, and in particular divulges: equipment's capabilities, specifics and principles of operation; the procedure of technologies development; technological innovations allow to reach a solution of the tasks; the effects of technological parameters on the features of the processes; results of the researches.

Keywords: laser welding, laser cladding, shipbuilding, marine engineering, heat exchanger, tube plate.

For citation:

Veselkov, Vyacheslav V., Nikolay A. Afanasev, and Artem G. Zhmurenkov. "Development of high-efficient laser welding and cladding technologies for the current shipbuilding." *Vestnik Gosudarstvennogo universiteta morskogo i rechnogo flota imeni admiral S.O. Makarova* 9.1 (2017): 143–156. DOI: 10.21821/2309-5180-2017-9-1-143-156.

УДК 621.791

РАЗРАБОТКА ВЫСОКОПРОИЗВОДИТЕЛЬНЫХ ТЕХНОЛОГИЙ ЛАЗЕРНОЙ СВАРКИ И НАПЛАВКИ ДЛЯ СОВРЕМЕННОГО СУДОСТРОЕНИЯ

В. В. Веселков¹, Н. А. Афанасьев^{1, 2}, А. Г. Жмуренков^{1, 2}

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

² АО «Центр технологии судостроения и судоремонта»,
Санкт-Петербург, Российская Федерация.

Анализ использования судовых дизельных двигателей показывает, что многие машиностроительные элементы, применяемые в их конструкции (поршни, клапаны, седла клапанов и т. п.) и конструкции элементов охлаждения (трубные решетки теплообменных аппаратов) зачастую выходят из строя до запланированного капитального ремонта. Возникает необходимость их вывода из эксплуатации, что приводит к значительным финансовым потерям. Для обеспечения необходимых показателей работоспособности элементов двигателей и сопутствующих систем специалистам АО «ЦТСС» была поставлена задача по разработке высокопроизводительных и эффективных технологий их изготовления, исходя из конкретных задач производства. Одним из путей решения поставленной задачи стало применение лазерных технологий, отличающихся от традиционных более высокой скоростью процесса, минимальными тепловыми вложениями в обрабатываемое изделие, минимальным расходом присадочных материалов и практически полным отсутствием термических деформаций, которые сокращены благодаря низким значениям погонной

энергии процесса (в несколько раз меньше, чем при сварке традиционными дуговыми способами). Несмотря на то, что лазерные технологии являются сложными многопараметрическими процессами, их комплексное применение является одним из путей повышения качества судостроительной и машиностроительной продукции. В статье описан опыт сотрудников «Лазерного центра судостроения» в отработке технологий лазерной сварки трубных решеток и наплавки клапанов судовых двигателей и, в частности, отражены: принципы работы, возможности и особенности применяемого оборудования; последовательность действий при отработке технологий; технологические аспекты, позволяющие достичь решения поставленной задачи; влияние различных параметров на технологические особенности процессов; результаты проведенных исследований.

Ключевые слова: лазерная сварка, лазерная наплавка, судостроение, судовое машиностроение, теплообменный аппарат, трубная решетка.

Для цитирования:

Веселков В. В. Разработка высокопроизводительных технологий лазерной сварки и наплавки для современного судостроения / В. В. Веселков, Н. А. Афанасьев, А. Г. Жмуренков // Вестник Государственного университета морского и речного флота имени адмирала С. О. Макарова. — 2017. — Т. 9. — № 1. — С. 143–156. DOI: 10.21821/2309-5180-2017-9-1-143-156.

Введение

Современный этап развития машиностроительной отрасли и судостроения в частности характеризуется началом внедрения на ведущих судостроительных предприятиях мира технологий, кардинально меняющих облик этой достаточно консервативной отрасли. Данные изменения обусловлены возрастающими требованиями к работоспособности и надежности изделий при сохранении их конкурентоспособной стоимости. Комплексное применение современных лазерных технологий является одним из путей повышения качества судостроительной и машиностроительной продукции и, при условии высокой степени загрузки производства, способно обеспечить стоимость, сопоставимую со стоимостью таких же изделий, изготовленных традиционными методами. Стоит отметить, что в промышленно развитых странах лазерная сварка и наплавка успешно используется уже в течение многих лет [1], [2].

Распространенной проблемой отечественного судостроения является применение технологий, не отвечающих современным требованиям к качеству готовой продукции. Ярким примером являются теплообменные аппараты типа ВХД, снабженные трубными решетками с плоскими трубками. При изготовлении данных узлов применить автоматизированные дуговые процессы весьма проблематично, поэтому для их изготовления использовалась технология пайки в печах, являющаяся наименее трудоемким способом изготовления трубных решеток. Необходимость индивидуального соединения трубки с трубной доской отсутствует, операция по изготовлению сводится к расплавлению припоя на фланце доски, фиксируя тем самым установленные с выпуском трубки. К сожалению, у данной технологии был выявлен существенный недостаток — низкая работоспособность паяных изделий в условиях интенсивных вибрационных нагрузок. Практика показала, что теплообменные аппараты типа ВХД, изготовленные методом пайки в печах, выходили из строя ранее, чем через 2000 ч работы. Ремонт вышедших из строя изделий являлся весьма трудоемким и приводил к значительным финансовым потерям. Выходом из данной ситуации стало применение на заводах-изготовителях ручной аргоно-дуговой сварки. Данная технология обеспечила требуемое качество изделий, но вследствие высокой трудоемкости процесса существенно выросло время изготовления (не менее 20 ч на сварку трубной решетки) и стоимость изделий.

Ещё одним примером применения традиционных технологий является плазменная наплавка клапанов судовых двигателей, способная обеспечить высокую твердость наплавленного слоя при сохранении пластичности основного металла, что положительно сказывается на работоспособности элемента и двигателя в целом. Основным её недостатком является деформация штока клапана вследствие высоких тепловложений и неравномерного нагрева в процессе наплавки. Зачастую пластические деформации штока настолько велики, что даже последующая механическая обработка припуска не позволяет добиться необходимых геометрических размеров, заложенных

в чертеже. В этом случае приходится применять технологии термической правки изделия, что является весьма трудоемким процессом.

С целью сокращения трудоемкости изготовления и повышения качества изделий судового машиностроения, АО «ЦТСС» была поставлена задача по разработке современных высокопроизводительных технологий лазерной сварки и наплавки.

Лазерная сварка трубных решеток теплообменных аппаратов сканирующим лучом

Отечественные предприятия, основываясь на опыте зарубежных коллег, все чаще отказываются от кожухотрубчатых теплообменных аппаратов, оснащенных трубками круглого сечения, в пользу пластинчатых или плоскотрубчатых вследствие более высокого КПД последних. Но, несмотря на более низкую энергоэффективность, на данный момент кожухотрубчатые теплообменные аппараты с трубками круглого сечения все еще занимают большую долю рынка благодаря своей надежности и простоте изготовления.

Основным технологическим процессом при изготовлении кожухотрубчатых теплообменных аппаратов является соединение трубок с трубной доской (изготовление трубной решетки). С целью реализации данной операции в автоматическом / полуавтоматическом режиме наиболее часто используется оборудование для дуговой сварки различной конфигурации — это орбитальные TIG (TIG — сварка неплавящимся электродом в среде защитного инертного газа) головки и сварочные колонны. Лидерами по производству такого рода оборудования являются такие европейские компании как *Orbitalum Tools GmbH* (Германия), *Polysoude* (Франция), *MAUS* (Италия) (рис. 1).

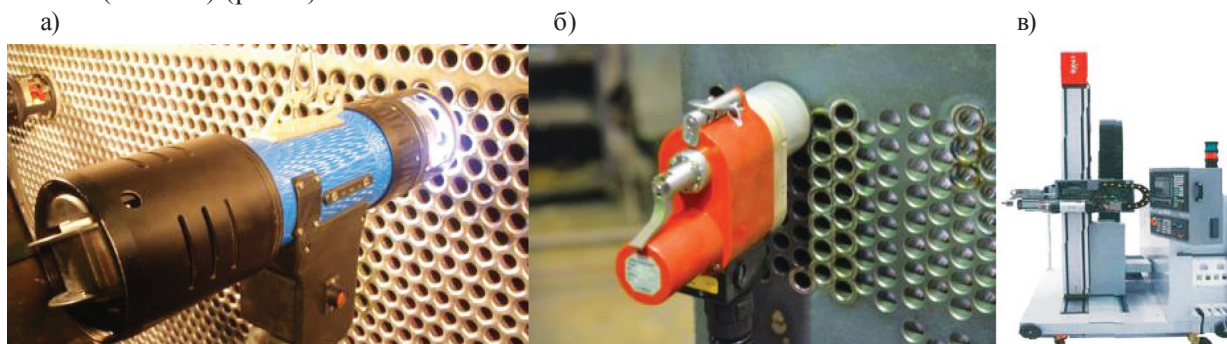


Рис. 1. Оборудование для сварки трубных решеток:

а — орбитальная головка *Orbitalum Tools GmbH* (Германия);

б — орбитальная головка *Polysoude* (Франция); в — сварочная колонна *MAUS* (Италия)

Данное оборудование позволяет производить, как правило, варку трубок только круглого сечения, при этом внутренний диаметр трубки ограничен фиксирующим центратором и не может составлять менее 6 мм. Отечественных аналогов оборудования не имеет, а основной его недостаток — отсутствие универсальности.

Помимо орбитальных головок для TIG сварки, применяются дуговые горелки в сочетании с различным механизированным оборудованием, в том числе роботизированным, при помощи которого возможна реализация технологии варки трубок различного поперечного сечения в трубную доску, но основными недостатками, как и при орбитальной TIG сварке, остаются относительно большие тепловложения, малая глубина проплавления и сложность реализации технологии сварки малых толщин.

С целью устранения проблем, возникающих при традиционных методах изготовления трубных решеток, АО «ЦТСС» совместно с ФГАОУ ВО «СПбПУ» была предложена технология роботизированной лазерной сварки, являющаяся «универсальной» — для варки трубок с различным поперечным сечением (рис. 2), а также сварки иных тонкостенных изделий.

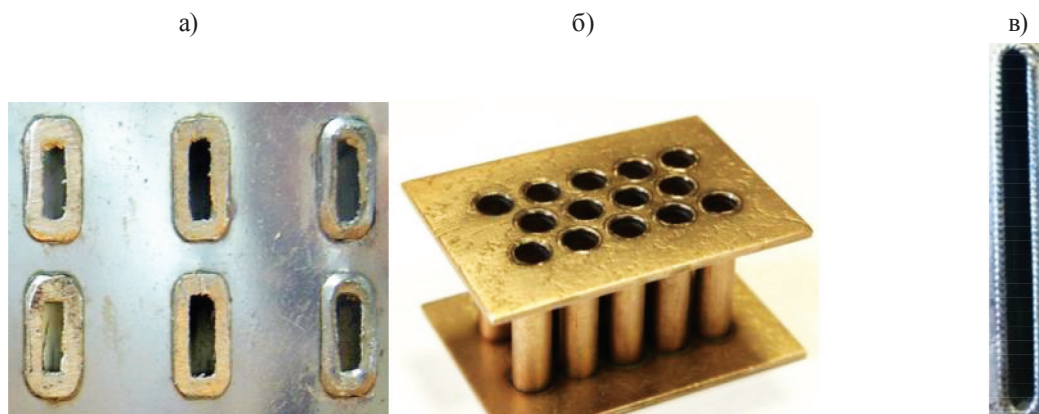


Рис. 2. Трубные решетки различной конфигурации:
а — с трубками прямоугольного сечения; б — с трубками круглого сечения; в — с плоскими трубками

На основе предложенной технологии и учитывая опыт зарубежных коллег [3] – [5] был создан опытный образец роботизированного комплекса оборудования для лазерной сварки элементов теплообменных аппаратов (рис. 3), оснащенный иттербиевым оптоволоконным лазером и высокотехнологичной оптической головкой, предназначенной не только для фокусировки лазерного излучения, но и для отклонения луча при помощи управляемых подвижных зеркал.

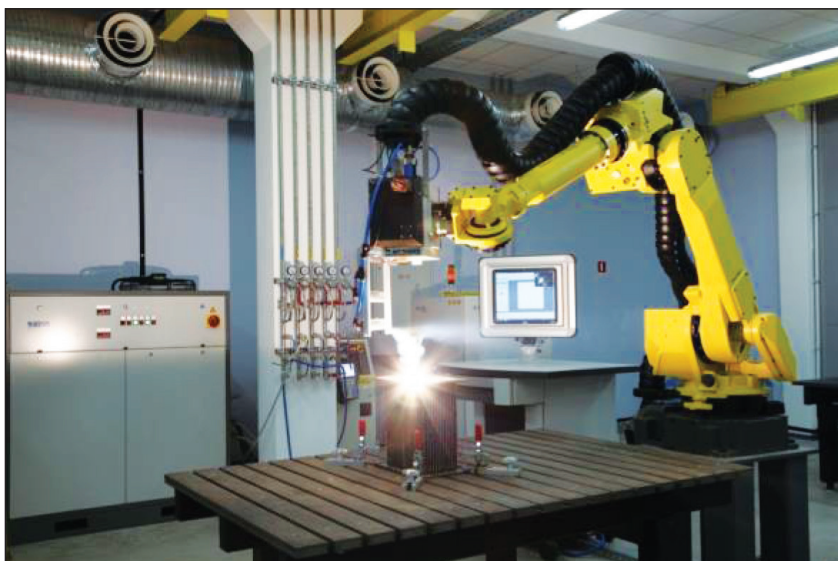


Рис. 3. Роботизированный комплекс
для лазерной сварки элементов теплообменных аппаратов

Принцип работы роботизированного комплекса при сварке трубных решеток заключается в следующем: иттербиевый волоконный лазер генерирует высококонцентрированный поток лазерного излучения (лазерный луч), передающийся по транспортному волокну к оптической головке, где он коллимируется, проходит через систему управляемых отражающих зеркал, расположенных внутри, и фокусируется на изделии. Управляемые зеркала позволяют произвести развертку луча по двум взаимно перпендикулярным осям в плоскости сварки и, соответственно, повторить контур любой сложности, ограничиваясь полем действия лазерной головки. При помощи робота, а также заложенной в комплекс оборудования программы управления имеется возможность разбить рабочую зону на несколько участков и произвести сварку каждого отдельного сегмента в заданной последовательности. Функциональная схема роботизированного комплекса для лазерной сварки представлена на рис. 4.

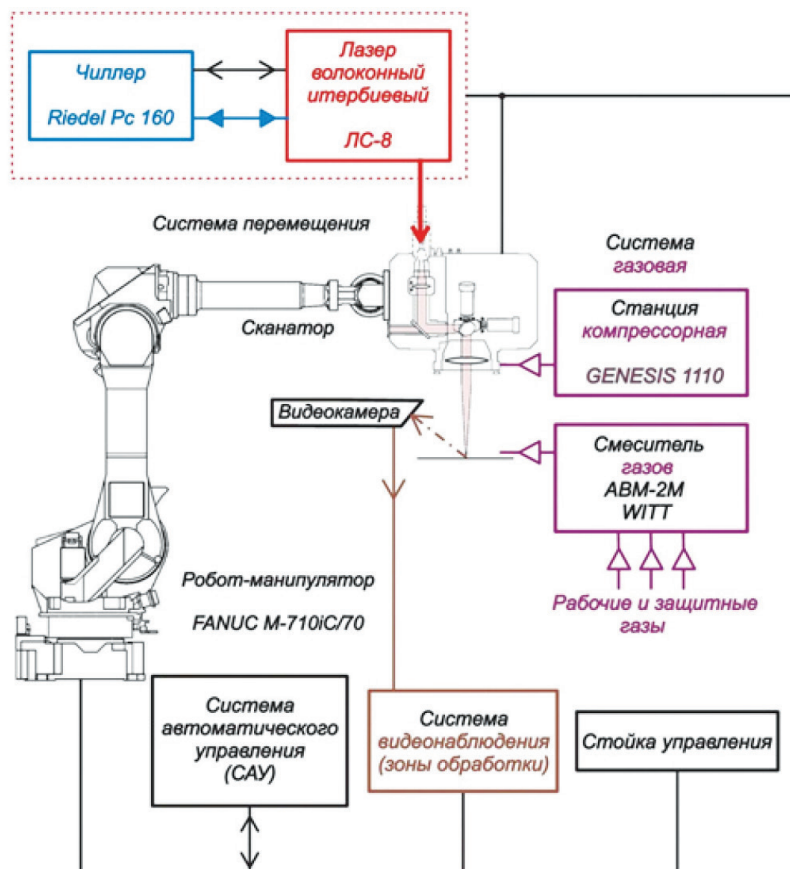


Рис. 4. Функциональная схема роботизированного комплекса для лазерной сварки трубных решеток

Благодаря тому, что траекторией движения луча по стыку управляют зеркала, нет необходимости в перемещении рабочего инструмента во время процесса сварки, что позволяет избавиться от инерционности комплекса и добиться высоких скоростей сварки.

Для апробации технологии была проведена работа по сварке макетов трубок и трубных решеток теплообменных аппаратов типа ВХД (рис. 5), применяемых для охлаждения дизельных двигателей. Работа проводилась совместно с АО «Завод «Буревестник», предоставившим материалы для отработки технологии.

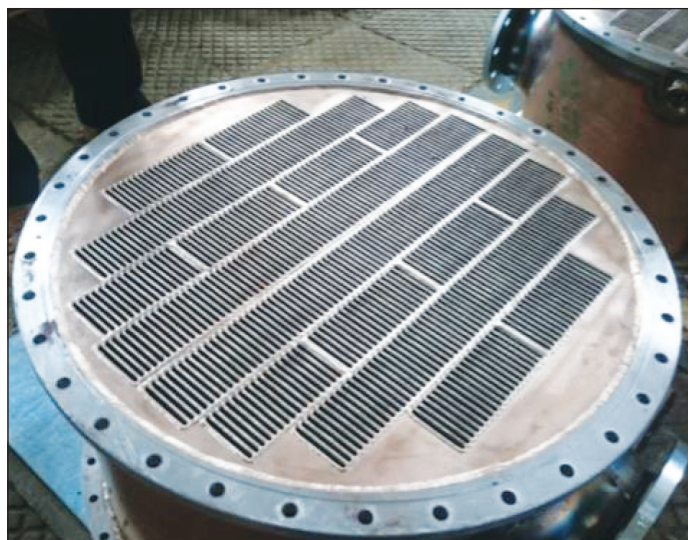


Рис. 5. Корпус теплообменного аппарата типа ВХД

При сварке трубок с трубной доской основной проблемой были неравномерные зазоры в стыках соединений, которые могли при этом изменяться в хаотичном порядке в процессе сварки из-за тепловых деформаций материала (рис. 6).

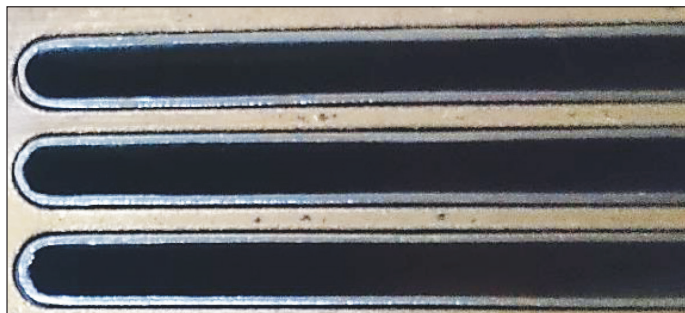


Рис. 6. Внешний вид зазоров между трубками и трубной доской

Лазерный луч, имея пятно в перетяжке фокуса 0,6 мм, при прохождении зазора в 0,5 мм по прямолинейной траектории не всегда сплавлял кромки, а при повторном проходе мог образовать прожог (рис. 7).



Рис. 7. Прожог стенки трубки в результате сварки в несколько проходов

Для решения проблемы сварки увеличенных зазоров и снижения требований к позиционированию рабочего инструмента была применена нестандартная траектория перемещения луча по стыку (рис. 8).

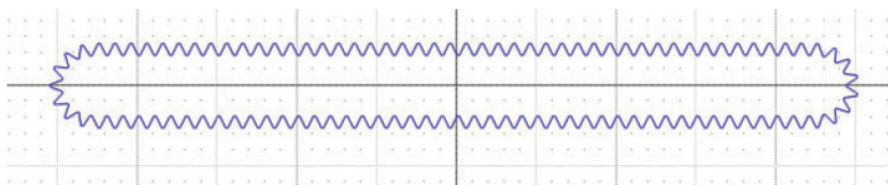


Рис. 8. Траектория перемещения луча по стыку

Примененная траектория движения лазерного луча не повторяла с точностью форму стыка, а проходила вдоль него с поперечными колебаниями. Данное решение позволило получать сварное соединение гарантированного качества за один проход (рис. 9) даже в том случае, если перед сваркой зазор составлял 0,5 мм.

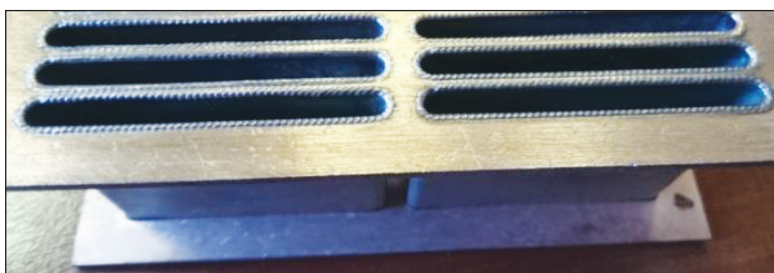


Рис. 9. Соединения, сваренные по траектории с поперечными колебаниями

После апробации технологии с её помощью были изготовлены образцы трубных решеток и проведены их испытания на герметичность методом избыточного гидравлического давления 15 бар. Образцы успешно прошли испытания, что подтвердило возможность использования данной технологии в промышленных целях. Помимо этого, данное технологическое решение было перенесено на процессы сварки трубок круглого сечения с трубной доской, где также получило положительные эффекты от применения (рис. 10).



Рис. 10. Внешний вид и микрошлиф сварного соединения трубки круглого сечения с трубной доской

Лазерная наплавка клапанов судовых двигателей

В настоящее время разработаны и широко применяются в промышленности различные способы наплавки металлических материалов: электродуговая, плазменная, газовая, лазерная, электроконтактная и др. Основными требованиями, предъявляемым к процессу наплавки являются: высокие физико-механические свойства поверхностного слоя (твердость, теплостойкость, жаропрочность и др.), обеспечение прочного и надежного сцепления металла основного и присадочного металла, исключение образование пор и трещин, снижение остаточных напряжений и деформаций, увеличение коэффициента использования присадочного материала, снижение стоимости процесса [6].

Существует много традиционных способов наплавки, предназначенных для восстановления геометрических размеров изношенных изделий и придания заданных функциональных свойств поверхностному слою, но ни один из них не является универсальным, так как функциональные и / или геометрические характеристики наплавленных слоев и изделий в целом не всегда удовлетворяют техническим требованиям эксплуатации машин и механизмов. Так, например, плазменная наплавка (рис. 11) не позволяет в полной мере решить задачи, которые ставятся на современном этапе развития производства. Это связано с высокими деформациями изделий, низкой производительностью процесса наплавки, образованиями трещин в наплавленном слое, ухудшениями свойств наплавленного металла из-за перемешивания с основой, а также с ограниченной возможностью контроля геометрических параметров наплавленного слоя, что делает невозможным обработку малогабаритных изделий и наплавку в труднодоступных местах.

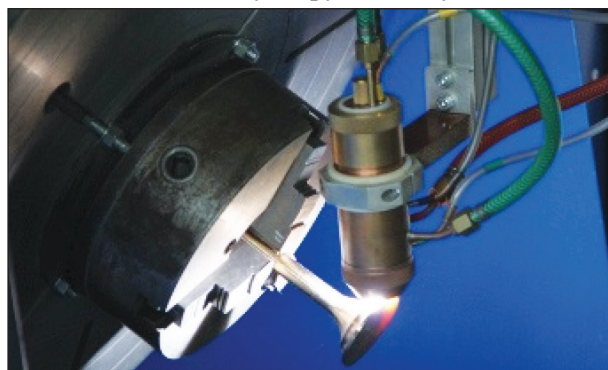


Рис. 11. Плазменная порошковая наплавка клапана

Ключ к решению данных проблем лежит в разработке и внедрении принципиально новых эффективных автоматизированных технологий лазерной наплавки. Лазерные технологии (рис. 12) позволяют получить детали требуемого качества, увеличить точность обработки, уменьшить деформации наплавляемых изделий, снизить трудозатраты на последующую обработку, а также наносить наплавочные слои на поверхность сложных изделий с минимальным тепловложением, что делает возможным локальную наплавку участков деталей без перегрева основы.



Рис. 12. Лазерная порошковая наплавка клапана

Лазерная порошковая наплавка может быть весьма эффективна как при восстановлении изношенных деталей, так и при изготовлении изделий с улучшенными или принципиально новыми свойствами прежде всего в тех случаях, когда другие методы обработки либо неприемлемы, либо не обеспечивают требуемого качества и свойств наплавочных слоев.

Лазерная наплавка, как технология ремонта, востребована компаниями, которые занимаются ремонтом и восстановлением ответственных деталей и узлов в двигателестроении. Лазерные технологии применяются при восстановлении лопаток компрессоров газотурбинных двигателей и парогенераторов [7], изготовлении и ремонте деталей авиационных двигателей [8], ремонте пресс-форм [9], восстановлении изношенных поверхностей шеек осей вагонных колесных пар [10]. В судовом машиностроении технологии лазерной наплавки целесообразно применять при ремонте и изготовлении ответственных дорогостоящих деталей и узлов из современных сплавов, работающих в агрессивных средах и / или при повышенных механических нагрузках. С целью реализации технологии лазерной наплавки изделий судового машиностроения был разработан и изготовлен роботизированный комплекс (рис. 13).



Рис. 13. Роботизированный комплекс лазерной порошковой наплавки

Комплекс построен на модульном принципе, позволяющим изменять число модулей, входящих в состав комплекса путем увеличения, уменьшения или их замены, что дает возможность адаптировать комплекс для решения различных задач — как исследовательских, так и практических, с применением лазерных технологий.

Одним из направлений экспериментальных исследований являлось выявление возможности применения лазерной газопорошковой наплавки для упрочнения клапанов судовых двигателей, с целью увеличения их работоспособности при циклических нагрузках. Основной задачей при этом было получение упрочненной поверхности тарелки клапана, торцевая поверхность которой подвергается большому влиянию механических и тепловых нагрузок, и подвержена износу (рис. 14).



Рис. 14. Поврежденная поверхность клапана

Для исследований использовался клапан из стали 45, химический состав которой представлен в табл. 1.

Таблица 1

Химический состав стали 45

Материал клапана	Химический состав сплава, %													Габаритные размеры, мм		
	C	Si	Cr	Ni	Mn	Mo	Ti	Co	Fe	Cu	Al	S	P	L	D1	D2
Сталь 45	0,42	0,17			0,5				Основа	≤0,3	–	≤ 0,04	≤ 0,035	150	8	50
	–	–	≤ 0,25	≤ 0,3	–	–	–	–						–	–	–
	0,50	0,37			0,8									1100	50	200

Изначально был выполнен комплекс предварительных экспериментальных исследований и определены оптимальные диапазоны рабочих параметров лазерной газопорошковой наплавки с учетом технологических особенностей процесса. На первом этапе выполнялась лазерная наплавка на пластину из стали 45 (рис. 15), с использованием металлического порошка на кобальтовой основе EuTroLoy 16006 производства *Castolin Eutectic*. Химический состав порошка приведен в табл. 2.

Таблица 2

Химический состав и твердость металлического порошка, используемого в исследовании

Тип порошка	Массовая доля элементов, %;								Твердость порошка HV
	C	Si	Cr	W	Ni	Mo	Fe	Co	
EuTroLoy 16006	1,2	1,23	28,7	4,7	1,9	0,01	1,9	основа	425

Гранулы порошка EuTroLoу 16006 имеют сферическую форму, размер частиц — от 50 до 150 мкм. Порошок имеет высокую стойкость к абразивному износу в условиях давления и ударов, имеет стойкость к высокой температуре и коррозии, применяется при температурах до 750 °С, имеет низкий коэффициент трения, является стойким к адгезионному износу.

Перед процессом наплавки порошок подвергся сушке в шкафу при температуре плюс 300 °С в течение 30 мин. Процесс сушки является неотъемлемой операцией, проводимой перед процессом порошковой наплавки. Использование порошка с повышенным содержанием влаги ведет к росту поробразования и снижению качества восстановленного участка. Пластина также была предварительно нагрета до температуры 250 – 300 °С. Соблюдение этого условия необходимо для исключения образования трещин в процессе остывания изделия, вследствие усадки присадочного материала.



Рис. 15. Пластина
с наплавленными слоями

Для обеспечения требуемой геометрии рабочей поверхности после лазерной порошковой наплавки необходима ее механическая обработка. Первичная механическая обработка наплавленной пластины была проведена на токарном станке. Припуск на механическую обработку наплавленного слоя составлял от 0,1 до 0,3 мм. Завершающей обработкой было выполнено шлифование наплавленной поверхности пластины. Толщина наплавленного слоя после всех шагов механической обработки составила 4,2 мм.

Для подтверждения качества наплавленной лазерной порошковой наплавкой поверхности были выполнены следующие исследования:

- визуальная оценка качества наплавленной поверхности;
- металлографическое исследование наплавленной поверхности в поперечном сечении и на границе с основным металлом;
- определение значений микротвердости наплавленной поверхности в поперечном сечении и на границе с основным металлом.

Визуальный осмотр и металлографические исследования не выявили наличие поверхностных или внутренних дефектов в наплавленном слое.

Исследование микротвердости наплавленной поверхности пластины показало существенное увеличение твердости в зоне термического влияния, при сохранении пластичности основного материала (рис. 16).

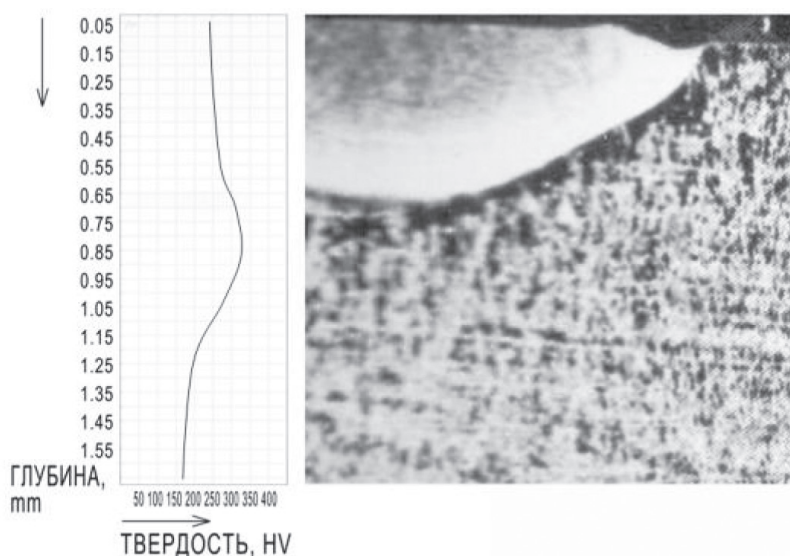


Рис. 16. Исследование микротвердости наплавленного слоя

Результаты исследований показали отсутствие дефектов в наплавленных слоях и подтвердили их высокие механические свойства. В табл. 3 представлены технологические режимы, на которых отработывалась технология наплавки на плоскую пластину из стали 45.

Таблица 3

Технологические режимы лазерной наплавки на плоские пластины

Номер пластины	Мощность излучения, кВт	Скорость наплавки мм/с	Скорость подачи порошка, г/мин	Скорость подачи газа, л/мин	Положение фокуса, мм	Примечания
1	1,3	22	55	10	+1	Плохое формирование
2	1,2	22	55	10	+4	Нестабильное формирование
3	1,2	20	50	10	+8	Ровный высокий валик
4	1,2	20	50	10	+12	Хорошее формирование
5	1,1	18	45	10	+16	Отсутствие формирования

По результатам экспериментальных исследований определены диапазоны рабочих параметров процесса, которыми следует руководствоваться при лазерной наплавке на клапан судового двигателя.

Лазерная наплавка рабочей поверхности клапана из стали 45 производилась в горизонтальном положении по круговой траектории изношенной торцевой поверхности тарелки клапана (рис. 17). Диаметр тарелки — 75 мм, толщина — 8 мм. Восстанавливаемая поверхность клапана перед наплавкой была механически обработана на глубину до 1 мм (рис. 18).

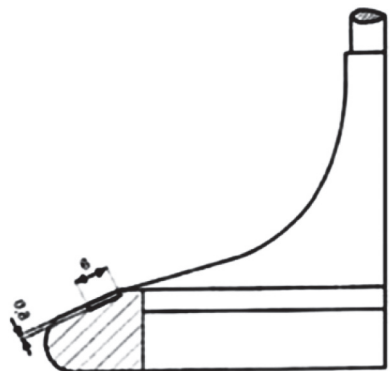


Рис. 17. Торцевая поверхность тарелки клапана для лазерной порошковой наплавки

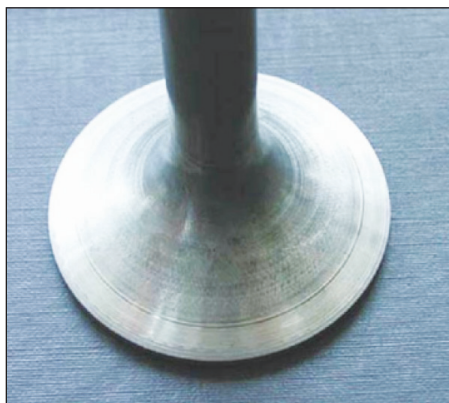


Рис. 18. Подготовленная поверхность тарелки клапана для лазерной порошковой наплавки

Затем клапан был установлен и закреплен в горизонтальном положении на позиционере, входящем в состав модуля перемещения. Манипулятор обеспечивал точное положение оптической головки относительно поверхности клапана. Наплавка слоев осуществлялась внахлест с перекрытием предыдущего слоя примерно на 25 – 30 %. Вид первого слоя наплавленной поверхности клапана, полученной при восстановлении рабочей поверхности клапана с использованием металлического порошка EuTroLoy 16006, изображен на рис. 19.



Рис. 19. Вид наплавленной поверхности клапана

Проведенные исследования наплавленных на клапан слоев также подтвердили их высокие механические свойства, что позволит существенно увеличить его работоспособность при циклических нагрузках.

Таким образом, технология лазерной наплавки, за счет высококонцентрированного точечного ввода тепла, позволила избавиться от проблем, присущих традиционным методам, и обеспечить изготовление клапанов двигателей с необходимыми свойствами практически в чистый размер.

Заключение

Основываясь на положительных результатах, полученных в процессе работ, специалистами АО «ЦТСС» сделан вывод, что оборудование и технологии лазерной сварки и наплавки имеют высокую гибкость и «универсальность» в применении, обладают большими потенциальными возможностями, могут быть использованы на предприятиях-изготовителях упомянутой продукции и способны поднять на качественно новый уровень процессы ремонта и восстановления изделий судового машиностроения.

Перспективность применения лазерных технологий обработки материалов — одно из стратегически важных направлений развития современного мира. Их эффективность доказана использованием в различных отраслях промышленности. Комплексное внедрение высокоэффективных лазерных технологий в судостроительную отрасль позволит промышленным предприятиям выйти на качественно новый уровень производства, сохранив при этом низкую себестоимость изготовления изделий.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Москвитин Г. В. Применение методов лазерной сварки в современном промышленном производстве (обзор) / Г. В. Москвитин, А. Н. Поляков, Е. М. Биргер // Сварочное производство. — 2012. — № 6. — С. 36–47.
2. Лопота В. А. Новые технологии термообработки, сварки и наплавки материалов с использованием волоконных лазеров большой мощности / В. А. Лопота, Г. А. Туричин, И. А. Цибульский [и др.] // Заготовительные производства в машиностроении. — 2012. — № 10. — С. 6–13.

3. Schulze V. B. Remote welding with 3D scanners / V. B. Schulze, M. Lingner // *Laser+Photonics*. — 2013. — No. 3. — Pp. 38–40.
4. Туричин Г. А. Особенности формирования структуры сварных соединений при лазерной сварке разнородных материалов систем Al – Cu, Al – Ti / Г. А. Туричин, О. Г. Климова, К. Д. Бабкин // *Цветные металлы*. — 2014. — № 4 (856). — С. 45–50.
5. Regaard B. Seam-tracking for high precision laser welding applications - Methods, restrictions and enhanced concepts / B. Regaard, S. Kaierle, R. Poprawe // *Journal of Laser Applications*. — 2009. — Vol. 21. — Is. 4. — Pp. 183–195. DOI: 10.2351/1.3267476.
6. Григорьянц А. Г. Технологические процессы лазерной обработки / А. Г. Григорьянц, И. Н. Шиганов, А. И. Мисюров. — М.: Изд-во МГТУ им. Н. Э. Баумана, 2006. — 663 с.
7. Земляков Е. Перспективы использования технологии лазерной наплавки для восстановления лопаток компрессоров газотурбинных двигателей / Е. Земляков, К. Бабкин, Р. Корсмик [и др.] // *Фотоника*. — 2016. — № 4 (58). — С. 10–25. DOI: 10.22184/1993-7296.2016.58.4.10.22.
8. Ермолаев А. С. Лазерные технологии и процессы при изготовлении и ремонте деталей газотурбинного двигателя / А. С. Ермолаев, А. М. Иванов, С. А. Василенко // *Вестник Пермского национального исследовательского политехнического университета. Аэрокосмическая техника*. — 2013. — № 35. — С. 49–63.
9. Смелов В. Г. Технология импульсной лазерной наплавки при ремонте пресс-форм / В. Г. Смелов, А. В. Сотов, Р. Р. Кяримов [и др.] // *Вестник Самарского университета. Аэрокосмическая техника, технологии и машиностроение*. — 2015. — Т. 14. — № 3–2. — С. 432–437. DOI: 10.18287/2412-7329-2015-14-3-432-437.
10. Пат. 2107598 Российская Федерация, МПК В 23 К 26/00, В 23 Р 6/00. Способ восстановления изношенных поверхностей шеек осей вагонных колесных пар путем лазерной наплавки / В. С. Глазков, И. Д. Козубенко, Ю. С. Радионов [и др.]; заявитель и патентообладатель В. С. Глазков, И. Д. Козубенко, Ю. С. Радионов [и др.]. — № 96101610/02; Заявлено 29.01.1996; Опубл. 27.03.1998.

REFERENCES

1. Moskvitin, G. V., A. N. Polyakov, and Ye. M. Birger. “Application of laser welding methods in modern industrial production (review).” *Svarochnoe proizvodstvo* 6 (2012): 36–47.
2. Lopota, V. A., G. A. Turichin, I. A. Tsubul'sky, E. V. Zemlyakov, and E. A. Valdaytseva. “New technologies of heat treatment, welding and materials surfacing using high power fiber lasers.” *Zagotovitel'nye proizvodstva v mashinostroenii* 10 (2012): 6–13.
3. Schulze, V. B., and M. Lingner. “Remote welding with 3D scanners.” *Laser+Photonics* 3 (2013): 38–40.
4. Turichin, G. A., O. G. Klimova, and K. D. Babkin. “Specifics of structure formation of welded joints during laser welding of dissimilar materials of Al - Cu and Al - Ti-systems.” *Tsvetnye Metally* 4(856) (2014): 45–50.
5. Regaard, Boris, Stefan Kaierle, and Reinhart Poprawe. “Seam-tracking for high precision laser welding applications—Methods, restrictions and enhanced concepts.” *Journal of Laser Applications* 21.4 (2009): 183–195. DOI: 10.2351/1.3267476.
6. Grigor'yants, A. G., I. N. Shiganov, and A. I. Misyurov. *Tekhnologicheskie protsessy lazernoi obrabotki*. M.: Izd-vo MGTU im. N. E. Bauman, 2006.
7. Zemlyakov, E., K. Babkin, R. Korsmik, M. Sklyar, and M. Kuznetsov. “Prospects of Use of Laser Cladding Technology for Restoration of Compressor Blades of Gas Turbine Engines.” *Photonics* 4(58) (2016): 10–25. DOI: 10.22184/1993-7296.2016.58.4.10.22.
8. Ermolaev, A. S., A. M. Ivanov, and S. A. Vasilenko. “Laser technology and processes when manufacturing and repair of details of the gas-turbine engine.” *PNRPU Aerospace Engineering Bulletin* 35 (2013): 49–63.
9. Smelov, V. G., A. V. Sotov, R. R. Kyarimov, and A. V. Agapovichev. “Technology of pulsed laser surface coating in pressing tool repair.” *Vestnik of Samara university. Aerospace and mechanical engineering* 14.3-2 (2015): 432–437. DOI: 10.18287/2412-7329-2015-14-3-432-437.
10. Glazkov, V. S., I. D. Kozubenko, Yu. S. Radionov, A. P. Korchagin, et al. RU 2 107 598 C1, IPC B 23 K 26/00, B 23 P 6/00. Sposob vosstanovleniya iznoshennykh poverkhnostei sheek osei vagonnykh kolesnykh par putem lazernoi naplavki. Russian Federation, assignee. Publ. 27 March 1998.

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

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

Афанасьев Николай Александрович —
ведущий инженер-технолог, аспирант
Научный руководитель:
Веселков Вячеслав Васильевич
АО «Центр технологии судостроения
и судоремонта»
198095, Российская Федерация, Санкт-Петербург,
ул. Промышленная 7
e-mail: 3221@sstc.spb.ru

Жмуренков Артем Германович —
инженер-технолог 1-й кат., аспирант
Научный руководитель:
Веселков Вячеслав Васильевич
АО «Центр технологии судостроения
и судоремонта»
198095, Российская Федерация, Санкт-Петербург,
ул. Промышленная, 7
e-mail: armet27@mail.ru

INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

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

Afanasev, Nikolay A. —
lead production engineer, postgraduate
Supervisor:
Veselkov, Vyacheslav V.
JSC “Shipbuilding & Shiprepair
Technology Center”
7 Promyshlennaya Str., St. Petersburg, 198095,
Russian Federation
e-mail: 3221@sstc.spb.ru

Zhmurenkov, Artem G. —
production engineer, postgraduate
Supervisor:
Veselkov, Vyacheslav V.
JSC “Shipbuilding & Shiprepair
Technology Center”
7 Promyshlennaya Str., St. Petersburg, 198095,
Russian Federation
e-mail: armet27@mail.ru

*Статья поступила в редакцию 21 декабря 2016 г.
Received: December 21, 2016.*

DOI: 10.21821/2309-5180-2017-9-1-157-164

THE STUDY OF COMPENSATORY POSSIBILITIES OF ROUTING PIPELINES PROJECT OF SHIP SYSTEMS

G. V. Ngo, K. N. Sakhno

Astrakhan State Technical University, Astrakhan, Russian Federation.

The paper sets out problem of manufacture and installation of ship pipelines with design information. Questions of technological increase of pipelines at the design stage and the modern technology of deviation compensation with using bottom-hole pipe, manufacture which requires redetermination of size on the ship and presence of object's readiness are considered. Authors analyze the conditions and possibilities of compensation of coordinate size deviations of pipelines. Results of the analysis determined that to improve the manufacturability of ship system pipelines, bottom-hole pipe shall be made at the same time with the rest of pipes up to installation of connections with calculation of necessary overdimensions of pipes in definite directions. The overdimensions of other pipes do not appoint. Authors offer a new technology of deviations compensation by turning the pairs of parallel sections in the route and resolved the problem of arc surfaces, solution of which will allow you to determine oblast of compensation's possibilities of pipelines with various configurations. The mathematical description of the compensation's possibilities of pipelines with various configurations with calculation of necessary overdimensions of pipes in definite directions is completed. Created the pre-requisite for creating an automated program that will let you to determine the values of compensation's possibilities of pipelines. With regard to major quantity of pipelines offer the opportunity to replace bottom-hole to fit pipe, flexible which will be carried out on the project size, without redetermination on the ship, contributing to reduce duration of construction of object, difficult technological complexes saturated with pipelines.

Keywords: pipelines, design, manufacture, mounting, tracing, compensatory oblast.

For citation:

Ngo, Viet Gia, and Konstantin N. Sakhno. "The study of compensatory possibilities of routing pipelines project of ship systems." *Vestnik Gosudarstvennogo universiteta morskogo i rechnogo flota imeni admirala S.O. Makarova* 9.1 (2017): 157–164. DOI: 10.21821/2309-5180-2017-9-1-157-164.

УДК 629.12

ИССЛЕДОВАНИЕ КОМПЕНСАЦИОННЫХ ВОЗМОЖНОСТЕЙ ПРОЕКТНОЙ ТРАССИРОВКИ ТРУБОПРОВОДОВ СУДОВЫХ СИСТЕМ

Ж. В. Нго, К. Н. Сахно

ФГБОУ ВО «Астраханский государственный технический университет»,
Астрахань, Российская Федерация.

Изложены пути решения некоторых проблем изготовления и монтажа труб судовых систем по проектной информации. Рассматриваются вопросы повышения технологичности трубопроводов на этапе проектирования. Рассматривается традиционная технология компенсации отклонений с использованием забойных труб, изготовление которых требует уточнения размеров по месту и наличия определенной степени готовности объекта. Проведён анализ условий и возможностей компенсации отклонений как трассы трубопровода, так и соседних конструкций в процессе монтажа труб. Поставлена задача изготовления забойной трубы вместе с остальными трубами трассы с учетом необходимых технических припусков на концах труб в определенных направлениях до операции установки соединений. Предложено компенсировать отклонения за счёт перемещения трассы трубопровода в процессе монтажа труб и рассчитывать максимальные величины этих перемещений у анализируемой трассы. Выполнено математическое описание получения компенсационных возможностей любой трассы трубопровода по её конфигурации. Разработаны действия по увеличению компенсационных возможностей трассы за счёт назначения необходимых припусков на забойной трубе. Проверена возможность и достаточность назначения припуска только на одном конце забойной трубы. Рассчитана длина необходимых припусков. Предложено понятие «пригоняемые» трубы, вместо забойных. Созданы предпосылки для создания автоматизированной программы, которая позволит определять

значения области компенсационных возможностей трасс трубопроводов, выбирать забойные трубы, переводить их в статус пригоняемых и назначать величины необходимых припусков. Выявлено, что во многих проектах судов есть возможность для замены забойных труб на пригоняемые трубы, гибка которых будет осуществляется по проектным размерам, без уточнения по месту, способствуя сокращению сроков строительства объектов, сложных технологических комплексов, насыщенных трубопроводами.

Ключевые слова: трубопроводы, проектирование, изготовление, монтаж, трассировка, область компенсации.

Для цитирования:

Нго Ж. В. Исследование компенсационных возможностей проектной трассировки трубопроводов судовых систем / Ж. В. Нго, К. Н. Сахно // Вестник Государственного университета морского и речного флота имени адмирала С. О. Макарова. — 2017. — Т. 9. — № 1. — С. 157–164. DOI: 10.21821/2309-5180-2017-9-1-157-164.

Введение

Совершенствование методов проектирования, изготовления и монтажа трубопроводов без пригоночных работ и уточнения размеров на судне связано с решением двух проблем: точностью выполнения конструктивных размеров основных труб и получением достоверной проектной конфигурации забойных труб. Технология изготовления и монтажа забойной трубы включает фактические замеры между двумя жесткофиксированными соединениями, изменение на этой основе конфигурации забойной трубы и пригоночные работы по установке приварных соединений [1] – [14]. Повышение технологичности трасс трубопроводов ограничено тем, что в процессе монтажа не допускается изменение фактических конструктивных размеров и конфигурации забойных труб.

В связи с изложенным, для повышения технологичности трубопроводов забойная труба должна изготавливаться по проектной информации без уточнения размеров по месту. Проектная документация на забойные трубы будет отличаться от документации на основные трубы только наличием технологических припусков на концах трубы. В дальнейшем их можно называть «пригоняемые» трубы. Для успешного монтажа трасс с пригоняемыми трубами необходимо в процессе монтажа иметь возможность перемещать трассу, компенсируя возникающие отклонения как труб, так и соседних конструкций в направлениях, которые нельзя компенсировать за счёт припусков на забойной трубе [1]. Трасса трубопровода должна иметь возможность перемещения хотя бы в одном координатном направлении.

Компенсация отклонений перемещением трасс трубопроводов

Возможность перемещения при монтаже трасс из готовых труб предполагалась ранее действовавшими нормативными документами за счёт поворота труб в свободных соединениях. Повороты в соединениях могут изменить направление последнего участка трассы, что нарушит соосность по углу с осью жёстко фиксированного соединения, ограничивающего трассу. Для различных трасс допускаемый угол составляет $1 - 3^\circ$ [1]. Такой допуск не позволяет использовать повороты для перемещения трассы, если последний прямой участок трассы не параллелен выбранному участку, на котором находится поворачиваемое соединение. Если в трассе за поворачиваемым соединением имеется участок, параллельный выбранному, и на нём есть свободное соединение, то повернув оставшуюся за этим соединением часть трассы на тот же угол, что и выбранное соединение, но в обратном направлении, несоосность по углу направления последнего участка трассы будет устранена. Таким образом, перемещение трассы возможно при наличии в трассе параллельных участков и свободных соединений, расположенных на этих участках.

В процессе поворотов трассы в свободных соединениях, последующие участки трассы перемещаются по дугам окружностей с радиусами величиной, равной перпендикуляру, опущенному из любой точки последующего участка до оси поворота, т. е. до оси, являющейся продолжением участка поворачиваемого соединения. Математическое описание действий по определению компенсационных возможностей трассы связано с решением задачи о дуговых поверхностях.

Если окружность перемещать вдоль её оси, получим цилиндрическую поверхность. Если таким же образом перемещать часть окружности, т. е. её дугу, получим криволинейную поверхность в виде части оболочки цилиндра. Если перемещать часть дуги не в направлении её оси, а по дуге другой окружности, пересекающей эту окружность в точке A , получим двуизогнутую поверхность. Если эти две дуги, в точке их пересечения, пересекает третья дуга, ось окружности которой не параллельна осям двум предыдущим дуг, то перемещая двуизогнутую поверхность по дуге третьей окружности, получим объёмную фигуру.

Постановка задачи

Даны k окружностей с центрами C_1, C_2, C_k и соответственными радиусами R_1, R_2, R_k . Окружности принадлежат плоскостям, которые задаются нормальными $\vec{n}_1, \vec{n}_2, \vec{n}_k$. Все окружности проходят через точку A . Для каждой окружности определена дуга $M_i N_i$, содержащая точку A , в которой все окружности пересекаются. Угол $\angle M_i C_i A = \alpha_i$, угол $\angle A C_i N_i = \beta_i$. Дуга I перемещается по направлению второй дуги параллельным переносом, образуя криволинейную поверхность S_2 . Криволинейная поверхность S_2 перемещается параллельным переносом вдоль направления третьей дуги, образуя криволинейный объём S_3 [1].

Задача

1. Составить уравнение поверхности S_2 , которая получается движением дуги $M_1 N_1$ параллельным переносом вдоль дуги $M_2 N_2$.
2. Составить уравнение пространственной области S_3 , которая получается при движении поверхности S_2 параллельным переносом вдоль дуги $M_3 N_3$.
3. Составить уравнение пространственной области S_i , которая получается при движении области S_{i-1} параллельным переносом вдоль дуги $M_i N_i$, $i = 4, 5, \dots, k$.

Координаты произвольной точки i -й окружности

Определим координаты произвольной точки для каждой окружности. Для этого зададим

в направлении радиуса окружности единичный вектор $\vec{e}_i = \frac{\vec{C_i A}}{R_i} = \frac{\vec{O A} - \vec{O C_i}}{R_i}$, где $O = [0, 0, 0]$ — начало координат. Пусть $\vec{k}_i = [\vec{n}_i, \vec{e}_i]$ (здесь $[\vec{n}, \vec{e}] = [n_2 e_3 - n_3 e_2, n_3 e_1 - n_1 e_3, n_1 e_2 - n_2 e_1]$ — векторное произведение). Длина вектора $\vec{u}_i = \frac{\vec{k}_i}{|\vec{k}_i|}$ будет равна единице. Векторы $\vec{e}_i, \vec{u}_i, \vec{n}_i$ образуют ортонормированный базис (рис. 1).

Длина вектора $\vec{u}_i = \frac{\vec{k}_i}{|\vec{k}_i|}$ будет равна единице. Векторы $\vec{e}_i, \vec{u}_i, \vec{n}_i$ образуют ортонормированный базис (рис. 1).

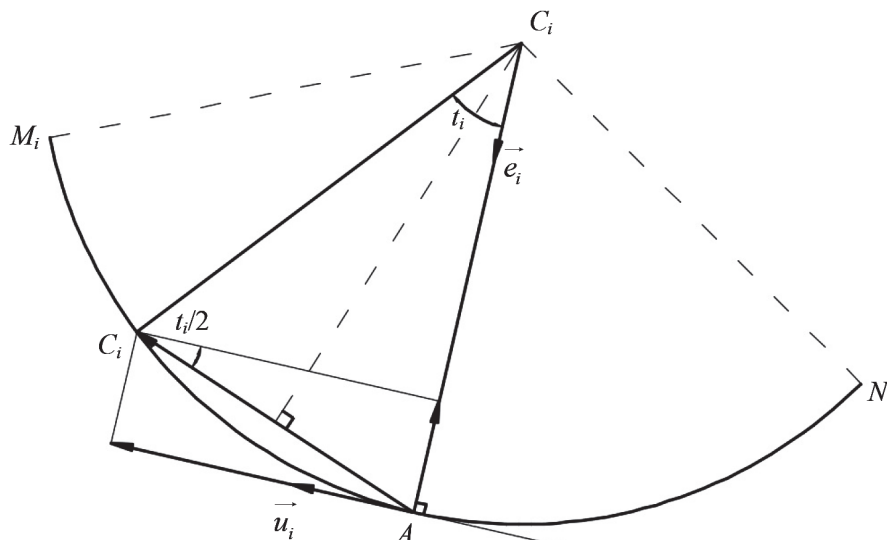


Рис. 1. Определение координат произвольной точки окружности

Выпишем параметрическое уравнение координат произвольной точки i -й окружности

$$\overrightarrow{OF_i}(t_i) = \overrightarrow{OA} + \overrightarrow{AF_i}, \quad (1)$$

где F_i — произвольная точка i -й окружности.

$$\overrightarrow{AF_i} = AF_i \cos\left(\frac{t_i}{2}\right) \overrightarrow{u_i} - AF_i \sin\left(\frac{t_i}{2}\right) \overrightarrow{e_i},$$

где $AF_i = 2R_i \sin\left(\frac{t_i}{2}\right)$,

отсюда

$$\begin{aligned} \overrightarrow{AF_i} &= 2R_i \sin\left(\frac{t_i}{2}\right) \cos\left(\frac{t_i}{2}\right) \overrightarrow{u_i} - 2R_i \sin^2\left(\frac{t_i}{2}\right) \overrightarrow{e_i}; \\ \overrightarrow{AF_i} &= R_i \sin(t_i) \overrightarrow{u_i} - R_i (1 - \cos(t_i)) \overrightarrow{e_i}. \end{aligned} \quad (2)$$

Подставим (2) в (1) и получим положение произвольной точки i -й окружности:

$$\overrightarrow{OF_i}(t_i) = \overrightarrow{OA} + R_i \sin(t_i) \overrightarrow{u_i} - R_i (1 - \cos(t_i)) \overrightarrow{e_i}. \quad (3)$$

Значение $t_i = 0$ соответствует точке A .

Уравнение поверхности S_2

Положение произвольной точки F_1 , принадлежащей первой окружности $(C_1; R_1)$, определяется по параметрическому уравнению

$$\overrightarrow{OF_1}(t_1) = \overrightarrow{OA} + R_1 \sin(t_1) \overrightarrow{u_1} - R_1 (1 - \cos(t_1)) \overrightarrow{e_1}; \quad -\alpha_1 \leq t_1 \leq \beta_1. \quad (4)$$

При движении дуги M_1N_1 вдоль дуги M_2N_2 точка F_1 движется до положения F_2 по окружности $(C'_2; R_2)$, где окружность $(C'_2; R_2)$ образуется при движении окружности $(C_2; R_2)$ параллельным переносом по вектору $\overrightarrow{AF_1}$, т. е. $\overrightarrow{C_2C'_2} = \overrightarrow{AF_1}$ (рис. 2). Базисные векторы $\overrightarrow{e_2}$, $\overrightarrow{u_2}$, $\overrightarrow{n_2}$ при этом не изменяются.

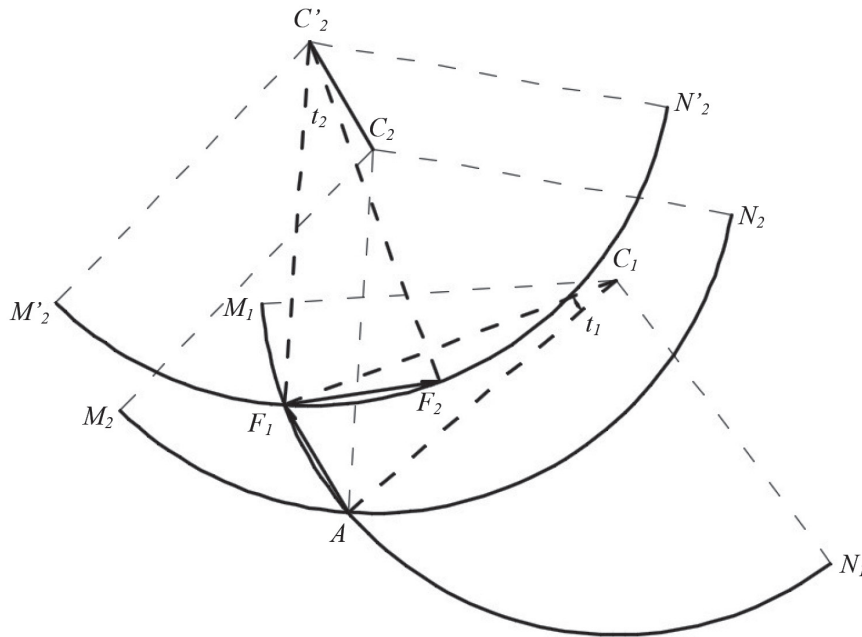


Рис. 2. Определение координат произвольной точки поверхности S_2

Положение точки F_2 определяется по формуле

$$\overrightarrow{OF_2}(t_2) = \overrightarrow{OF_1} + \overrightarrow{F_1F_2}, \quad (5)$$

где $\overrightarrow{OF_1}$ определяется по формуле (4); $\overrightarrow{F_1F_2}$ в окружности $(C'_2; R_2)$ определяется как вектор $\overrightarrow{AF_i}$ в окружности $(C_i; R_i)$

$$\overrightarrow{F_1F_2} = R_2 \sin(t_2) \overrightarrow{u_2} - R_2 (1 - \cos(t_2)) \overrightarrow{e_2}. \quad (6)$$

Подставим формулы (4) и (6) в (5) и найдем уравнение поверхности S_2 (рис. 3):

$$\overrightarrow{OF_2}(t_1, t_2) = \overrightarrow{OA} + R_1 \sin(t_1) \overrightarrow{u_1} - R_1 (1 - \cos(t_1)) \overrightarrow{e_1} + R_2 \sin(t_2) \overrightarrow{u_2} - R_2 (1 - \cos(t_2)) \overrightarrow{e_2}; \quad (7)$$

$$-\alpha_1 \leq t_1 \leq \beta_1; -\alpha_2 \leq t_2 \leq \beta_2.$$

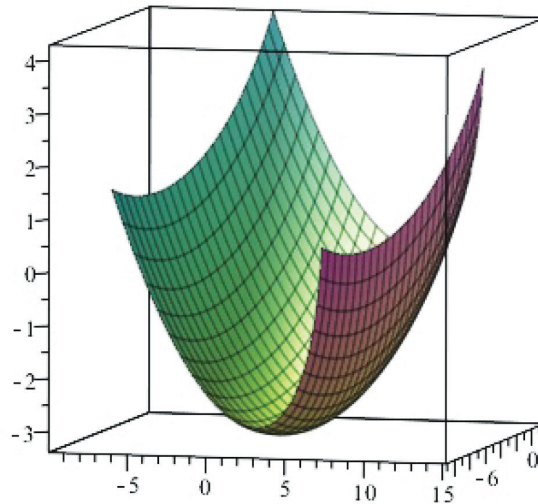


Рис. 3. Поверхность S_2

Уравнение пространственной области S_3

При движении поверхности S_2 вдоль дуги M_3N_3 точка F_2 в формуле (7) двигается до положения точки F_3 по окружности $(C'_3; R_3)$, где окружность $(C'_3; R_3)$ образуется при движении окружности $(C_3; R_3)$ параллельным переносом по вектору $\overrightarrow{F_1F_2}$, т. е. $\overrightarrow{C_3C'_3} = \overrightarrow{F_1F_2}$. По аналогии с формулой (7) получим уравнение области S_3 (рис. 4):

$$\overrightarrow{OF_3}(t_1, t_2, t_3) = \overrightarrow{OA} + R_1 \sin(t_1) \overrightarrow{u_1} - R_1 (1 - \cos(t_1)) \overrightarrow{e_1} + R_2 \sin(t_2) \overrightarrow{u_2} - R_2 (1 - \cos(t_2)) \overrightarrow{e_2} + R_3 \sin(t_3) \overrightarrow{u_3} - R_3 (1 - \cos(t_3)) \overrightarrow{e_3}; \quad (8)$$

$$-\alpha_1 \leq t_1 \leq \beta_1; -\alpha_2 \leq t_2 \leq \beta_2; -\alpha_3 \leq t_3 \leq \beta_3.$$

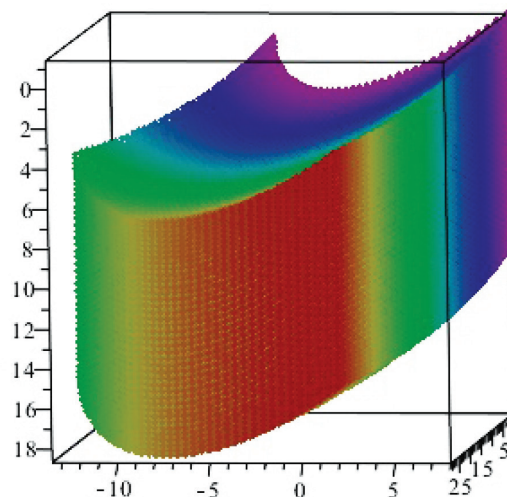


Рис. 4. Поверхность, ограничивающая область S_3

Уравнение пространственной области S_4

Пространственная область S_3 движется вдоль дуги M_4N_4 , образует область S_4 . Так как движение внутренних точек пространственной области S_3 не влияет на форму области S_4 , можно считать, что пространственная область S_4 получается движением всех граничных поверхностей области S_3 . По формуле (8) аналогично определим уравнение области S_4 .

Области $S_5, S_6, \dots, S_k$ получаются аналогично по формуле

$$\overline{OF}_n(t_1, t_2, \dots, t_n) = \overline{OA} + \sum_{i=1}^n (R_i \sin(t_i) \vec{u}_i - R_i (1 - \cos(t_i)) \vec{e}_i),$$

где $\Delta \vec{S} = \sum_{i=1}^n (R_i \sin(t_i) \vec{u}_i - R_i (1 - \cos(t_i)) \vec{e}_i)$ — это абсолютная область компенсации по сравнению с положением концов трассы.

Если количество свободных соединений и параллельных участков трассы не позволяет создать объёмную или двуизогнутую поверхность, то перемещать дугу или двуизогнутую поверхность можно в направлении прямой линии. Перемещая дугу, получим изогнутую поверхность; перемещая двуизогнутую поверхность, получим объёмную фигуру.

В качестве прямой линии надо использовать направление участков трубопровода, а именно концевые участки забойной трубы. В зависимости от положения дуги или двуизогнутой поверхности, а также направлений концевых участков забойной трубы определим необходимую величину припуска. Так же, как и для дуг, перемещаем область, полученную из дуги или дуг, вдоль отрезка прямой, т. е. припуска:

$$S_{n+1}(t_{n+1}) = S_n + t_{n+1} \cdot \vec{v},$$

где $\vec{v}$ — единичный вектор направления прямой; t_{n+1} — новый параметр от 0 до длины припуска.

Если за счёт поворотов в соединениях или поворотов и припусков получим область компенсации, перекрывающую фигуру параллелепипеда отклонений, то поставленная задача решена. Решение поставленной задачи не зависит от функционального назначения трубопроводов и систем. На основе данной задачи возможно построение области компенсационных возможностей трасс трубопроводов различных конфигураций. Результаты данного исследования могут использоваться во многих отраслях промышленности применительно к объектам, насыщенным трубопроводами.

Выводы

В ходе исследований компенсационных возможностей проектной трассировки трубопроводов:

- выполнено математическое описание компенсационных возможностей трасс трубопроводов различных конфигураций с учетом назначения необходимых припусков труб на определенных направлениях;
- созданы предпосылки для создания автоматизированной программы, которая позволит определить значения области компенсационных возможностей трасс трубопроводов;
- применительно к большому количеству трасс трубопроводов открывается возможность для замены забойных труб на пригоняемые трубы, гибка которых будет осуществляться по проектным размерам, без уточнения по месту, способствуя сокращению сроков строительства объектов, сложных технологических комплексов, насыщенных трубопроводами.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Сахно К. Н. Научные основы повышения технологичности трубопроводов судовых систем на стадии проектирования: дис. ... д-ра техн. наук / К. Н. Сахно. — Астрахань, 2012. — 353 с.
2. Сахно К. Н. Актуальность использования компенсационных возможностей прямых труб при проектировании, изготовлении и монтаже трубопроводных систем / К. Н. Сахно, Нго Вьет Жа, Во Куанг Чунг //

Вестник Астраханского государственного технического университета. Серия: Морская техника и технология. — 2015. — № 2. — С. 22–26.

3. Сахно К. Н. Преимущества использования взаимно параллельных участков трубопровода при проектировании труб, проходящих под зашивкой судовых помещений / К. Н. Сахно, Во Чунг Куанг // Вестник Астраханского государственного технического университета. Серия: Морская техника и технология. — 2014. — № 2. — С. 99–104.

4. ОСТ 5.95057-90. Системы судовые и системы судовых энергетических установок. Типовой технологический процесс изготовления и монтажа трубопроводов. — РТП НПО «Ритм». — 207 с.

5. РД 5Р.0005-93. Системы судовые и системы судовых энергетических установок. Требования к проектированию, изготовлению и монтажу труб по эскизам и чертежам с координатами трасс трубопроводов. — СПб.: ЦНИИТС. — 82 с.

6. Andi Asmara. Pipe routing framework for detailed ship design / Andi Asmara. — The Netherlands: VSSD Delft, 2013. — 155 p.

7. Piping design handbook. — Hyundai engineering Co. Ltd, 2006. — 162 p.

8. Jerald J. Scheduling optimization of flexible manufacturing systems using particle swarm optimisation algorithm / J. Jerald, P. Asokan, G. Prabakaran, R. Saravanan // The International Journal of Advanced Manufacturing Technology. — 2005. — Vol. 25. — Is. 9. — Pp. 964–971. DOI: 10.1007/s00170-003-1933-2.

9. Kim S.-H. The development of a practical pipe auto-routing system in a shipbuilding CAD environment using network optimization / S.-H. Kim, W.-S. Ruy, B. S. Jang // International journal of naval architecture and ocean engineering. — 2013. — Vol. 5. — Is. 3. — Pp. 468–477. DOI: 10.2478/IJNAOE-2013-0146.

10. Ando Y. An automatic piping algorithm including elbows and bends / Y. Ando, H. Kimura // International Conference on Computer Applications in Shipbuilding (ICCAS2011). Trieste, Italy, 20–22 September 2011. — 2011. — Vol. 3. — Pp. 153–158.

11. Fan X. Ship pipe routing design using the ACO with iterative pheromone updating / X. Fan, Y. Lin, Z. Ji // Journal of Ship Production. — 2007. — Vol. 23. — N. 1. — Pp. 36–45.

12. Shao X. Y. An expert system using rough sets theory for aided conceptual design of ship's engine room automation / X. Y. Shao, X. Z. Chu, H. B. Qiu, L. Gao, J. Yan // Expert Systems with Application. — 2009. — Vol. 36. — Is. 2. — Part 2. — Pp. 3223–3233. DOI: 10.1016/j.eswa.2008.01.011.

13. Fan X. Multi ant colony cooperative co-evolution for optimization of ship multi pipe parallel routing / X. Fan, Y. Lin, Z. Ji // Journal of Shanghai Jiaotong University. — 2009. — Vol. 43. — Is. 2. — Pp. 193–197.

14. Wu J. Optimal approach of ship branch pipe routing optimization base on co-evolutionary algorithm / J. Wu, Y. Lin, Z. S. Ji, X. N. Fan // Ship and ocean engineering. — 2008. — Vol. 37. — Is. 4. — Pp. 135–138.

REFERENCES

1. Sakhno, K. N. Nauchnye osnovy povysheniya tekhnologichnosti truboprovodov sudovykh sistem na stadii proektirovaniya. Dr. diss. Astrakhan', 2012.

2. Sakhno, Konstantin Nickolaevich, Ngo Viet Gia, and Vo Trung Quang. "Importance of using compensatory possibilities of straight pipes in design, manufacture and mounting of pipeline systems." *Vestnik of Astrakhan State Technical University. Series: Marine Engineering and Technologies* 2 (2015): 22–26.

3. Sakhno, Konstantin Nickolaevich, and Vo Trung Quang. "Advantages of using parallel sections of the pipeline in designing of pipes passing under the ship premises coverings." *Vestnik of Astrakhan State Technical University. Series: Marine Engineering and Technologies* 2 (2014): 99–104.

4. Russian Federation. OST 5.95057-90. Sistemy sudovyye i sistemy sudovykh energeticheskikh ustanovok. Tipovoy tekhnologicheskiy protsess izgotovleniya i montazha truboprovodov. RTP NPO «Ritm».

5. RD 5R.0005-93. Sistemy sudovyye i sistemy sudovykh energeticheskikh ustanovok. Trebovaniya k proektirovaniyu, izgotovleniyu i montazhu trub po eskizam i chertezham s koordinatami trass truboprovodov. SPb.: TsNIITS.

6. Andi Asmara. *Pipe routing framework for detailed ship design*. The Netherlands: VSSD Delft, 2013.

7. *Piping design handbook*. Hyundai engineering Co. Ltd, 2006.

8. Jerald, J., P. Asokan, G. Prabakaran, and R. Saravanan. "Scheduling optimisation of flexible manufacturing systems using particle swarm optimisation algorithm." *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology* 25.9 (2005): 964–971. DOI: 10.1007/s00170-003-1933-2.

9. Kim, Shin-Hyung, Won-Sun Ruy, and Beom Seon Jang. "The development of a practical pipe auto-routing system in a shipbuilding CAD environment using network optimization." *International Journal of Naval Architecture and Ocean Engineering* 5.3 (2013): 468–477. DOI: 10.2478/IJNAOE-2013-0146.
10. Ando, Yuto, and Hajime Kimura. "An automatic piping algorithm including elbows and bends." *International Conference on Computer Applications in Shipbuilding (ICCAS2011). Trieste, Italy, 20-22 September 2011*. 2011. Vol. 3. 153–158.
11. Fan, Xiaoning, Yan Lin, and Zhuoshang Ji. "Ship pipe routing design using the ACO with iterative pheromone updating." *Journal of Ship Production* 23.1 (2007): 36–45.
12. Shao, Xin-Yu, Xue-Zheng Chu, Hao-Bo Qiu, Liang Gao, and Jun Yan. "An expert system using rough sets theory for aided conceptual design of ship's engine room automation." *Expert Systems with Applications* 36.2 (2009): 3223–3233. DOI: 10.1016/j.eswa.2008.01.011
13. Fan, X., Y. Lin, and Z. Ji. "Multi ant colony cooperative coevolution for optimization of ship multi pipe parallel routing." *Journal of Shanghai Jiaotong University* 43.2 (2009): 193–197.
14. Wu, Jun, Y. Lin, Z. S. Ji, and X. N. Fan. "Optimal approach of ship branch pipe routing optimization based on co-evolutionary algorithm." *Ship & Ocean Engineering* 37.4 (2008): 135–138.

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

Нго Вьет Жа — аспирант
Научный руководитель:
Сахно Константин Николаевич
ФГБОУ ВО «Астраханский государственный
технический университет»
414056, Российская Федерация, Астрахань,
ул. Татищева 16
e-mail: ngogiaviet.ast@gmail.com
Сахно Константин Николаевич —
доктор технических наук, профессор
ФГБОУ ВО «Астраханский государственный
технический университет»
414056, Российская Федерация, Астрахань,
ул. Татищева 16
e-mail: k.sakhno@mail.ru

INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Ngo Viet Gia — Postgraduate
Supervisor:
Sakhno Konstantin N.
Astrakhan State Technical University
16 Tatishcheva Str., Astrakhan, 414056,
Russian Federation
e-mail: ngogiaviet.ast@gmail.com
Sakhno, Konstantin N. —
Dr. of Technical Sciences, professor
Astrakhan State Technical University
16 Tatishcheva Str., Astrakhan, 414056,
Russian Federation
e-mail: k.sakhno@mail.ru

Статья поступила в редакцию 9 января 2017 г.
Received: January 9, 2017.

СУДОВЫЕ ЭНЕРГЕТИЧЕСКИЕ УСТАНОВКИ, СИСТЕМЫ И УСТРОЙСТВА

DOI: 10.21821/2309-5180-2017-9-1-165-175

THE STUDY OF DIFFERENTIAL MECHANISMS FROM THE POINT OF VIEW OF FUNCTIONING IN THE SHIP AND CRANE DRIVES

E. N. Andrianov, A. N. Ivanov

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

Considered planetary differential mechanisms, with the number of degrees of freedom equal to two, allowing transferring energy from the input shaft either to two output or from two input shafts to the output shaft in cinematically interconnected, branches. In the first case, the differential mechanism performs the functions of timing, and the second functions as a summing or in other words as a unifying mechanism. As the dispenser of time and the summing mechanism is used single – ended and differential-single-row planetary mechanism with satellites odnopozova. Since the differential drive mechanism with the same design parameter can be a function of the separation, and with the function of the summation of the power flow, in the work based on the famous graphic method Lesokhina-Cranes, complemented by prof. Prokofiev by considering the energy equations in the research process obtained a new solution. The solution differs from the known fact that its application to the problem of synthesis of such mechanisms eliminates uncertainty in the implementation of the functions of branching (summation or division) of power flow. To create certainty in the solution of the synthesis problem, a dedicated sustainable existence of differential mechanisms, and for each specific area of change of parameters of the mechanism the analytical solutions obtained, implement the required gear ratio with the given distribution of power flows. It is shown that the desired gear ratio drive can be obtained with different values of the structural parameter of single row planetary mechanism. Specific examples deals with the property change of the transmission ratio of the actuator, for the case of switching from the differential operation mode to work as zamed likely planetary transmission and the use of this property in practice. The study of the properties will allow the developer with little time to find a rational scheme and the optimal values of gear ratio of the differential mechanisms of the ship and crane drives for each mode of operation of the differential mechanism and will contribute to the creation of products competitive on the world market.

Keywords: planetary gear, the differential mechanism, the planetary gear system CODAG, lifting mechanism, swing mechanism, and a summing reducer, distributor point, constructive setting.

For citation:

Andrianov, Evgenii N., and Anatoly N. Ivanov. "The study of differential mechanisms from the point of view of functioning in the ship and crane drives." *Vestnik Gosudarstvennogo universiteta morskogo i rechnogo flota imeni admirala S.O. Makarova* 9.1(2017): 165–175. DOI: 10.21821/2309-5180-2017-9-1-165-175.

УДК 621. 830. 62

ИССЛЕДОВАНИЕ СВОЙСТВ ДИФФЕРЕНЦИАЛЬНЫХ МЕХАНИЗМОВ С ТОЧКИ ЗРЕНИЯ ФУНКЦИОНИРОВАНИЯ В СПЕЦИАЛЬНЫХ СУДОВЫХ И КРАНОВЫХ ПРИВОДАХ

Е. Н. Андрианов, А. Н. Иванов

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

Рассмотрены планетарные дифференциальные механизмы с числом степеней подвижности, равным двум, позволяющие передавать энергию либо от входного вала к двум выходным, либо от двух

входных валов к выходному валу. В первом случае дифференциальный механизм выполняет функции распределительного механизма, а во втором — функционирует как суммирующий или, другими словами, как объединительный механизм. Поскольку в приводе дифференциальный механизм с одинаковым конструктивным параметром может работать как с функцией разделения, так и с функцией суммирования потоков мощности, в работе, на основе известного графоаналитического метода Лесохина–Крейнеса, дополненного проф. В. Н. Прокофьевым рассмотрением энергетических уравнений, в процессе исследования было получено новое решение. Это решение отличается от известного тем, что применительно к задаче синтеза подобных механизмов оно исключает неопределенность в реализации функций разветвления (суммирование или разделение) потоков мощности. Для внесения определенности в решение задачи синтеза выделены области рационального существования дифференциальных механизмов, а для каждой определенной области изменения параметров механизма получены аналитические решения, реализующие требуемое передаточное отношение с заданным распределением мощности по потокам. Показано, что требуемое передаточное отношение привода можно получить при различных значениях конструктивного параметра планетарного однорядного механизма. На конкретных примерах рассматривается свойство изменения передаточного отношения привода в случае переключения с дифференциального режима работы на работу в качестве планетарной замедлительной передачи и использование этого свойства на практике.

Ключевые слова: планетарный механизм, дифференциальный механизм, планетарная передача, система CODAG, механизм подъема, механизм поворота, суммирующий редуктор, распределитель моментов, конструктивный параметр.

Для цитирования:

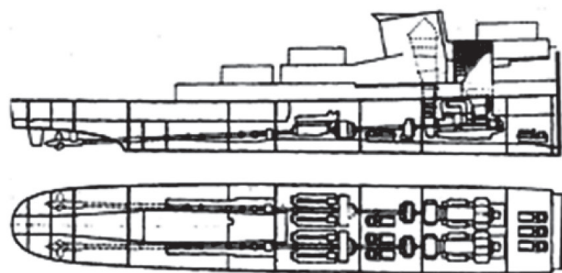
Андреанов Е. Н. Исследование свойств дифференциальных механизмов с точки зрения функционирования в специальных судовых и крановых приводах / Е. Н. Андреанов, А. Н. Иванов // Вестник Государственного университета морского и речного флота имени адмирала С. О. Макарова. — 2017. — Т. 9. — № 1. — С. 165–175. DOI: 10.21821/2309-5180-2017-9-1-165-175.

Введение

После выхода из господствующего в СССР периода научно-технического застоя вновь актуальной стала необходимость создания мощных приводов, управляющих движением судовых и крановых машин. Успешному решению задач их проектирования, безусловно, будет способствовать разработка проекта российской технологической платформы развития инновационных технологий в машиностроении. Прежде всего это касается вопросов создания заводов - изготовителей и их технологического оснащения современным металлообрабатывающим оборудованием и контрольно-измерительным комплексом. Учитывая решение руководства страны уделять задаче импортозамещения повышенное внимание, можно надеяться, что задача импортозамещения редукторов специального и особенно общемашиностроительного назначения будет успешно решена в ближайшие годы.

При создании дифференциальных приводов широко используются планетарные механизмы, позволяющие получать компактные энергоемкие машины. Приведем лишь несколько примеров. На рис. 1 представлена комбинированная дизель-газотурбинная энергетическая установка (ДГТУ) с двумя дизелями и одной газовой турбиной системы CODAG [1], [2] сторожевого корабля типа «Köln». Расположение главных механизмов в машинном отделении (вид сбоку и план трюма) показано на рис. 1, а, конструктивная схема передачи ДГТУ с двумя дизелями и ускорительным ГТД — на рис. 1, б. Дизели подключены к валам 6 и через гидродинамические муфты 5 связаны с суммирующим редуктором внешнего зацепления 4, газовая турбина подключена к валу 1. Тормозное устройство с гидроприводом 3 эпицикла включается на экономичном ходу, аналогичное тормозное устройство 7 эпицикла второго ряда включается на полном ходу. ГТД работает на винт при включенном тормозном устройстве 2 эпицикла планетарного редуктора с передаточным числом 9,55 и массой 17 т.

а)



б)

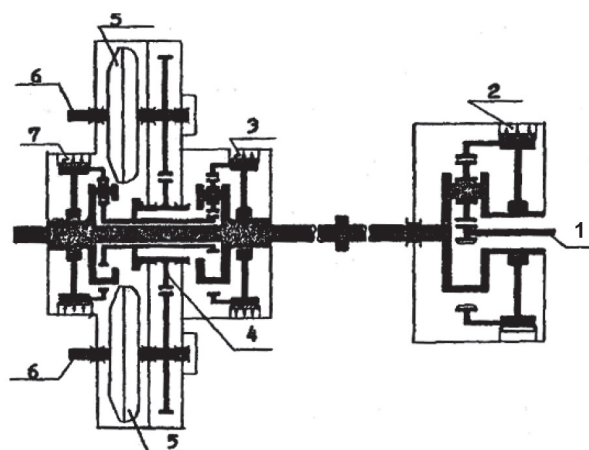


Рис. 1. Комбинированная дизель-газотурбинная корабельная энергетическая установка с двумя дизелями и одной газовой турбиной системы CODAG:

а — расположение механизмов в машинном отделении; б — конструктивная схема

В схеме ДГТУ (рис. 2), запатентованной инженером Штокихтом (ФРГ) [3], при одинаковом количестве тормозных устройств используется две планетарные ступени вместо трех, установленных на кораблях типа «Köln». При отключенном двигателе ни на одном из режимов работы его планетарная ступень не вращается в холостую. На экономическом ходу работает лишь ступень, эпицикл которой приводится от колеса суммирующего редуктора дизелей (включен тормоз 3). При этом газотурбинный двигатель (ГТД) может быть запущен на холостом ходу (2 — отпущен). Для перехода на режим полного хода включается тормоз 2. Передаточное число от дизелей к винтам регулируемого шага (ВРШ) автоматически уменьшается, так как *ступень из планетарной превращается в дифференциальную*, в которой солнечная шестерня и эпицикл вращаются в одном направлении, суммируя мощности на водиле. При отключении дизелей и затормаживании эпициклов их ступеней ход корабля обеспечивается ГТД с пониженной скоростью, так как передаточное отношение от ГТД до ВРШ при этом больше, чем при совместной работе дизелей и ГТД.

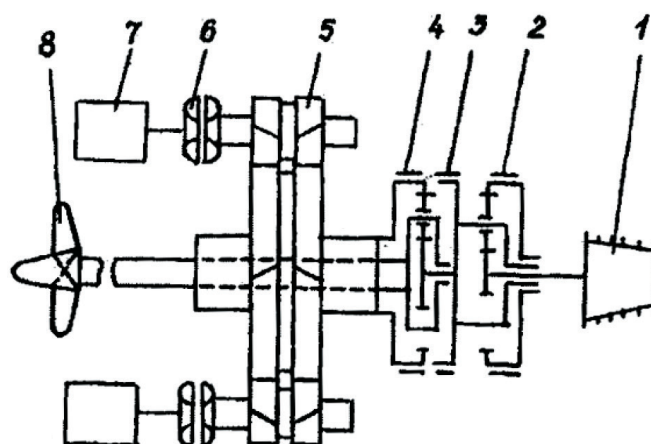


Рис. 2. Комбинированная дизель-газотурбинная корабельная энергетическая установка конструкции инж. Штокихта (ФРГ) с двумя дизелями и одной газовой турбиной:

- 1 — ГТД; 2 — планетарный редуктор ГТД с тормозом эпицикла;
3, 4 — планетарная ступень, соответственно, при работе дизелей и отключенном ГТД или при работе ГТД и отключенных дизелях;
5 — суммирующий редуктор внешнего зацепления;
6 — гидромuftа; 7 — дизель; 8 — ВРШ

В механизме главного подъема мостового крана большой грузоподъемности планетарный механизм привода системы *SEWEURODRIVE* (рис. 3, *а*) при работе двух двигателей (валы *а* и *б* вращаются в одну сторону) работает как дифференциальный и суммирует на водиле *h* мощности работающих двигателей. При остановке одного двигателя планетарный механизм работает как планетарная передача, воспроизводя в два раза большее передаточное отношение. Таким образом, подобный привод позволяет простым способом обеспечить получение двух скоростей. В механизме поворота портального перегрузочного крана «Новороссиец» планетарный механизм, включенный в последнюю выходную ступень редуктора, работает как дифференциальный и распределяет поровну мощность приводного двигателя между двумя его выходными валами *h* и *б* (рис. 3, *б*).

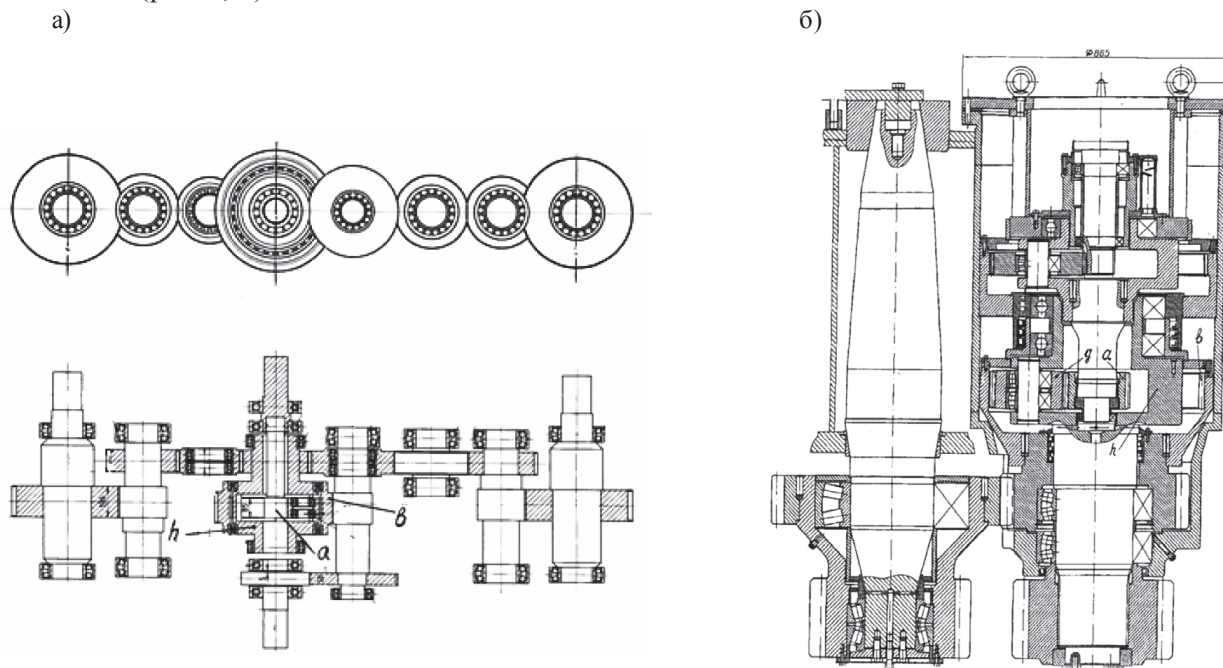


Рис. 3. Дифференциальные механизмы в крановых приводах:

а — суммирующий механизм, обеспечивающий получение двух скоростей на выходных валах;
б — распределительный механизм на два выходных вала

Основная часть

Из приведенных ранее конкретных примеров видно, что в приводах исследуемого типа дифференциальные механизмы одной группы работают с различными функциями разветвления. Целью настоящего исследования является, во-первых, определение условий, при которых происходит заданное разветвление (суммирование или разделение) потоков мощности и, во-вторых, определение рационального значения параметра дифференциального механизма, определяющего заданное разветвление.

Решение первой задачи во многом определяется типом дифференциального механизма, в качестве которого в принципе могут быть использованы различные схемы планетарных механизмов [3], [4]. Опираясь на российский опыт создания подобных устройств и изучая все многообразие конструкций планетарных судовых и крановых передач и их схемно-конструктивных решений, созданных европейскими производителями и во многом определяющих процесс и принципы проектирования передач подобного типа, следует отметить, что в конструкциях судовых и крановых приводов при создании рациональной конструкции конкурентоспособного изделия используются планетарные однорядные механизмы $2kh$ типа *A* (по классификации работ [5] – [7]).

Об этом, в частности, свидетельствуют и конструкции, рассмотренные выше. Заметим, что в технике приводов, использующих планетарный механизма $2kh$ типа A (рис. 4), его конструктивный параметр p , используемый в инженерных задачах и равный отношению чисел зубьев $p = z_b / z_a$, ограничен (здесь z_a и z_b — число зубьев центральных колес a и b). Исходя из геометрических возможностей, можно принять $1,5 \leq p \leq 11$ [6] – [8]. Однако по конструктивным причинам, связанным, в частности, с недостаточным диаметром оси сателлита, используемой для его опоры при малых p , или с пониженной крутильной жесткостью центрального колеса a , при высоких значениях p , интервал значений сужают: $2 \leq p \leq 8$. Более того, при конструировании выбор значения p подчиняют требованиям компоновки привода: например, если через внутреннее отверстие центрального колеса a должен проходить вал соседней ступени (см. рис.1) параметр p ограничивают значением $p \leq 3$ [6]. Во всех конструкциях исследуемого типа число сателлитов g принято равным трем. Исключение составляет шестисателлитный механизм лебедки для установки якорей (Норвегия) — рис. 4, б. Однако с увеличением числа сателлитов уменьшается значение параметра p (так, при шести сателлитах оно равно примерно 2,3).

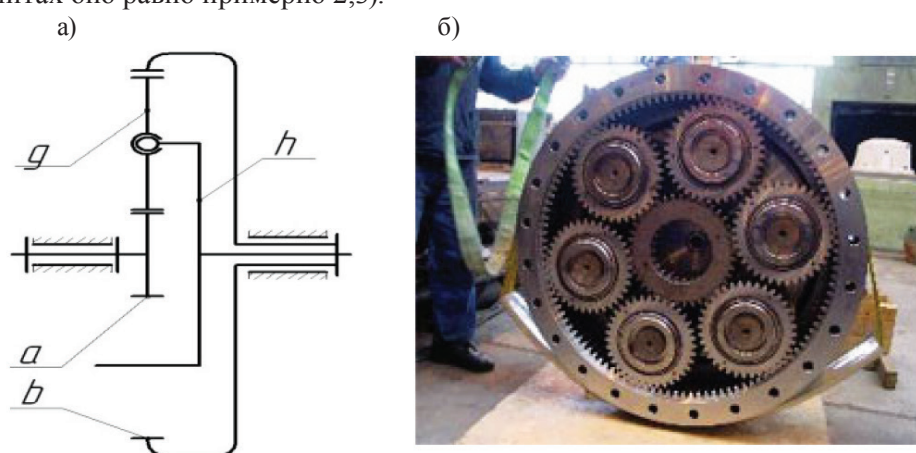


Рис. 4. Планетарный механизм $2kh$ типа A : а — принципиальная схема механизма; б — шестисателлитный механизм выходной ступени редуктора привода лебедки для установки якорей (Норвегия)

Для определения условий, при которых происходит заданное разветвление потоков мощности проф. В. Н. Прокофьев, изучая характеристические свойства однорядного механизма [10], развил графоаналитический подход Лесохина–Крейнеса совместным рассмотрением кинематических и динамических уравнений. К сожалению, неизвестность на стадии проектирования значения конструктивного параметра не позволяет воспользоваться полученными результатами.

Решение второй задачи являлось объектом рассмотрения ряда авторов. Проф. А. Ф. Крайнев рассматривал вопросы проектирования разветвленных передач [8], в публикации [4] были исследованы свойства суммирующего электропривода, правда, на параметрах, которые не определяют их в явном виде; проф. С. О. Барышников [11] изучал геометрические свойства однорядного механизма на предмет создания его оценочных критериев, а также другие авторы занимались изучением подобных вопросов. К настоящему времени разработка данных вопросов не завершена и требует дальнейшего развития и совершенствования.

В данной работе, основанной на исследовании профессора В. Н. Прокофьева, предложен иной способ решения, учитывающий не только кинематические характеристики привода, но и специфические вопросы, характерные для разветвленных передач, а также свойства конструкции планетарного механизма. Для решения первой задачи синтеза специальных судовых и крановых приводов используем графическое представление уравнений относительных кинематических [6], [8], [11] и энергетических связей [9] между звеньями дифференциального механизма, имеющего при двух независимых звеньях две степени свободы [11], [12].

$T_a : T_b : T_h = 1 : p : -(1+p)$. Принимая мощность на одном из звеньев за положительную единицу измерения, уравнения относительных мощностей имеют следующий вид:

$$\overline{P}_a = 1; \overline{P}_b = p\overline{\omega}_b = (1+p)\overline{\omega}_h - 1; -\overline{P}_h = (1+p)\overline{\omega}_h.$$

На рис. 5 мощность $\overline{P}_a = 1$ показана в виде горизонтальной прямой $C1$, проходящей через единичную точку C в осях координат $\overline{\omega}_h - P_i$, где $i \in \{a, b, h\}$. Прямая $-\overline{P}_h$ проходит через начало координат при $\overline{\omega}_h = 0$ и точку L_1 при $\overline{\omega}_h = OL = 1/(1+p)$, в которой $-\overline{P}_h = 1$. Из равенства $\sum P_i = 0$ следует $\overline{P}_b = -\overline{P}_h - \overline{P}_a$, поэтому величина относительной мощности определяется вертикальным расстоянием между прямыми $\overline{P}_a = 1$ и $-\overline{P}_h$. Это расстояние считается положительным, если оно отсчитывается от горизонтали $\overline{P}_a = 1$ вверх, и отрицательным при его отсчете от горизонтали вниз. Рассмотрение данного рисунка позволяет выделить интервалы, определяющие особенности функционирования дифференциального механизма $2kh$ типа A .

При $\overline{\omega}_h = OL > 1/(p+1)$ имеет место *интервал Σ_h суммирующих механизмов*, в котором $P_a > 0$, $P_b > 0$ и $P_h < 0$, т. е. мощность подводится к основным звеньям a и b и при суммировании снимается с водила h (рис. 6, а). При $0 < \overline{\omega}_h < 1/(p+1)$ имеет место *интервал R_a распределительных механизмов*, в котором $P_a > 0$, $P_b < 0$ и $P_h < 0$, т. е. мощность, подводимая к основному звену a , распределяется между звеньями b и h (рис. 6, б). При $\overline{\omega}_h < 0$ получаем *интервал Σ_b другого суммирующего механизма*, в котором $P_a > 0$ и $P_h > 0$, $P_b < 0$, т. е. мощность подводится к основным звеньям a и h и при суммировании снимается с эпицикла (рис. 6, в).

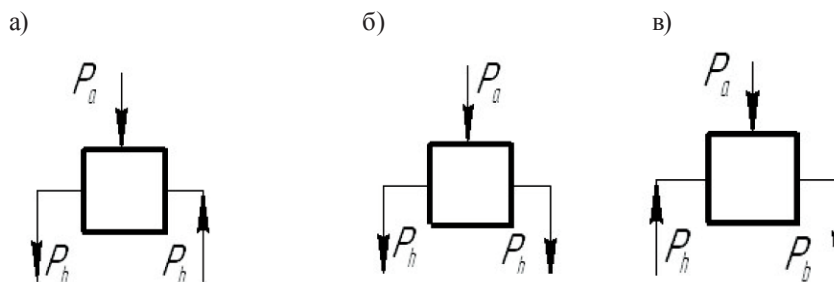


Рис. 6. Схемы потоков мощности:
а — интервал Σ_h ; б — интервал R_a ; в — интервал Σ_b

Если рис. 5 дополнить линиями $p = 1,5$ и $p = 8$, соответствующими целесообразным граничным значениям конструктивного параметра, то можно заметить неопределенность, с которой сталкивается проектировщик в реализации возможностей дифференциального механизма. В качестве примера возможностей попробуем реализовать передаточное отношение $i = 1/\overline{\omega}_h = 5$, которому отвечает вертикальная прямая, проходящая через точки L и L_1 .

Во-первых, как видно из рис. 5, двигаясь от оси абсцисс вверх, реализуется суммирующий механизм с заданным передаточным отношением, а двигаясь от оси абсцисс вниз — реализуется распределительный механизм. Во-вторых, заданное передаточное отношение в каждом интервале может быть реализовано при различных значениях конструктивного параметра. Таким образом, исследования работы [9] не дают описания всех возможных вариантов и не определяют оптимального значения конструктивного параметра. Причина состоит в том, что отмеченные выше интервалы выделены для конкретного значения параметра p , являющегося искомым при проектировании. Очевидно, что практическое использование свойств дифференциального механизма с целью раскрытия неопределенности в решении задачи синтеза, требует анализа процессов в разветвленных передачах, выполненного далее.

Для решения этих задач нами были построены области рационального существования (ОРС) дифференциального механизма в выделенных интервалах. Для этого в уравнении (1) конструктивный параметр был ограничен значениями, соответствующими интервалу $(1,5 \dots 2) \leq p \leq 8$, что позволило выделить три области (интервала): интервал R_a распределительного механизма, интервал Σ_h суммирующего механизма с положительным передаточным отношением, интервал Σ_b суммирующего механизма с отрицательным передаточным отношением.

Интервал R_a распределительного механизма. В этом интервале звено b должно иметь направление вращения противоположное направлению вращения входного звена [13]. Заданное передаточное отношение i_{AB} , например, равное 16, как видно, может быть реализовано при любом значении конструктивного параметра (рис. 7, а). Для выбора оптимального значения на ОРС нанесена линия $P_b = P_h$ равного распределения мощности, подводимой к входному валу A (связано со звеном a), между выходными валами привода B (связано со звеном h) и вторым выходным валом, связанным с эпициклом b .

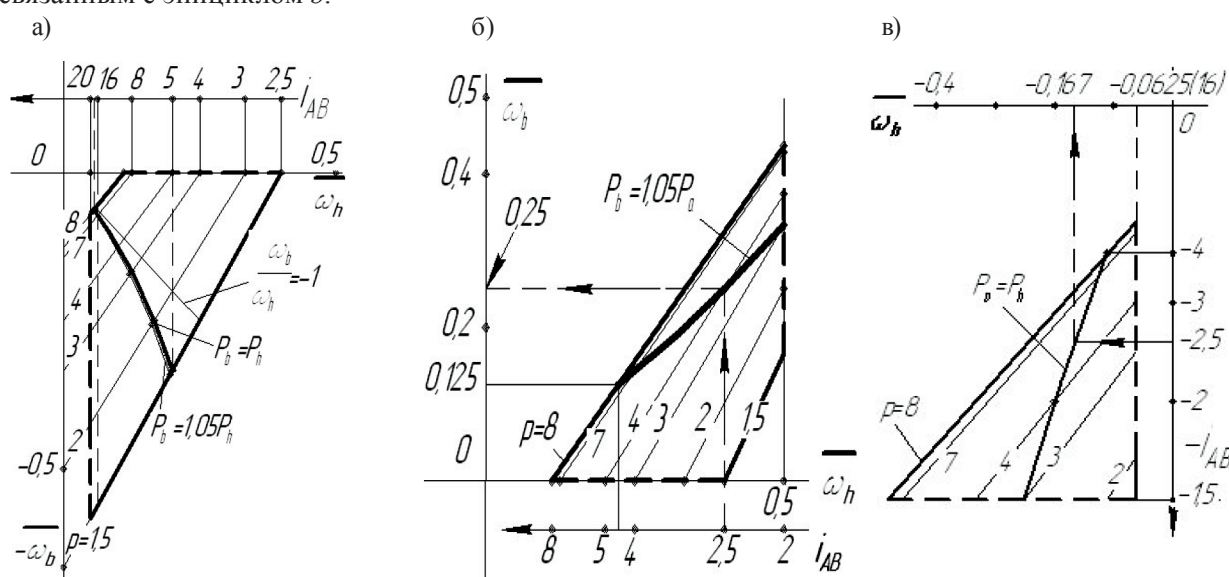


Рис. 7. Область рационального существования дифференциального механизма:

а — распределительный механизм (интервал R_a); б — суммирующий механизм с положительным передаточным отношением (интервал Σ_h); в — интервал Σ_b

Вводя ограничение равного распределения мощностей, передаточное отношение привода, удовлетворяющее данному условию, находится в диапазоне от 5 (при $p = 1,5$) до 18 (при $p = 8$). Задавая $P_b = kP_h$, где k — коэффициент распределения мощности между выходными валами, выбираемый проектировщиком, получим аналитическое решение, определяющее оптимальное значение конструктивного параметра:

$$p = \frac{i_{AB}}{1+k} - 1. \quad (3)$$

Здесь передаточное отношение i_{AB} определяется по известной частоте вращения валов двигателя и потребителя, т. е. $i_{AB} = i_{ah} = n_a/n_h$. Передаточное отношение привода при работе в интервале R_a увеличивается по сравнению с работой механизма в качестве планетарной передачи с остановленным звеном b . Линия $\omega_b/\omega_h = -1$ показывает условия использования однорядного механизма для вращения двух выходных валов с равными скоростями в противоположные стороны. При этом на основании условий равновесия момент сопротивления на водиле будет больше, чем на эпицикле.

Интервал Σ_h суммирующего механизма с положительным передаточным отношением. Для выбора оптимального значения конструктивного параметра при одинаковых двигателях

на ОРС нанесена линия $P_b = P_a$ равных мощностей, подводимых к входному валу A , связанному со звеном a , и второму входному валу привода, связанному с эпициклом b (рис. 7, б). Данные мощности суммируются на выходном валу B , связанном со звеном h . Равенство подводимых мощностей ограничивает передаточное отношение привода, которое находится в диапазоне от двух (при $p=3$) до 4,5 при ($p=8$). В общем случае, задавая $P_b = k_1 P_a$, где k_1 — коэффициент распределения мощности между входными валами, выбираемый проектировщиком, получим аналитическое решение, определяющее оптимальное значение конструктивного параметра:

$$p = i_{AB}(1 + k_1) - 1. \quad (4)$$

При $k_1=1$ (работают одинаковые двигатели) получим более простое равенство $p = 2i_{AB} - 1$. Укажем на некоторые особенности функционирования дифференциального механизма в исследуемом интервале на примере реализации передаточного отношения $i_{AB} = 2,5$. Из равенства (4) при $k_1=1$ находим $p = 4$, а из равенства (1) при $\overline{\omega}_h = 1/i_{AB}$ находим $\overline{\omega}_b = 0,25$. Пример позволяет отметить следующие особенности.

Во-первых, при работе дифференциального механизма в качестве планетарной передачи с остановленным звеном b передаточное отношение i_{AB}^b привода окажется при значении $p = 4$ $i_{ab}^b = 1 - i_{ab}^h = 1 + p = 5$, т. е. больше в два раза. Это свойство дифференциального механизма широко используют в крановых механизмах, создавая привод, который обеспечивает низкую скорость при работе с грузом и высокую скорость (выше в два раза) при работе механизма без груза (см. рис. 3, а); в судовых приводах переход механизма из режима планетарной передачи в режим дифференциального механизма используют для перехода движения судна из режима экономичного хода в режим полного хода.

Во-вторых, звено b имеет скорость вращения по отношению к входному солнечному колесу ниже в $1/\overline{\omega}_b = p$ раз, т. е. в данном примере ниже в четыре раза; при одинаковой частоте вращения приводных двигателей это потребует применения между двигателем и звеном b замедлительной передачи с общим передаточным отношением, равным p (см. рис. 3, а).

Как видно, полученное аналитическое решение определяет также и схему привода, и параметры ее дополнительных передач. В исследуемом интервале звенья a и b вращаются в одном направлении со звеном h , уменьшая передаточное отношение привода по сравнению с работой механизма в качестве планетарной передачи. На ОРС нанесена также линия $P_b = 1,05P_a$, которая показывает, что при подборе параметра p с точностью до 2 % различие в мощностях не превышает 5 %.

Интервал Σ_b суммирующего механизма с отрицательным передаточным отношением. Аналитическое решение, определяющее оптимальное значение конструктивного параметра при $P_h = k_2 P_a$, будет выражено в виде равенства $p = -i_{AB}(1 + k_2)$. При $k_2=1$ (работают двигатели одинаковой мощности) получим более простое равенство $p = -2i_{AB}$. Сопоставив рис. 7, в и рис. 7, б, можно сделать вывод о том, что суммирующий механизм в данном интервале реализует тот же диапазон передаточного отношения, но при больших значениях конструктивного параметра дифференциала и передаточного числа замедлительной передачи. Вследствие этого проектировщик получит привод с меньшим значением коэффициента полезного действия и с большими массогабаритными показателями. Думается, что на этих основаниях данный суммирующий механизм не находит применения в технике привода исследуемого типа.

Выводы

1. При создании силовых дифференциальных приводов судовых и крановых машин, работающих в редукторном режиме, широко используются планетарные механизмы, позволяющие создавать компактные энергоемкие машины. Распространение получили планетарные механизмы с одновенцовым сателлитом, несмотря на то, что для них не характерны большие передаточные отношения, а также близкие к нулю или единице. Другие типы механизмов приводят к усложне-

нию конструкции и увеличению массогабаритных параметров. На этом основании в статье рассмотрены приводы, построенные на базе одного однорядного планетарного механизма. Это формирует наиболее простое и надежное в конструктивном отношении устройство, хотя исследования, проведенные в статье, применимы и к дифференциальным механизмам другого типа, а также к другим более сложным устройствам.

2. Поскольку в приводах дифференциальные механизмы одной группы могут работать с различными функциями разветвления (суммирование или разделение) потоков мощности определены условия, при которых происходит заданное разветвление. Для этого в статье использован графоаналитический подход Лесохина–Крейнеса, дополненный В. Н. Прокофьевым рассмотрением энергетических уравнений. Проведенные исследования позволили определить области рационального существования и предложить простые аналитические решения, в основу которых положена предпосылка о том, что распределение мощностей по потокам разветвленной передачи задается проектировщиком.

3. На примерах показано, как изменяется передаточное отношение привода при переключении механизма из работы в дифференциальном режиме в режим работы в качестве планетарной передачи.

4. Проведенное исследование позволяет с незначительной затратой времени находить рациональную схему и оптимальные значения передаточного отношения для каждого режима функционирования дифференциального механизма и будет способствовать созданию продукции, конкурентоспособной на мировом рынке.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Державец Ю. А.* Планетарные редукторы в судовых дизельных и комбинированных дизель-газотурбинных установках / Ю. А. Державец, П. Н. Полуканин // Судостроение. — 1965. — № 11. — С. 38–43.
2. Планетарные передачи судовых энергетических установок. — СПб.: ЦНИИ «Румб», 1974. — 138 с.
3. *Андрианов Е. Н.* Особенности проектирования и расчета механизмов вращения порталных кранов / Е. Н. Андрианов, А. Н. Иванов // Вестник Государственного морского университета морского и речного флота имени адмирала С. О. Макарова. — 2013. — № 1 (20). — С. 46–56.
4. *Марголин Ш. М.* Дифференциальный электропривод. — М.: Энергия, 1975. — 168 с.
5. *Бильдюк Н. А.* Детали машин: учебник / Н. А. Бильдюк, С. И. Каратушин, А. Л. Филипенков [и др.]; под общ. ред. В. Н. Ражикова. — СПб.: Политехника, 2015. — 695 с.
6. *Кудрявцев В. Н.* Планетарные передачи: справочник / В. Н. Кудрявцев, Ю. Н. Кирдяшев, Ю. А. Державец [и др.]. — Л.: Машиностроение, 1977. — 536 с.
7. *Кирдяшев Ю. Н.* Проектирование сложных зубчатых механизмов / Ю. Н. Кирдяшев, А. Н. Иванов. — Л.: Машиностроение, 1973. — 352 с.
8. *Волков Д. П.* Планетарные, волновые и комбинированные передачи строительных и дорожных машин / Д. П. Волков, А. Ф. Крайнев. — М.: Машиностроение, 1968. — 272 с.
9. *Прокофьев В. Н.* Основы теории гидромеханических передач / В. Н. Прокофьев. — М.: Машгиз, 1957. — 420 с.
10. *Барышников С. О.* Исследование планетарного однорядного механизма с точки зрения геометрии зацепления / С. О. Барышников // Машиноведение. — 2000. — № 5. — С. 117–123.
11. *Крейнес М. А.* Зубчатые механизмы. Математические основы выбора оптимальных схем / М. А. Крейнес, М. С. Розовский. — М.: Изд-во МГУ, 1965. — 336 с.
12. *Коловский М. З.* Теория механизмов и машин: учеб. пособие для студ. вузов / М. З. Коловский, А. Н. Евграфов [и др.]. — 2-е изд., испр. — М.: Изд. центр «Академия», 2008. — 560 с.
13. *Андрианов Е. Н.* Общие вопросы проектирования схем конкурентоспособных распределительных механизмов крановых и судовых приводов / Е. Н. Андрианов, А. Н. Иванов // Вестник Государственного морского университета морского и речного флота имени адмирала С. О. Макарова. — 2016. — № 2 (36). — С. 118–126. DOI: 10.21821/2309-5180-2016-8-2-118-126.

REFERENCES

1. Derzhavets, Yu. A., and P. N. Polukanin. "Planetarnye reduktory v sudovykh dizel'nykh i kombinirovannykh dizel'-gazoturbinnnykh ustanovkakh." *Shipbuilding* 11(1965): 38–43.
2. *Planetarnye peredachi sudovykh energeticheskikh ustanovok*. Tsentral'nyi nauchno-issledovatel'skii institut «Rumb». 1974.
3. Andrianov, E. N., and A. N. Ivanov. "Features of designing and calculation of mechanisms of rotation of portal cranes." *Vestnik Gosudarstvennogo universiteta morskogo i rechnogo flota imeni admirala S. O. Makarova* 1(20) (2013): 46–56.
4. Margolin, Sh. M. *Differentsial'nyi elektroprivod*. M.: Energiya, 1975.
5. Bil'dyuk, N. A., S. I. Karatushin, A. L. Filipenkov, et al. *Detali mashin: uchebnik*. SPb.: Politehnika, 2015.
6. Kudryavtsev, V. N., Yu. N. Kirdyashev, Yu. A. Derzhavets, et al. *Planetarnye peredachi: spravochnik*. L.: Mashinostroenie, 1977.
7. Kirdyashev, Yu. N., and A. N. Ivanov. *Proektirovanie slozhnykh zubchatykh mekhanizmov*. L.: Mashinostroenie, 1973.
8. Volkov, D. P., and A. F. Krainev. *Planetarnye, volnovye i kombinirovannye peredachi stroitel'nykh i dorozhnykh mashin*. M.: Mashinostroenie, 1968.
9. Prokof'ev, V. N. *Osnovy teorii gidromekhanicheskikh peredach*. M.: Mashgiz, 1957.
10. Baryshnikov, Sergey Olegovich. "Research of planetary single-row mechanism from the point of view of gearing geometry." *Mashinovedenie* 5 (2000): 117–123.
11. Kreines, M. A., and M. S. Rozovskii. *Zubchatye mekhanizmy. Matematicheskie osnovy vybora optimal'nykh skhem*. M.: Izd-vo MGU, 1965.
12. Kolovskii, M. Z., A. N. Evgrafov, et al. *Teoriya mekhanizmov i mashin: uchebn. posobie dlya stud. vyssh. ucheb. zavedenii*. 2nd ed. M.: Izd. Tsentr «Akademiya», 2008.
13. Andrianov, Evgenij and Anatolij Ivanov. "General design issues of competitive schemes of distribution mechanisms of the crane and ship drives." *Vestnik Gosudarstvennogo universiteta morskogo i rechnogo flota imeni admirala S. O. Makarova* 2(36) (2016): 118–126. DOI: 10.21821/2309-5180-2016-8-2-118-126.

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

Андрянов Евгений Николаевич —
кандидат технических наук, профессор
ФГБОУ ВО «ГУМРФ имени
адмирала С.О. Макарова»
198035, Российская Федерация, Санкт-Петербург,
ул. Двинская 5/7
e-mail: fkt_pt@gumrf.ru
Иванов Анатолий Николаевич —
кандидат технических наук, доцент
ФГБОУ ВО «ГУМРФ имени
адмирала С. О. Макарова»
198035, Российская Федерация, Санкт-Петербург,
ул. Двинская 5/7
e-mail: fkt_pt@gumrf.ru

INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Andrianov, Evgenii N. —
PhD, professor
Admiral Makarov State University
of Maritime and Inland Shipping
5/7 Dvinskaya Str., St. Petersburg, 198035,
Russian Federation
e-mail: fkt_pt@gumrf.ru
Ivanov, Anatoly N. —
PhD, associate professor
Admiral Makarov State University
of Maritime and Inland Shipping
5/7 Dvinskaya Str., St. Petersburg, 198035,
Russian Federation
e-mail: fkt_pt@gumrf.ru

Статья поступила в редакцию 20 декабря 2016 г.
Received: December 20, 2016.

SYNTHESIS STRUCTURE OF FUNCTIONALLY-ORIENTED PROCESS OF CYLINDER LINERS MANUFACTURING BASED ON THE ANALYSIS OF MARINE DIESEL ENGINES WORK

A. V. Kostenko

Kamchatka State Technical University, Petropavlovsk-Kamchatsky, Russian Federation

In this paper is considered a way to solve the problem of increasing the quality parts of marine diesel engines based on the use of functionally-oriented technologies. The study of the operating conditions details is a distinctive feature functionally-oriented technologies from the traditional. The article analyzes the conditions of the stationary parts of marine diesel engines: the base frame, the crank case, the cylinder sleeve, the cylinder top. The loads acting on the parts, component malfunction and cause of component malfunction are given. It was revealed that the most stressed parts of the core is a marine diesel cylinder sleeve. It was shown that the functionally-oriented technology can significantly improve the quality of the manufacture of parts working in severe conditions, and more fully realize the potential of the details. In the work is shown and described total object-oriented model of the structure synthesis of the functionally -oriented process of manufacturing the cylinder sleeve. The design stages of technological processes of manufacture bushings is described - traditional and functionally -oriented. The synthesis stages of functionally-oriented technological process of the manufacturing the cylinder sleeve is given. Operational functions, acting on the sleeve are shown. The sleeve division process on functional elements is shown based on the depth of the division. It is indicated that in the next stage are assigned types and schemes of technological impacts. The paper notes the need to create three databases. The database №1 should contain a properties set of the sleeve functional elements, the base №2 - principles, methods and techniques of technological transformation, the base №3 - the scheme of technological impacts. The interaction databases is described. With the impact of technological schemes converts the product properties of the initial parameters in the final properties of the principles and methods.

These design features of functionally-oriented technologies have allowed to reveal their greatest advantage. They make it possible accurate selection process influences. They allow for the view, size and shape of the functional element, the value and type of loads acting on this element. This allows more fully use the potential of parts, improve the durability and reliability.

Keywords: marine diesel, functionally-oriented technology, cylinder sleeve, a functional element, an operational function, the technology impact.

For citation:

Kostenko, Andrey V. "Synthesis structure of functionally-oriented process of cylinder liners manufacturing based on the analysis of marine diesel engines work." *Vestnik Gosudarstvennogo universiteta morskogo i rechnogo flota imeni admirala S.O. Makarova* 9.1 (2017): 176–186. DOI: 10.21821/2309-5180-2017-9-1-176-186.

УДК 621

СИНТЕЗ СТРУКТУРЫ ФУНКЦИОНАЛЬНО-ОРИЕНТИРОВАННОГО ПРОЦЕССА ИЗГОТОВЛЕНИЯ ЦИЛИНДРОВЫХ ВТУЛОК НА ОСНОВЕ АНАЛИЗА РАБОТЫ СУДОВЫХ ДИЗЕЛЕЙ

А. В. Костенко

ФГБОУ ВО «Камчатский государственный технический университет»
Петропавловск-Камчатский, Российская Федерация

В работе рассмотрен способ решения задачи повышения качества деталей судовых дизелей на основе применения функционально-ориентированных технологий. Изучение условий эксплуатации деталей является отличительной особенностью функционально-ориентированных технологий от традиционных. В статье проанализированы условия работы неподвижных деталей судовых дизельных двигателей: фундаментной рамы, картера, втулки, крышки цилиндров. Приведены нагрузки, действующие

на детали, неисправности и причины неисправностей. Выявлено, что наиболее нагруженной деталью остова судового дизеля является цилиндровая втулка. Показано, что функционально-ориентированные технологии позволяют значительно повысить качество изготовления деталей, работающих в сложных эксплуатационных условиях, и более полно реализовать потенциал деталей. В работе приведена и описана общая объектно-ориентированная модель синтеза структуры функционально-ориентированного технологического процесса изготовления цилиндровой втулки. Описаны этапы проектирования технологических процессов изготовления втулок — традиционного и функционально-ориентированного. Представлены этапы синтеза функционально-ориентированного технологического процесса изготовления втулки: указаны эксплуатационные функции, действующие на втулку; показан процесс деления втулки на функциональные элементы, исходя из глубины деления. Указано, что на следующем этапе назначаются виды и схемы технологических воздействий. Кроме того, отмечена необходимость создания трех баз данных. База № 1 должна содержать набор свойств функциональных элементов втулки, база № 2 — принципы, методы и способы технологических преобразований, база № 3 — схемы технологических воздействий. Описано взаимодействие баз — с помощью схем технологического воздействия выполняется преобразование свойств изделия из начальных параметров в конечные свойства на основе принципов и методов.

Приведенные особенности проектирования функционально-ориентированных технологий позволили выявить их главное преимущество — возможность выбора технологических воздействий максимально точно, исходя из вида, размера и формы функционального элемента, а также величины и вида нагрузок, действующих на этот элемент. Все это позволяет более полно использовать потенциал деталей, а также повысить долговечность и надежность их работы.

Ключевые слова: дизель судовый, функционально-ориентированная технология, цилиндровая втулка, элемент функциональный, функция эксплуатационная, воздействие технологическое.

Для цитирования:

Костенко А. В. Синтез структуры функционально-ориентированного процесса изготовления цилиндрических втулок на основе анализа работы судовых дизелей / А. В. Костенко // Вестник Государственного университета морского и речного флота имени адмирала С. О. Макарова. — 2017. — Т. 9. — № 1. — С. 176–186. DOI: 10.21821/2309-5180-2017-9-1-176-186.

Введение

Дизельные двигатели внутреннего сгорания (ДВС) составляют основу энергетических установок на современных морских и речных судах. От надежности работы ДВС зависит общая надежность всего судна, что существенно в условиях длительных рейсов. Кроме того, поломки судовых ДВС приводят не только к простоям судна и убыткам предприятия, но и к затратам на ремонт, величина которых может быть довольно значительной. В свою очередь, надежность ДВС определяется надежностью всех деталей, из которых они состоят [1]. Функционально-ориентированные технологии (ФОТ) позволяют эффективно решить задачу повышения качества деталей судовых дизелей. Для реализации при помощи технологических воздействий соответствующих эксплуатационных свойств деталей необходимо тщательное изучение эксплуатационных функций, поэтому изучение служебного назначения деталей и условий эксплуатации (эксплуатационных функций) является одной из главных задач при проектировании процессов изготовления деталей на базе ФОТ [2], [3].

Целью статьи является анализ конструкции судовых дизелей, выявление работающих в наиболее тяжелых условиях неподвижных деталей, к которым применимы методы ФОТ, составление объектно-ориентированной модели синтеза структуры функционально-ориентированного процесса.

Анализ конструкции судовых дизелей

Двигатель внутреннего сгорания представляет собой сложную тепловую машину, для реализации целевой функции которой необходимо большое число агрегатов, сборочных единиц и деталей. Каждая составляющая при работе выполняет определенную функцию, что сопровождается действием нагрузок на детали. На рис. 1 представлена схема, описывающая устройство дизельного ДВС.

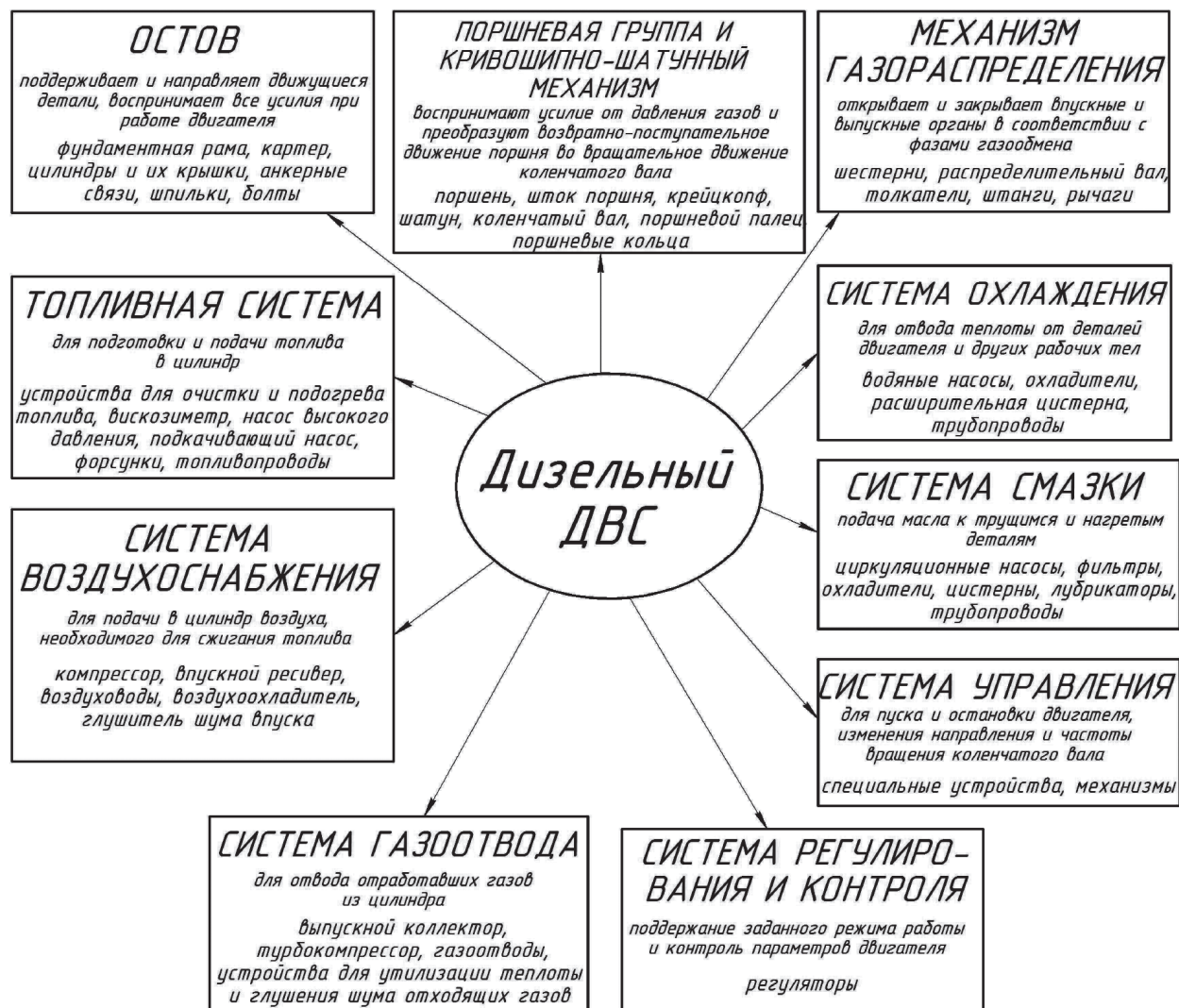


Рис. 1. Схема устройства дизельного ДВС

Из всех составляющих дизельного ДВС, представленных на рис. 1, наибольшим нагрузкам подвергаются детали поршневой группы, а также детали остова, кривошипно-шатунного механизма, механизма газораспределения, топливной системы и системы газоотвода. В данной работе будут детально рассмотрены детали остова с целью выявления деталей, работающих в наиболее сложных условиях эксплуатации.

Рассмотрим несколько работ, раскрывающих проблемы, которые возникают при решении задачи повышения надежности деталей судовых дизелей. В работе [4] исследованы случаи повреждения фундаментных рам судовых дизелей, имевших место при эксплуатации приемно-транспортных рефрижераторов. В работах [5] – [7] проанализированы неисправности узлов и деталей судовых дизелей, приведены примеры наиболее часто встречающихся неисправностей, указаны причины этих неисправностей. В работах [8] – [11] рассмотрены различные аспекты проблем эксплуатации цилиндровых втулок судовых дизелей. В частности, в работе [8] исследованы параметры, влияющие на долговечность цилиндровых втулок, указано, что наиболее распространенным видом отказа является образование трещин в галтели опорного бурта втулки; работа [9] посвящена изучению температурного нагружения втулок и способов его описания; в работе [10] рассмотрены особенности изнашивания в зоне «втулка цилиндра – верхнее компрессионное кольцо»; в работе [11] исследованы скорости изнашивания и тепловое состояние цилиндровых втулок

в районе продувочных окон. Отдельно следует отметить работу [3] в которой изложены основные положения функционально-ориентированных технологий.

Далее рассмотрены детали остова, указаны нагрузки, неисправности и их причины.

Фундаментная рама, являясь основанием для деталей остова, нагружена массой двигателя, силами давления газов, силами инерции поступательно движущихся и вращающихся масс. В табл. 1 приведены возможные неисправности фундаментной рамы и их причины.

Таблица 1

Неисправности фундаментной рамы и их причины

Возможные неисправности	Причины неисправностей
Трещины на постелях коренных подшипников, на плоскостях разъема, в силовых перегородках и в лапах для крепления	Перераспределение напряжений, механические повреждения
Повреждение поверхности под бурты вкладышей	Механические повреждения
Отклонение от прямолинейности, плоскостности опорных базовых поверхностей	Низкое качество обработки, разрушение опорных поверхностей или нарушение плотности прилегания опорных клиньев
Отклонение от соосности постелей под вкладыши коренных подшипников	Фреттинг-коррозия на поверхности постели, наклеп
Фреттинг-коррозия на постелях коренных подшипников	Микроскопическое возвратно-поступательное перемещение подшипников в постелях из-за ступенчатости постелей, повышенная влажность и наличие кислорода в картере

Картер подвергается растяжению от действия максимальной силы давления газов при отсутствии анкерных связей и сжатию усилием предварительной затяжки при наличии их, а также изгибу в крейцкопфных двигателях от действия нормального усилия. В табл. 2 приведены возможные неисправности картера и их причины.

Таблица 2

Неисправности картера и их причины

Возможные неисправности	Причины неисправностей
Нарушение опорной поверхности верхнего посадочного бурта, нижних посадочных поясов	Коррозия, механические повреждения
Сквозные трещины	Чрезмерные напряжения, механические повреждения
Трещины в опорных посадочных поясах	Чрезмерные напряжения, возникающие при работе дизеля
Риски, забоины на посадочных буртах	Механические повреждения
Местные очаговые разрушения на стенках полости охлаждения	Коррозия
Износ плоскостей разъема или наклеп на них	Неуравновешенность дизеля, длительная работа

Условия работы цилиндрических втулок определяются воздействием на них горячих газов, вызывающих большие механические и тепловые нагрузки; работой поршневых колец, приводящей к износу рабочей поверхности «зеркала»; дополнительному нагреву: коррозии и кавитационной эрозии со стороны охлаждающей воды. В табл. 3 приведены возможные неисправности цилиндрических втулок и их причины.

Таблица 3

Неисправности цилиндровых втулок и их причины

Возможные неисправности	Причины неисправностей
Трещины на втулке	Чрезмерные механические напряжения, резкое охлаждение
Откалывание верхнего посадочного бурта	Перекося втулки в блоке из-за низкой точности обработки, коррозии, попадания загрязнений под посадочную поверхность; отсутствие галтели в переходе опорного бурта вследствие чрезмерных сил при затяжке крышек цилиндров; свободное колебательное перемещение втулок в нижнем опорном бурту; неравномерное охлаждение
Износ и повреждение втулки со стороны охлаждения	Вибрационное разрушение от ударов поршня о втулку при переключке, коррозия от действия охлаждающей воды; покрытие поверхности смазочным материалом
Чрезмерный или неравномерный износ зеркала втулки	Нарушение центровки движения, монтажных зазоров, подачи топлива в цилиндр; коррозия; наличие статического электричества и вибрации; большое число пусков, низкий уровень обслуживания и ремонтов
Заедание поршня в цилиндре	Прорыв газов из камеры сгорания и «сдувание» масляной пленки; вибрационные колебания и температурное расширение острых кромок выпускных окон
Микрорадиры или микроизносы зеркала цилиндра	Попадание воды со смазочным маслом; недостаточное количество масла; окисление масляной пленки кислородом свежего заряда и продуктами сгорания и ее разрыв
Задирки зеркала втулки цилиндра	Отслаивание покрытия поршневых колец поршня, деформация втулки вследствие тепловых или механических нагрузок; закоксовывание поршневых колец; недостаток смазочного материала
Натиры на зеркале втулки цилиндра в районе выпускных окон	Коробление втулки около перемычек окон вследствие перегрева; перекося поршня, нарушение пленки смазочного материала
Деформация втулки	Действие неравномерных монтажных сил, ударных импульсов во время работы; неравномерное температурное воздействие
Ступенчатая выработка в зоне останковки верхнего поршневого кольца в верхней мертвой точке	Естественное изнашивание, неудовлетворительное смазывание зеркала цилиндра; несоответствие металла колец и втулки; низкое качество распыла и сгорания топлива
Выкрашивание азотированного слоя, появление цветов побежалости и коррозии	Перегрев вследствие заедания поршня в цилиндре
Кавитационное выкрашивание металла опорного бурта перпендикулярно опорной поверхности	Пульсирующее воздействие воды, водяных паров и воздуха с высокими температурой и давлением через относительно малый зазор вследствие отвода охлаждающей воды ниже опорного бурта
Откалывание кромок продувочных и выпускных окон	Заедание кромок поршневых колец за кромки окон, деформация втулки; попадание посторонних предметов или кусочков поломанных поршневых колец
Чрезмерная коррозия наружной поверхности втулки	Низкое качество воды для охлаждения дизеля; резкая смена температуры при переменных режимах

На крышки цилиндров действуют усилия от затяжки крышечных шпилек и переменного давления газов, а также высокая тепловая нагрузка. Крышки подвергаются воздействию больших механических и термических нагрузок. В табл. 4 приведены возможные неисправности крышек и их причины.

Таблица 4

Неисправности крышек и их причины

Возможные неисправности	Причины неисправностей
Трещины в дне крышки со стороны камеры сгорания	Температурные напряжения; работа без охлаждения крышек; неравномерная затяжка гаек
Трещины вокруг отверстия под форсунки или под пусковые клапаны	Установка холодной форсунки вместо дефектной: металл форсунки из-за нагрева расширяется и создает повышенные напряжения в теле крышки
Раковины, забоины, вмятины и риски на обрабатываемых поверхностях крышки	Механические повреждения
Смятие или другие повреждения посадочного бурта	Механические повреждения, прогары, коробление опорных поверхностей
Коррозия, выгорание и другие повреждения на опорном гнезде форсунки	Недостаточное охлаждение; низкое качество уплотнения

Причины неисправностей деталей, приведенных в таблицах, можно разделить условно на три группы: возникшие из-за нарушения технологии производства, при монтаже, при эксплуатации и техническом обслуживании. В табл. 1 – 4 не включен ряд неисправностей, возникающих в результате несоблюдения технологии производства или применения некачественных (несоответствующих) материалов, неправильной эксплуатации, монтажа. Анализ неисправностей и их причин позволяет уже на стадии проектирования технологического процесса изучить и учесть эксплуатационные особенности деталей, которые должны быть заложены в деталь для реализации ее потенциала.

Синтез структуры функционально-ориентированного технологического процесса

Функционально-ориентированные технологии направлены на значительное повышение качества изготовления деталей [1] – [3], [12]. Одно из главных отличий ФОТ от традиционных технологий заключается в скрупулезном исследовании условий эксплуатации деталей судовых агрегатов, что затем, на стадии реализации технологии, позволит более полно реализовывать потенциал деталей. Причем, в первую очередь, ФОТ рассчитаны на детали, работающие в сложных эксплуатационных условиях, подвергающиеся одновременно разным видам нагружения. Анализируя табл. 1 – 4, а также соответствующую литературу [4] – [11], можно сделать вывод о том, что цилиндровая втулка относится именно к таким деталям. Например, в верхней части втулки из-за более высоких температур и давлений износ больше. Однако наличие во втулках продувочных и выпускных окон может вносить изменения в вид кривых износа, как это показано на рис. 2 (повышенный износ в верхней части и увеличение износа в зоне окон).

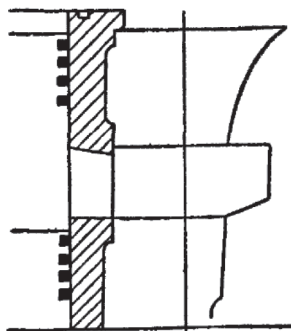


Рис. 2. Характер и величины кривой износа втулок



Рис. 3. Опорный бурт цилиндрической втулки двигателя типа ДКРН 74/160 [6]

Кроме того, для втулок цилиндров дизелей, установленных на судах Дальневосточного бассейна, наиболее распространенным видом отказа являлось образование трещин в галтели опорного бурта втулки (рис. 3) — в среднем 60 % от общего количества отказов [11]. Таким образом, на поверхности цилиндровой втулки есть места с различными видами и величинами нагрузок, что свидетельствует о необходимости изменения подхода в улучшении эксплуатационных свойств для более полной реализации потенциала втулки. Комплексное решение проблемы обеспечения надежности, долговечности деталей судовых агрегатов можно достигнуть путем применения ФОТ.

На рис. 4 представлена общая объектно-ориентированная модель синтеза структуры функционально-ориентированного технологического процесса (ФОП), направленного на обеспечение заданных, требуемых или предельных свойств функциональных элементов втулки и всей втулки в целом.

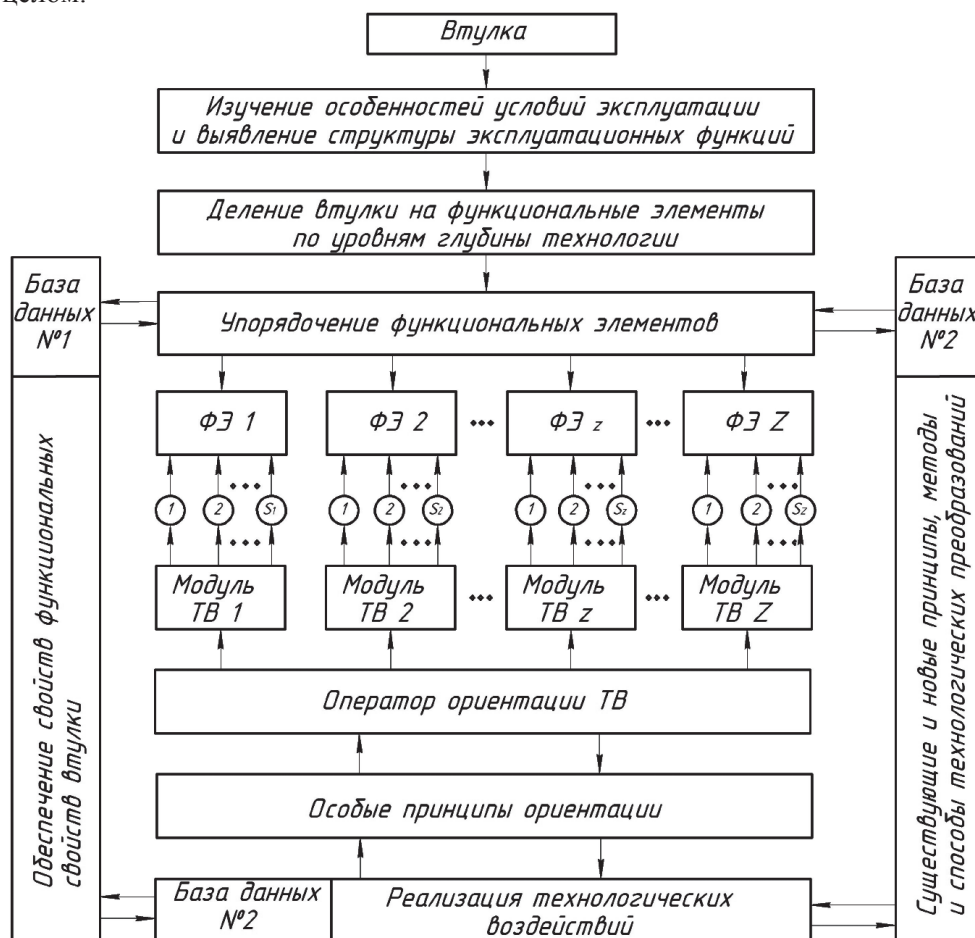


Рис. 4. Общая объектно-ориентированная модель синтеза структуры ФОП

Как видно из рис. 4, процесс синтеза структуры ФОП начинается с изучения особенностей эксплуатации изделия и выявления структуры эксплуатационных функций. Для цилиндровой втулки на уровне всей детали действуют [12]:

- напряжения растяжения и сжатия, возникающие от сил давления газов, а также из-за разности температур горячих газов и «холодной» охлаждающей жидкости;
- напряжения изгиба — от нормальной силы бокового давления поршня;
- напряжения сдвига — от сил затяжки шпилек;
- тепловая нагрузка — от температуры горячих газов;
- коррозионные процессы (коррозионно-кавитационные, кавитационно-эрозионные) — из-за взаимодействия с охлаждающей жидкостью.

Далее выполняется деление изделия на функциональные элементы по уровням глубины технологии: всего изделия в целом, частей изделия, составляющих частей изделия, зон, макрозон, микрозон, нанозон. Затем производится упорядочивание функциональных элементов изделия, которое может быть выполнено по различным параметрам для всего изделия в целом или / и для отдельных функциональных элементов: по пространственной форме, по геометрическим параметрам, по свойствам материала, по точности параметров, по эксплуатационным параметрам. В соответствии с этим множество функциональных элементов (ФЭ) делят на подмножества ФЭ1, ФЭ2, ..., ФЭz, ..., ФЭZ. И уже для каждого функционального элемента ФЭz формируется соответствующий модуль технологических воздействий $TB1, TB2, \dots, TBz, \dots, TBZ$. Модуль может содержать множество схем технологических воздействий $1, 2, \dots, s_z$.

Отметим в предлагаемой модели наличие трех баз данных. В базе № 1 содержится набор свойств функциональных элементов изделия, в базе № 2 накоплены принципы, методы и способы технологических преобразований, в базе № 3 — схемы технологических воздействий. С помощью схем технологического воздействия (база № 2) выполняется преобразование свойств изделия из начальных параметров в конечные свойства (база № 1) на основе принципов и методов (база № 2).

Базу № 1 можно представить как вектор $R^1 \in L$ требований и свойств детали, базу № 2 и базу № 3 — как векторы состояний технологической системы $R^2 \in M$ и $R^3 \in N$ (L, M, N — соответствующие области функциональных пространств). Т. е. первоначально генерируются возможные альтернативы технологических воздействий для обеспечения требуемых или заданных свойств деталей. Затем решается задача выбора альтернативы, которая будет наилучшей по соответствующим критериям. Таким образом, необходимо решение задачи многокритериальной оптимизации.

Традиционные технологические процессы изготовления втулок подразумевают наличие двух этапов: 1) деление втулки на исполнительные поверхности; 2) составление маршрута технологического процесса, придерживаясь общепринятой последовательности обеспечения свойств, полученных (или заданных) исполнительных поверхностей. Например, для втулки, показанной на рис. 5, а, обработка заготовки может состоять из следующих этапов (укрупнено): черновое растачивание и обтачивание; закалка, отпуск на воздухе; чистовое растачивание и обтачивание; сверление и фрезерование окон; азотирование внутренней поверхности; окончательное обтачивание; кадмирование наружной поверхности; хонингование внутренней поверхности втулки.

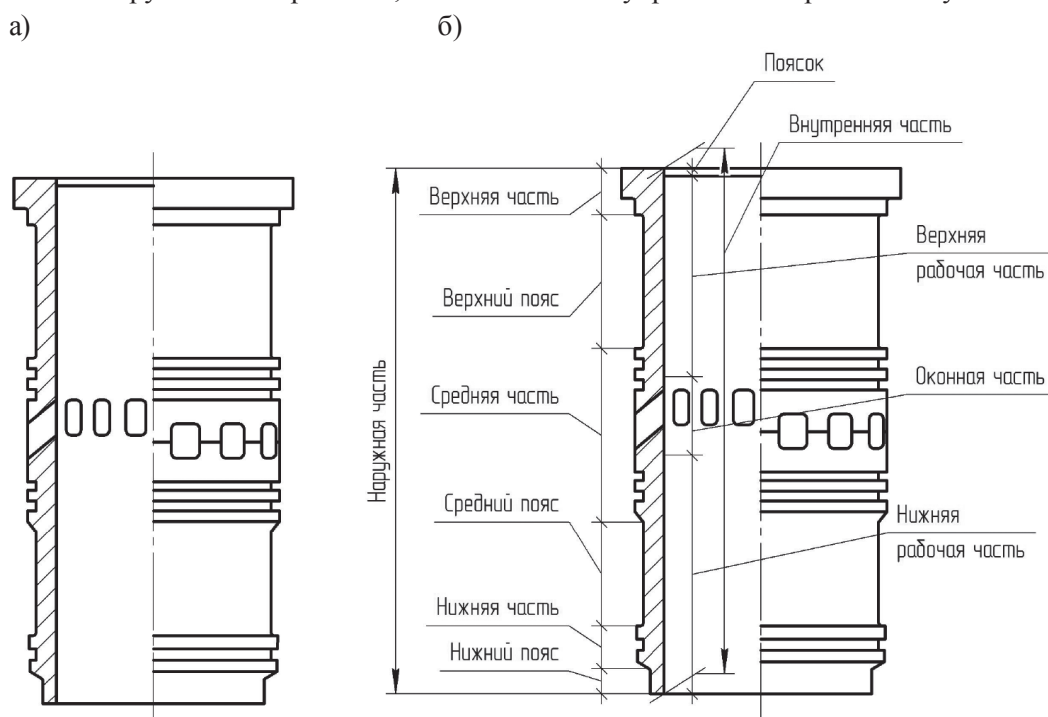


Рис. 5. Втулка двухтактного судового дизеля

Процесс синтеза функционально-ориентированного технологического процесса изготовления втулки выполняется в три этапа: 1) анализ эксплуатационных особенностей втулки; 2) деление втулки на функциональные элементы по уровням глубины технологии, создание структуры ФЭ; 3) составление схем технологического воздействия, разработка операций и др.

Ранее были показаны эксплуатационные особенности втулки: действующие силы, возникающие напряжения, тепловая нагрузка, коррозионные процессы, особенности изнашивания.

Рассмотрим деление втулки на функциональные элементы по уровням деления. Первый уровень соответствует уровню всей втулки, второй уровень — уровень частей втулки, третий — составляющие, четвертый — зоны. На рис. 5, б показана втулка, ее части (наружная, внутренняя) и составляющие. На рис. 6 представлен граф функциональных элементов цилиндрической втулки по уровням деления, в частности показано, что на 2-м уровне внутренняя часть (01.01) делится на четыре составляющих (01.01.01, 01.01.02, 01.01.03, 01.01.04), а наружная часть (01.02) втулки делится на шесть составляющих: 01.02.01, 01.02.02, 01.02.03, 01.02.04, 01.02.05, 01.02.06.

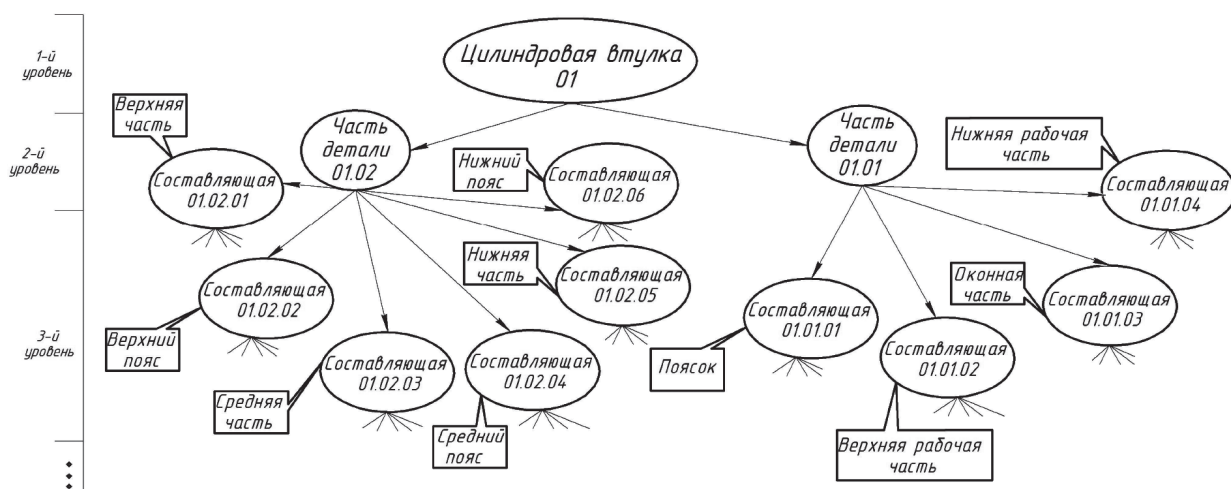


Рис. 6. Деление втулки на функциональные элементы на 1-, 2- и 3-м уровнях

При дальнейшем выполнении деления составляющие функциональные элементы делятся на зоны. На рис. 7 показано, что составляющий функциональный элемент 01.02.01 части 01.02 детали 01 делится на две зоны: 01.02.01.01, 01.02.01.02. Эти зоны в описательном виде можно представить следующим образом: верхняя поверхность (полоска), нижняя поверхность (полоска).

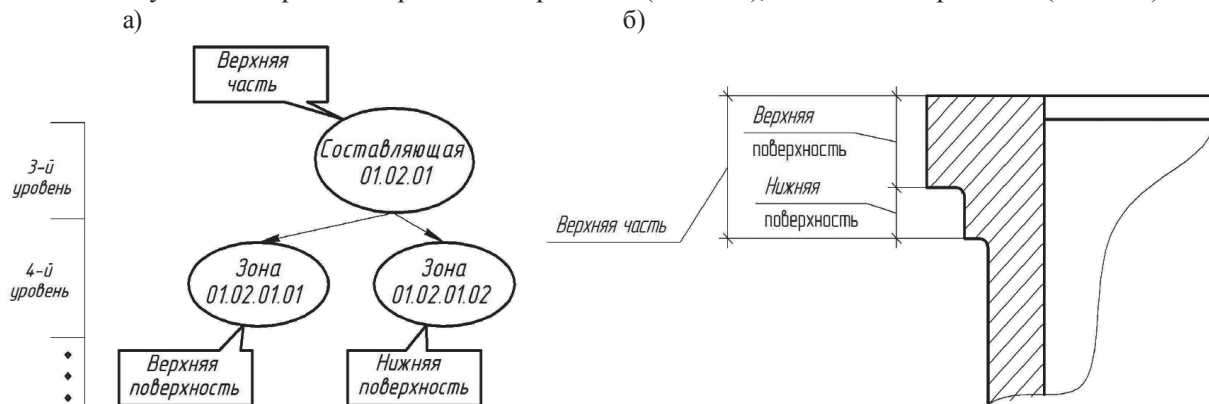


Рис. 7. Граф функциональных элементов составляющей «Верхняя часть» по уровням деления (а) и схема расположения зон на составляющей (б)

При необходимости и соответствующей возможности производства деление можно продолжать еще глубже, вплоть до наноуровня. Однако это не является обязательным, необходимо

ориентироваться на вид элемента, его назначение и способ обработки. Например, для черновой обработки втулки вполне достаточно рассматривать деталь на 1- или 2-м уровнях. При обработке средней части необходимо учитывать особенности обработки окон, поясков, галтелей и др. Значит, уровень детализации должен быть не меньше 4-го.

На третьем этапе после деления детали на функциональные элементы и составления структуры этих элементов разрабатываются виды и схемы технологического воздействия.

Заключение

Функционально-ориентированные технологии позволяют существенно повысить качество изготовления деталей. Это достигается за счет более детального рассмотрения условий работы как всей детали в целом, так и ее функциональных элементов, на которые, в зависимости от глубины или детализации, делится деталь. К каждому из выделенных элементов применяются схемы и виды технологических воздействий, реализация которых позволяет более полно использовать потенциал детали, повысить долговечность и надежность ее работы. Наиболее рационально использовать ФОТ для деталей, работающих в наиболее тяжелых условиях.

Выполненный в работе анализ работы неподвижных деталей дизельного двигателя выявил, что наиболее нагруженной как с точки зрения величины, так и характера нагрузки, является цилиндровая втулка. В частности, на поверхности цилиндровой втулки есть места с различными видами и величинами нагрузок, поэтому именно к ней необходимо применять функционально-ориентированные технологические режимы и способы обработки.

В работе приведена общая объектно-ориентированная модель синтеза структуры ФОП, иллюстрирующая три этапа синтеза структуры функционально-ориентированного технологического процесса. На первом этапе выполняется анализ эксплуатационных особенностей втулки, т. е. на основе анализа служебного назначения, условий работы и характерных неисправностей выявляется структура эксплуатационных функций. На втором этапе выполняется деление втулки на функциональные элементы по уровням глубины технологии: втулки в целом, частей втулки, составляющих частей втулки, зон, макрозон, микрозон, нанозон. На третьем этапе составляются схемы технологического воздействия, разработка операций и др.

Приведенные в работе особенности проектирования функционально-ориентированных технологий позволяют выявить их главное преимущество — возможность выбора технологических воздействий максимально точно, исходя из вида, размера и формы функционального элемента, а также величины и вида нагрузок, действующих на этот элемент.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Михайлов А. Н. Применение функционально-ориентированных технологий при производстве судовых двигателей внутреннего сгорания / А. Н. Михайлов, А. В. Костенко, А. В. Лукичев // Вестник Камчатского государственного технического университета. — 2015. — № 33. — С. 11–14. DOI: 10.17217/2079-0333-2015-33-11-14.
2. Михайлов А. Н. Общие принципы повышения эксплуатационных свойств деталей судовых агрегатов на базе функционально-ориентированных технологий / А. Н. Михайлов, А. В. Костенко // Фундаментальные и прикладные проблемы техники и технологии. — 2015. — № 6 (314). — С. 82–87.
3. Михайлов А. Н. Основы синтеза функционально-ориентированных технологий машиностроения: монография / А. Н. Михайлов. — Донецк: Изд-во ДонНТУ, 2009. — 346 с.
4. Соболенко А. Н. Исследование причин повреждений рамовых подшипников при вибрации и деформации упругих систем фундаментных рам ВДГ / А. Н. Соболенко // Научные труды Дальневосточного государственного технического рыбохозяйственного университета. — 2015. — Т. 35. — С. 97–102.
5. Крылов Е. И. Ремонт дизелей морских судов: справочник / Е. И. Крылов. — М.: Транспорт, 1987. — 302 с.
6. Судновий механік: довідник: у 3-х т. / за ред. А. А. Фока, д-р. техн. наук, суд. ст. механіка. — Одеса: Фенікс, 2008. — Т. 1. — 1036 с. (рос. мовою).
7. Возницкий И. В. Повреждения и поломки дизелей. Примеры и анализ причин / И. В. Возницкий. — 2-е изд., перераб. — СПб.: Моркнига, 2006. — 116 с.

8. Макаренков А. С. Повышение долговечности втулок цилиндров судовых дизелей: автореф. дис. ... канд. техн. наук: 05.08.04 / А. С. Макаренков. — Владивосток, 2002. — 23 с.
9. Зеббар Джаллел. Расчет температурного состояния цилиндрической втулки судового дизеля / Зеббар Джаллел, Б.С. Сатжанов // Вестник Астраханского государственного технического университета. — Серия: Морская техника и технология. — 2009. — № 1. — С. 151–155.
10. Пахомова Н. В. Износ втулки цилиндра и ее кавитационная стойкость / Н. В. Пахомова, А. В. Воробьев // Вестник Астраханского государственного технического университета. — Серия: Морская техника и технология. — 2014. — № 4. — С. 86–93.
11. Кучеров В. Н. Исследование теплового состояния и модернизация цилиндровых втулок двухтактного среднеоборотного двигателя с вращающимся поршнем / В. Н. Кучеров // Вестник Государственного университета морского и речного флота имени адмирала С. О. Макарова. — 2016. — № 4 (38). — С. 176–183. DOI: 10.21821/2309-5180-2016-8-4-176-183.
12. Костенко А. В. Особенности синтеза технологических процессов деталей судовых дизелей / А. В. Костенко // Прогресивні технології і системи машинобудування. — 2016. — № 1 (52). — С. 75–83.

REFERENCES

1. Mikhaylov, A. N., A. V. Kostenko, and A. V. Lukichov. “Application of function-oriented technologies in the manufacturing of marine internal-combustion engines.” *Vestnik Kamchatskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta* 33 (2015): 11–14. DOI: 10.17217/2079-0333-2015-33-11-14.
2. Mikhaylov, A. N., and A. V. Kostenko. “General principles increase of operational properties details of ship unit on the basis functional-oriented technology.” *Fundamentalnye i prikladnye problemy tekhniki i tekhnologii* 6(314) (2015): 82–87.
3. Mikhailov, A. N. *Osnovy sinteza funktsional'no-orientirovannykh tekhnologii mashinostroeniya: monografiya*. Donetsk: DonNTU, 2009.
4. Sobolenko, A. N. “The investigation of reasons of bedplate bearing damages when vibration and deformations are acting on elastic system of auxiliary engine bedplates.” *Nauchnye trudy Dal'nevostochnogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo rybokhozyaistvennogo universiteta* 35 (2015): 97–102.
5. Krylov, E. I. *Remont dizelei morskikh sudov: spravochnik*. M.: Transport, 1987.
6. Foka, A. A., ed. *Sudnovii mekhanik: dovidnik*. Odesa: Feniks, 2008. Vol. 1.
7. Voznitskii, I. V. *Povrezhdeniya i polomki dizelei. Primery i analiz prichin*. 2-d ed. SPb.: Morkniga, 2006.
8. Makarenkov, A. S. *Povyshenie dolgozhechnosti vtulok cilindrov sudovykh dizelej*. Abstract of PhD diss. (Tech.). Vladivostok, 2002.
9. Zebbar Gallel, and B. S. Satzhanov. “Account of temperatute condition of a cylinders cartridge of marine diesel engine.” *Vestnik of Astrakhan State Technical University. Series: Marine Engineering and Technologies* 1 (2009): 151–155.
10. Pakhomova, Nadezhda Vladimirovna, and Alexander Valentinovich Vorobyov. “Wear of cylinder liner and its cavitation resistance.” *Vestnik of Astrakhan State Technical University. Series: Marine Engineering and Technologies* 4 (2014): 86–93.
11. Kucherov, V. N. “Investigation heat load and modernization cylinder liner two stroke medium speed diesel engine with rotating piston.” *Vestnik Gosudarstvennogo universiteta morskogo i rechnogo flota imeni admirala S. O. Makarova* 4(38) (2016): 176–183. DOI: 10.21821/2309-5180-2016-8-4-176-183.
12. Kostenko, A. “The features of the technological process synthesis of the details of marine diesel.” *Progressivnye tekhnologii i sistemy mashinostroeniya* 1(52) (2016): 75–83.

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРЕ

Костенко Андрей Викторович —
кандидат технических наук, доцент
ФГБОУ ВО «Камчатский государственный
технический университет»
683003, Российская Федерация,
Петропавловск-Камчатский, ул. Ключевская, 35
e-mail: andr13kost@list.ru

INFORMATION ABOUT THE AUTHOR

Kostenko, Andrey V. —
PhD, associate professor
Kamchatka State Technical University
35 Klyuchevskaya Str.,
Petropavlovsk-Kamchatsky, 683003,
Russian Federation
e-mail: andr13kost@list.ru

*Статья поступила в редакцию 23 ноября 2016 г.
Received: November 23, 2016.*

DOI: 10.21821/2309-5180-2017-9-1-187-192

RESEARCH OF INTERACTION OF SEDIMENTATION AND CENTRIFUGAL SEPARATION

I. A. Ivanov

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

Preparation of fuel on a ship the method of sedimentation is considered in the article, after by the method of centrifugal separation. It is educed from a literary review, that in the questions of the use of sediment cisterns there is not single opinion in the system preparation of fuel. One authors consider sedimentation uneffective, other -efficiency third simply eliminate sediment cisterns from the systems of preparation of fuel offered by them. In hired it is suggested to examine sedimentation and centrifugal separation not separately, and cooperating of these two methods of treatment of fuel with an aim to set influence of the preliminary sedimentation on efficiency of subsequent separation. It is suggested to examine a fuel as dispersible system, in that a fuel is a dispersible environment, and being there are admixtures in him - by a dispersible phase. Such approach gave an opportunity to set functional connection between mass of particles and their sizes and to get the function of distribution, being fundamental at the calculation of efficiency, analysis and design of methods of preparation of fuels. Using the function of distribution were got expression for the estimation of efficiency of defending and centrifugal separation. These formulas allowed to do the analysis of joint co-operation of sedimentation and separation.

Drawn conclusion, that efficiency of separation depends on efficiency of sedimentation and with growth of efficiency of the first stage of cleaning (sedimentation) increases efficiency separations. At considerable initial concentrations this effect can be considerable. The first stage of cleaning does a separator more effective, that positively can affect on the fuel apparatus of engine, to a separator at sharing with sedimentation will delete more contaminations from a fuel, than if he worked one. Efficiency of the use of sedimentation is well-proven as the first stage of treatment of fuel in the system of ship the system preparation of fuel.

Keywords: Preparation of fuel, sedimentation, centrifugal separation, fuel as a dispersible system, function of distribution of contaminations in a fuel, formulas for efficiency of cooperation of sedimentation and separation.

For citation:

Ivanov, Igor A. "Research of interaction of sedimentation and centrifugal separation." *Vestnik Gosudarstvennogo universiteta morskogo i rechnogo flota imeni admirala S.O. Makarova* 9.1 (2017): 187–192. DOI: 10.21821/2309-5180-2017-9-1-187-192.

УДК 621.431.74.62

ИССЛЕДОВАНИЕ ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ ОТСТАИВАНИЯ И ЦЕНТРОБЕЖНОЙ СЕПАРАЦИИ

И. А. Иванов

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

В статье рассмотрена подготовка топлива на судне методом отстаивания, затем методом центробежного сепарирования. Из литературного обзора выявлено, что в вопросах использования отстойных цистерн в системе топливоподготовки нет единого мнения. Одни авторы считают отстаивание неэффективным, другие — эффективным, третьи — просто исключают отстойные цистерны из предлагаемых ими систем топливоподготовки. В данной работе предложено рассматривать не отдельно отстаивание и центробежную сепарацию, а взаимодействие этих двух методов обработки топлива с целью установить влияние предварительного отстаивания на эффективность последующей сепарации. Предложено рассматривать топливо как дисперсную систему, в которой топливо является дисперсионной средой, а находящиеся в нем примеси — дисперсной фазой. Такой подход дал возможность установить функциональную связь между массой частиц и их размерами и получить функцию распределения, являющуюся

основополагающей при расчете эффективности, анализе и моделировании методов подготовки топлив. Получены выражения для оценки эффективности отстаивания и центробежной сепарации. Эти формулы позволили сделать анализ взаимодействия отстаивания и сепарации.

Сделан вывод, что эффективность сепарации зависит от эффективности отстаивания, и с возрастанием эффективности первой ступени очистки (отстаивание) возрастает и эффективность сепарации. При значительных начальных концентрациях этот эффект может быть значительным. Первая ступень очистки делает сепаратор более эффективным, что положительно может сказаться на топливной аппаратуре двигателя, так как сепаратор при совместном использовании с отстаиванием удалит из топлива больше загрязнений, чем если бы он работал один. Доказана эффективность использования отстаивания в качестве первой ступени обработки топлива в системе судовой топливоподготовки.

Ключевые слова: подготовка топлива, отстаивание, центробежная сепарация, топливо как дисперсная система, функция распределения загрязнений в топливе, формулы для эффективности взаимодействия отстаивания и сепарации.

Для цитирования:

Иванов И. А. Исследование взаимодействия отстаивания и центробежной сепарации / И. А. Иванов // Вестник Государственного университета морского и речного флота имени адмирала С. О. Макарова. — 2017. — Т. 9. — № 1. — С. 187–192. DOI: 10.21821/2309-5180-2017-9-1-187-192.

Введение

Данная работа посвящена вопросам математического моделирования отстаивания и центробежной сепарации тяжелых топлив в системе топливоподготовки. Целью работы является нахождение математических выражений, устанавливающих взаимосвязь между свойствами топлива как дисперсной системы и технологическими показателями агрегатов обработки топлива (относительной концентрацией и крупностью разделения) при комплексном использовании отстаивания с последующей центробежной сепарацией. Анализ этих зависимостей даст возможность ответить на вопрос о целесообразности использования отстойных цистерн в системе топливоподготовки.

Анализ состояния проблемы

Рациональное применение топлив в технике, являющееся одной из основных задач химмотологии, в применении к судовым двигателям связано прежде всего с использованием на судах средне- и высоковязких нефтяных моторных топлив. Решение этой задачи требует обеспечения минимальных эксплуатационных затрат при надежной и долговечной работе двигателей на топливах повышенной вязкости. Особую роль в этой проблеме играет система подготовки топлива, которая в сравнении с аналогичной системой дизельного топлива значительно усложняется. Подготовка средне- и высоковязких топлив, обеспечивающая восстановление их качества, определяет надежную длительную эксплуатацию двигателя. Структура системы подготовки топлива, особенности работы средств подготовки, технологические режимы эксплуатации, взаимодействие различных агрегатов в системе — это неполный перечень факторов, которые оказывают влияние на обеспечение безотказной работы двигателя. Значительного снижения эксплуатационных затрат удалось достичь за счет перевода средне- и высокооборотных дизелей на тяжелые сорта топлив, которые значительно дешевле легких [1].

В судовых дизелях наиболее широко применяется жидкое органическое топливо, представляющее собой продукт переработки нефти. Топливо разделяют на четыре группы: дизельное (легкое), моторное, флотские мазуты и котельные мазуты (тяжелые сорта). Однако на данный момент все судовые дизели (как главные, так и вспомогательные) работают на тяжелом топливе [2]. В технологических схемах подготовки топлива (ТСПТ) способы обработки можно разделить на три группы: гидродинамические (отстаивание, сепарация, фильтрация), физико-механические (смешение, гомогенизация) и физико-химические (присадки) [9]. Заданная последовательность обработки топлива этими методами зависит от логики технологического процесса подготовки и определяется диапазоном марок топлива, на которых может работать данный двигатель. Выде-

лим в технологической схеме ТСПТ комплекс обработки топлива, характерный для данной схемы и отличающий ее от остальных. Например, если в ТСПТ происходит последовательная обработка топлива сначала методом отстаивания (ОТ), а затем топливо окончательно очищается от воды и механических примесей в центробежном сепараторе (ЦС), то мы принимаем, что такая технологическая схема содержит комплекс обработки ОТ + ЦС. Рассматриваемый комплекс является наиболее распространенным на судах, использующих тяжелое топливо (моторное, флотские мазуты и др.). Функция отстойных цистерн, по мнению дизелестроительных фирм, состоит, кроме очистки топлива от значительного количества воды, в обеспечении постоянной температуры топлива порядка 70 °С.

Однако в вопросах использования отстойных цистерн в системе топливоподготовки нет единого мнения. Так, в [3] предлагается система топливоподготовки для смеси тяжелого топлива с дизельным. Но очистка тяжелого топлива осуществляется только центробежным сепаратором без отстойных цистерн, что будет создавать определенные сложности с подготовкой тяжелого топлива. Следует отметить, что появляются новые аппараты для очистки нефтепродуктов [4]. Авторы пишут, что предлагаемый ими технологический процесс сепарации относится к категории универсальных. Предлагаемый очиститель предназначен для сепарации любых суспензий с высоким качеством. Полирующий эффект позволяет удалять при сепарировании предельно мелкие частицы, исключив из процесса операцию фильтрации. Авторы [5] считают, что в системе топливоподготовки в ближайшее время будут оставаться такие основные процессы как отстой, фильтрация, сепарация, нагрев, распыливание топлива, дозирование подачи и синхронизация с движением поршня. В [6] автор рассматривает процесс подготовки топлива: гравитационное отстаивание, обработка топлива присадками, сепарация, фильтрация. Вопрос о целесообразности отстойных цистерн остается открытым. В [7] приводятся схемы систем топливоподготовки как с отстойными цистернами, так и без них.

Решение проблемы

Исследование процессов отстаивания и центробежной сепарации необходимо проводить только на основании представления топлива как полидисперсной системы. Оценку эффективности комплекса ОТ + ЦС будем осуществлять с помощью относительной концентрации $\varepsilon_{\text{ОТ+ЦС}}$, равной концентрации дисперсной фазы после сепаратора C_c к исходной концентрации до отстаивания C_0 :

$$\varepsilon_{\text{ОТ+ЦС}} = C_c / C_0.$$

Чем меньше $\varepsilon_{\text{ОТ+ЦС}}$, тем эффективнее происходит процесс. Для определения $\varepsilon_{\text{ОТ+ЦС}}$ необходимо знать, как изменяется фракционный состав дисперсной фазы перед сепарацией после предварительного отстаивания. Как было показано в работе [8], эффективность отстаивания σ в общем виде может быть выражена зависимостью

$$\sigma = 1 - \int_0^{\delta_{\text{кр.от}}} \left(1 - \frac{\delta^2}{\delta_{\text{кр.от}}^2} \right) f(\delta) d\delta, \quad (1)$$

где δ — текущее значение диаметра частиц загрязнения; $\delta_{\text{кр.от}}$ — минимальный размер частиц, оставшихся в очищенном топливе после отстаивания; называемый *крупностью разделения при отстаивании*; $f(\delta)$ — функция распределения массы частиц по размерам.

Примем допущение, что к сепаратору после нескольких часов отстаивания подходят частицы механических примесей, равномерно распределенные по объему топлива. Такое допущение предполагает, что к моменту поступления топлива к сепаратору была произведена циркуляция.

Если максимальный размер частиц, оставшихся в топливе после отстаивания $\delta_{\text{кр.от}}$, то выражение в формуле (1) под знаком интеграла можно рассматривать как дифференциальную функцию распределения массы частиц дисперсной фазы в топливе после τ часов отстаивания:

$$\left(1 - \frac{\delta^2}{\delta_{кр.от}^2}\right) f(\delta) = \tilde{f}(\delta). \quad (2)$$

Обозначим ее $\tilde{f}(\delta)$. Функция $\tilde{f}(\delta)$ является характеристикой дисперсности твердой фазы, поступившей в сепаратор после отстаивания, и может быть использована для определения относительной концентрации дисперсной фазы $\varepsilon_{от+цс}$ по формуле

$$\varepsilon_{от+цс} = \int_0^{\delta_{кр.с}} \left[1 - \frac{\delta^2}{\delta_{кр.с}^2}\right] \tilde{f}(\delta) d\delta, \quad (3)$$

где $\delta_{кр.с}$ — максимальный размер частиц, оставшихся в топливе после сепарации.

Как было показано в [9], первоначальное распределение в топливе массы частиц загрязнений по размерам можно выразить функцией

$$f(\delta) = 8\delta_0^4 \delta / (\delta_0^2 + \delta^2)^3. \quad (4)$$

Подставив в (2) дифференциальную функцию плотности распределения (4) получим вид дисперсной фазы, подошедшей к сепаратору после отстаивания:

$$\tilde{f}(\delta) = \left(1 - \frac{\delta^2}{\delta_{кр.от}^2}\right) \cdot 8\delta_0^4 \frac{\delta}{(\delta_0^2 + \delta^2)^3}. \quad (5)$$

Подставляя (5) в (3), получим

$$\varepsilon_{от+цс} = 8\delta_0^4 \int_0^{\delta_{кр.с}} \left(1 - \frac{\delta^2}{\delta_{кр.от}^2}\right) \left(1 - \frac{\delta^2}{\delta_{кр.с}^2}\right) \frac{\delta}{(\delta_0^2 + \delta^2)^3} d\delta.$$

В случае, если относительная концентрация такова, что $\delta_{кр.от}$ и $\delta_{кр.с}$ лежат в зоне размеров частиц, которые меньше моды в исходной функции распределения $f(\delta)$, можно воспользоваться более простым уравнением Годен–Андреева

$$f(\delta) = n\delta^{n-1} / \Delta^n, \quad (6)$$

где n и Δ — параметры распределения.

Как было показано в работе [10], уравнение Годена–Андреева можно использовать на участке от 0 до 20 мкм. Подставляя в (2) значение $f(\delta)$ из (6) и затем полученную функцию распределения $f(\delta)$ подставив в (3), получим

$$\varepsilon_{от+цс} = \frac{n}{\Delta^n} \int_0^{\delta_{кр.с}} \left(1 - \frac{\delta^2}{\delta_{кр.от}^2}\right) \left(1 - \frac{\delta^2}{\delta_{кр.с}^2}\right) \delta^{n-1} d\delta.$$

После интегрирования этого выражения имеем

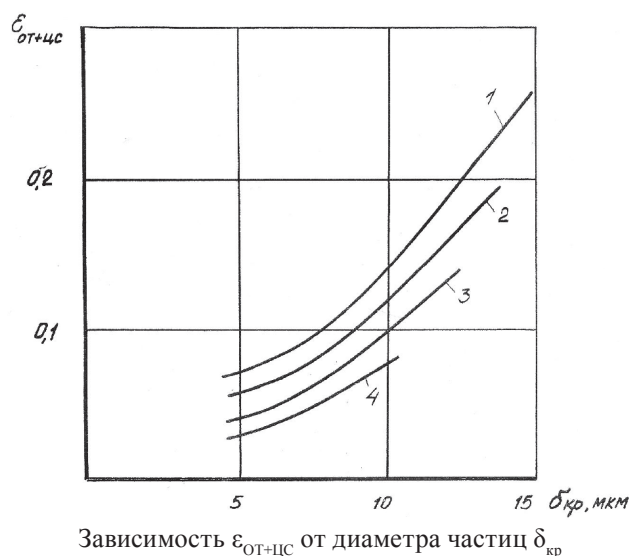
$$\varepsilon_{от+цс} = \left(\frac{\delta_{кр.с}}{n}\right)^n \left[1 - \frac{n}{n+2} - \left(\frac{n}{n+2} - \frac{n}{n+4}\right) \left(\frac{\delta_{кр.с}}{\delta_{кр.от}}\right)^2\right]. \quad (7)$$

Из выражения (7) следует, что относительная концентрация $\varepsilon_{от+цс}$ зависит от крупности разделения и при отстаивании, и при сепарации.

Анализ зависимости относительной концентрации $\varepsilon_{от+цс}$ комплекса ОТ + ЦС показывает, что с возрастанием эффективности первой ступени очистки (отстаивания) возрастает и общая эффективность всего комплекса. Это иллюстрируется графиком на рисунке, где изображена зависимость $\varepsilon_{от+цс} = f(\delta_{кр.с})$, рассчитанная по формуле (7) при различных значениях $\delta_{кр.от}$ ($\delta_{кр.от} = 15$ мкм —

кривая 2, $\delta_{кр.от} = 12$ мкм — кривая 3, $\delta_{кр.от} = 10$ мкм — кривая 4). Там же показана зависимость $\varepsilon_{от+цс} = f(\delta_{кр})$ без предварительного отстаивания (кривая 1).

На рисунке видно, что относительная концентрация при комплексе ОТ + ЦС несколько меньше, чем без предварительного отстаивания. Причем с уменьшением размера удаляемых частиц при отстаивании уменьшается и $\varepsilon_{от+цс}$. В частности, снижение $\delta_{кр}$ с 15 мкм до 12 мкм ведет к снижению $\varepsilon_{от+цс}$ с 0,25 до 0,20. При значительных начальных концентрациях это снижение может быть значительным.



Зависимость $\varepsilon_{от+цс}$ от диаметра частиц $\delta_{кр}$

Выводы

1. С возрастанием эффективности первой ступени очистки (отстаивания) возрастает и общая эффективность всего комплекса ОТ+ЦС.
2. При значительных начальных концентрациях снижение относительной концентрации может быть значительным.
3. Первая ступень очистки делает сепаратор более эффективным, что положительно может сказаться на топливной аппаратуре двигателя, так как сепаратор при совместном использовании с отстаиванием (как показал наш анализ) удалит из топлива больше загрязнений, чем если бы он работал один.
4. Проведенное исследование показало несомненную эффективность использования отстаивания в качестве первой ступени обработки топлива.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Белоусов Е. В. Комплексная утилизация отходов сепарации топлива в судовых энергетических установках / Е. В. Белоусов, М. С. Агеев, Н. Н. Кобяков // Вестник двигателестроения. — 2011. — № 2. — С. 111–114.
2. Сагин С. В. Использование топливных присадок в судовых дизелях / С. В. Сагин, Ю. В. Заблочкин // Судовые энергетические установки. — 2012. — № 30. — С. 180–186.
3. Митягин В. Г. Проблемы эксплуатации судовых дизелей на различных видах топлива / В. Г. Митягин, В. Н. Окунев, В. В. Мартынов // Вестник Государственного университета морского и речного флота имени адмирала С. О. Макарова. — 2011. — № 3. — С. 49а–53.
4. Назаров В. В. Очистка и сепарация нефтепродуктов реоцентрифугированием / В. В. Назаров, В. М. Кушнарченко // Вестник Оренбургского государственного университета. — 2011. — № 10 (129). — С. 205–210.
5. Добровольский В. В. Подготовка вязких топлив судовых малооборотных двигателей / В. В. Добровольский, С. А. Ханмамедов // Судовые энергетические установки. — 2010. — № 26. — С. 46–54.

6. Корнилов Э. В. Технология топливоподготовки на судне / Э. В. Корнилов. — СПб.: Негоциант, 2008. — 248 с.
7. Средства очистки жидкостей на судах: справочник / под общ. ред. И. А. Иванова. — Л.: Судостроение, 1984. — 272 с.
8. Иванов И. А. Анализ систем топливоподготовки при совместном использовании отстаивания и фильтрования / И. А. Иванов // Материалы междунар. науч.-практ. конф. «Водный транспорт России: Инновационный путь развития». — СПб.: СПГУВК, 2011. — Т. 2. — С. 286–290.
9. Иванов И. А. Научные основы моделирования счета и выбора методов и технологических схем подготовки топлив для судовых дизелей: дис. ... д-ра техн. наук / И. А. Иванов. — СПб., 1993. — 351 с.
10. Иванов И. А. Исследование эффективности методов и технологических схем очистки тяжелых топлив для судовых дизелей: дис. ... канд. техн. наук / И. А. Иванов. — СПб., 1974. — 161 с.

REFERENCES

1. Belousov, E., M. Ageev, and N. Kobayakov. “Complex utilization of the waste of separation of fuel in the ship power installations.” *Vestnik dvigatelestroeniya* 2 (2011): 111–114.
2. Sagin, S. V., and Yu. V. Zablotskii. “Ispol’zovanie toplivnykh prisadok v sudovykh dizelyakh.” *Ship power plants* 30 (2012): 180–186.
3. Mityagin, V. G., V. N. Okunev, and V. V. Mart’yanov. “Problems of ship diesel engines operation with different kinds of fuel.” *Vestnik Gosudarstvennogo universiteta morskogo i rechnogo flota imeni admirala S. O. Makarova* 3 (2011): 49a–53.
4. Nazarov, V. V., and V. M. Kushnarenko. “Purification and separation of oil by reocentrifuging.” *Vestnik of the Orenburg State University* 10(129) (2011): 205–210.
5. Dobrovolskii, V. V., and S. A. Khanmamedov. “Podgotovka vyazkikh topliv sudovykh malooborotnykh dvigatelei.” *Ship power plants* 26 (2010): 46–54.
6. Kornilov, E. V. *Tekhnologiya toplivopodgotovki na sudne*. Izd-vo Negotsiant, 2008.
7. Ivanov, I. A., ed. *Sredstva ochistki zhidkosti na sudakh: spravochnik*. L.: Sudostroenie, 1984.
8. Ivanov, I. A. “Analiz sistem toplivopodgotovki pri sovmestnom ispol’zovanii otstaivaniya i fil’trovaniya.” *Materialy mezhdunarodnoi nauchno-prakticheskoi konferentsii «Vodnyi transport Rossii: Innovatsionnyi put’ razvitiya»*. SPb: SPGUVK, 2011. Vol. 2. 286–290.
9. Ivanov, I. A. Nauchnye osnovy modelirovaniya scheta i vybora metodov i tekhnologicheskikh skhem podgotovki topliv dlya sudovykh dizelei. Dr. diss. (Tech.). SPb., 1993: 351.
10. Ivanov, I. A. Issledovanie effektivnosti metodov i tekhnologicheskikh skhem ochistki tyazhelykh topliv dlya sudovykh dizelei. PhD diss. (Tech.). SPb., 1974:161.

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРЕ

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

INFORMATION ABOUT THE AUTHOR

Ivanov, Igor 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: ivzap@mail.ru, kaf_sdvs@gumrf.ru

Статья поступила в редакцию 17 декабря 2016 г.
Received: December 17, 2016.

DOI: 10.21821/2309-5180-2017-9-1-193-200

RESEARCH OF OXYGEN GENERATION OF OZONE FOR MARINE ENGINES EXHAUST GAS CLEANING

A. V. Turkin

Admiral Ushakov Maritime State University, Novorossisk, Russian Federation

Increasing requirements of national and international standards for environmental safety of air emissions from ships requires reducing the concentration of toxic components in the marine engines exhaust gases. The most dangerous components of the exhaust gases are nitrogen and sulphur oxides, carbon monoxide and unburned hydrocarbons. Thus the greatest technical difficulty is the removal of nitrogen oxides. A method of cleaning the exhaust gases from acidic oxides and particulate matter by using the mechanism of adsorption solid is considered. For these purposes, integrated device for ship engine exhaust gas cleaning is designed and manufactured. Cleaning device is based on the oxidation of nitrogen oxides NO in the presence of ozone until dioxide NO₂ to further their adsorption on the surface and within the granules of adsorbent - slag pumice. Advantages of the method are the lack of structure in the device of expensive catalysts and reactants consumed as well as the possibility of on-site ozone consumption.

Improving the efficiency of purification is possible by increasing the amount of ozone supplied to the purification plant. A method of improving the performance of an ozone generator through the use of oxygen as the starting gas in place of air. The experimental verification of integrated device for cleaning exhaust gases of marine engine while working ozone generator on oxygen. It is established that during operation of the ozone generator in an installation for purification of exhaust gas using oxygen as the feed gas for the ozone provides significant advantages compared with air. The degree of purification when the oxygen ozone generation on average 4 - 5 times higher than the same cleaning device, but in the preparation of ozone from air.

Keywords: ecological safety, exhaust gas cleaning, nitrogen oxides, adsorption, ozone, slag pumice, oxygen.

For citation:

Turkin, Aleksandr V., and Vladimir A. Turkin. "Research of oxygen generation of ozone for marine engines exhaust gas cleaning." *Vestnik Gosudarstvennogo universiteta morskogo i rechnogo flota imeni admirala S.O. Makarova* 9.1 (2017): 193–200. DOI: 10.21821/2309-5180-2017-9-1-193-200.

УДК 504.3.054; 621.43.068.4

ИССЛЕДОВАНИЕ КИСЛОРОДНОЙ ГЕНЕРАЦИИ ОЗОНА ДЛЯ ОЧИСТКИ ОТРАБОТАВШИХ ГАЗОВ СУДОВОГО ДВИГАТЕЛЯ

А. В. Туркин

ФГОУ ВО «Государственный морской университет имени адмирала Ф. Ф. Ушакова»,
Новороссийск, Российская Федерация

Повышение требований национальных стандартов и международных норм к экологической безопасности выбросов в атмосферу с судов требует снижения концентрации токсичных компонентов в отработавших газах судовых двигательных установок. Наиболее опасными компонентами отработавших газов являются оксиды азота, серы, окись углерода и несгоревшие углеводороды. При этом наибольшую техническую сложность представляет удаление оксидов азота. Предлагается способ очистки отработавших газов от кислотных оксидов и твердых частиц с использованием механизма их адсорбции твердым веществом. Для этого разработано и изготовлено комплексное устройство очистки отработавших газов судового двигателя. Работа устройства очистки основана на окислении в присутствии озона оксидов азота NO до диоксидов NO₂ с дальнейшей их адсорбцией на поверхности и внутри гранул адсорбента — шлаковой пемзы. Достоинствами метода являются отсутствие в конструкции устройства дорогостоящих катализаторов и расходных реагентов, а также возможность получения озона непосредственно на месте его потребления.

Повышение эффективности очистки возможно путем увеличения количества озона, подаваемого в установку очистки. Рассмотрен метод повышения производительности озонатора путем использования в качестве исходного газа кислорода вместо воздуха. Проведена экспериментальная проверка комплексного

устройства для очистки отработавших газов судового двигателя при работе озонатора на кислороде. Установлено, что при работе озонатора в составе установки для очистки отработавших газов использование кислорода в качестве исходного газа для получения озона обеспечивает значительные преимущества по сравнению с воздухом. Степень очистки при кислородной генерации озона в среднем в четыре-пять раз выше, чем у того же устройства очистки, но при получении озона из воздуха.

Ключевые слова: экологическая безопасность, очистка отработавших газов, оксиды азота, адсорбция, озон, шлаковая пемза, кислород.

Для цитирования:

Туркин А. В. Исследование кислородной генерации озона для очистки отработавших газов судового двигателя / А. В. Туркин, В. А. Туркин // Вестник Государственного университета морского и речного флота имени адмирала С. О. Макарова. — 2017. — Т. 9. — № 1. — С. 193–200. DOI: 10.21821/2309-5180-2017-9-1-193-200.

Введение

В настоящее время происходит последовательное ужесточение требований к выбросам вредных веществ с отработавшими газами судовых двигателей. При этом наибольшую сложность представляют ограничения на выбросы оксидов азота. Выбросы в воздушную среду с судов регламентируются Прил. VI «Правил предотвращения загрязнения атмосферы» Международной конвенции МАРПОЛ 73/78 [1]. Приложение вступило в действие в 2005 г. и ограничило выбросы NO_x на уровне ИМО Tier 1, что для судовых малооборотных двигателей составляет 17 г/кВт·ч. С 1 января 2011 г. произошло ужесточение норм до величины 14,4 г/кВт·ч — уровень ИМО Tier 2, а с 1 января 2016 г. для двигателей новых судов норма составляет 3,4 г/кВт·ч в районах контроля выбросов оксидов азота (районы NECA — NO_x emission control areas) — уровень ИМО Tier 3. К существующим районам NECA относятся Североамериканское побережье и Карибское море. На 2021 г. запланировано создание новых районов NECA — Балтийского и Северного морей.

Действующие с 2016 г. нормы Tier 3 ужесточены на 80 % по сравнению с уровнем Tier 1, и возможности выполнения указанных требований только за счет влияния на рабочие процессы судовых двигателей внутреннего сгорания практически исчерпаны. В большинстве случаев этих мер достаточно только для достижения уровня Tier 2. Для достижения уровня ИМО Tier 3 требуются дополнительные (вторичные) природоохранные мероприятия, обеспечивающие большее снижение концентраций оксидов азота в отработавших газах. Для достижения этих норм наиболее часто предлагается метод, основанный на селективном каталитическом восстановлении (СКВ) оксидов азота до молекулярного азота [2]. Основными недостатками метода являются высокая стоимость катализаторов, изготовленных из драгоценных металлов, и необходимость наличия в портах захода реагента для СКВ-процесса (мочевины).

Очистка отработавших газов адсорбцией в присутствии озона

Перспективным способом улучшения экологических показателей является применение озонаторов для обработки воздуха или отработавших газов двигателей внутреннего сгорания [3] — [5]. Данная технология на современном этапе является недостаточно изученной и поэтому требует дополнительных научных исследований. В работе [6] автором рассматривается метод очистки отработавших газов от кислотных оксидов и твердых частиц с использованием их адсорбции твердым адсорбентом. Для этих целей разработано комплексное устройство очистки отработавших газов судового двигателя [7]. Принцип работы предлагаемого устройства основан на окислении в присутствии озона оксидов азота NO до диоксидов NO_2 с дальнейшей их адсорбцией на поверхности и внутри гранул адсорбента — шлаковой пемзы. Достоинствами метода являются отсутствие в конструкции устройства дорогостоящих катализаторов и расходуемых реагентов, а также возможность получения озона непосредственно на месте его потребления.

Для исследования эффективности рассматриваемого способа очистки изготовлена экспериментальная установка — комплексное устройство для очистки отработавших газов судового двигателя в односекционном исполнении. Получение озона осуществлялось наиболее доступ-

ным способом — с помощью барьерного разряда в потоке воздуха. Для этого установка очистки оборудована внешним генератором озона SOZ-YB-32G максимальной производительностью 32 г озона в час. Экспериментально подтверждена возможность практического внедрения способа очистки отработавших газов судового двигателя адсорбцией твердым адсорбентом в присутствии озона [7]. Установлено, что при исследуемых режимах работы установки эффективность очистки от NO_x составляет 6 – 37 % в зависимости от концентрации NO_x в газах и частоты вращения двигателя.

Повышение степени очистки возможно путем увеличения количества озона, подаваемого в установку очистки. Наиболее простой способ — увеличение количества озонаторов или применение озонаторов большей мощности. Недостаток такого экстенсивного подхода обусловлен тем, что при наиболее простом способе получения озона — синтезе его из воздуха — наряду с озоном из атмосферного молекулярного азота образуются оксиды азота, суммарное количество которых может достигать 10 % объема производимого озона [8]. Эти оксиды создают дополнительную нагрузку на установку очистки, снижая ее эффективность. Поэтому степень очистки увеличивается не пропорционально производительности или количеству озонаторов, а с некоторым отставанием. Так, при работе двигателя на высоких оборотах увеличение суммарной производительности озонаторов в три раза повышает степень очистки только в 1,8 раза [9].

С целью исключения влияния вторичных оксидов азота на эффективность очистки рассмотрен метод повышения производительности озонатора путем использования в качестве исходного газа кислорода вместо воздуха.

Влияние исходного газа на процесс синтеза озона

Промышленное получение озона [10] в основном осуществляется с помощью барьерного разряда, поддерживаемого высоким напряжением в потоке воздуха или кислорода (рис. 1). Синтез озона происходит в два этапа: на первом происходит диссоциация молекулярного кислорода, на втором — образование озона из атомарного кислорода. При этом не вся мощность, подаваемая в барьерный разряд, расходуется на получение озона. Большая её часть тратится на тепловые потери, которые отводятся воздушной или водяной системой охлаждения разрядного промежутка.

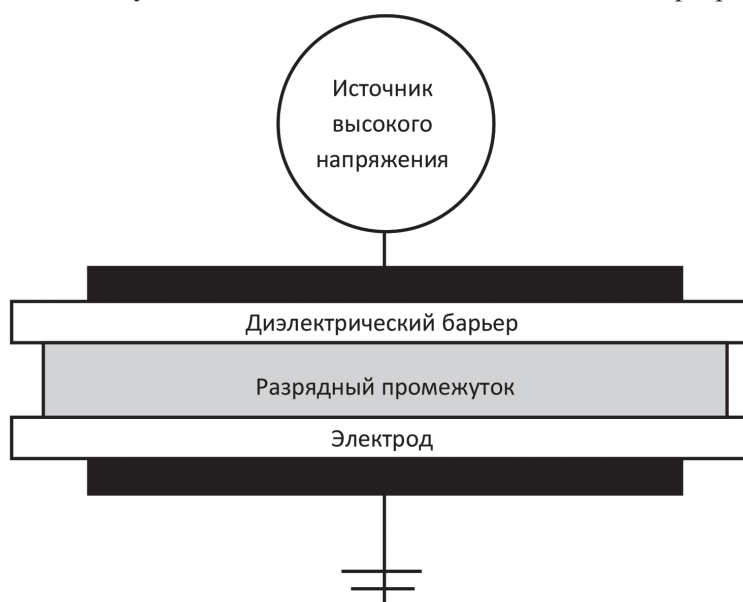


Рис. 1. Принципиальная схема синтеза озона в барьерном разряде

Доля полезной мощности, а также концентрация полученного озона в смеси существенно зависят от состава исходного газа. Значения этих величин для современных озонаторов представлены в табл. 1.

Таблица 1

Влияние исходного газа на характеристики синтеза озона в барьерном разряде

Исходный газ	Воздух	Кислород
Доля мощности, затрачиваемой на получение озона, %	< 8	12 – 14
Концентрация озона в смеси, вес. %	1,5 – 2,5	6 – 8
Удельные энергозатраты, кВт·ч/кг O ₃	13 – 16	8 – 10*

* без учета энергозатрат на получение кислорода.

В случае работы озонатора на кислороде требуется его получение на месте использования. Для этого могут применяться установки разделения воздуха (концентраторы кислорода), основанные на свойстве избирательной адсорбции различных компонентов воздуха определенными сорбирующими материалами. Также возможно использование баллонного кислорода под давлением или испарение доставляемого на место использования жидкого кислорода, произведенного криогенным методом. Газообразный кислород в баллонах или полученный испарением содержит очень мало примесей, его чистота составляет более 99 % объема. Чистота кислорода, получаемого адсорбционным способом из воздуха, обычно не превышает 95 %, при этом основной примесью является атмосферный азот. Энергозатраты адсорбционного метода получения кислорода для синтеза 1 кг озона составляют около 5 кВт·ч.

Конструктивное исполнение генератора озона и источника высокого напряжения для его питания не зависят от используемого газа. При одинаковых расходах исходного газа и равной потребляемой мощности производительность одного и того же озонатора при использовании кислорода в 2 – 2,5 раза больше, чем при использовании воздуха. Таким образом, использование кислорода в качестве исходного газа обеспечивает значительные преимущества по сравнению с воздухом. Особенно, если озонатор используется в составе устройства для очистки отработавших газов двигателей установок.

Натурный эксперимент и его результаты

Для количественной оценки влияния исходного газа на эффективность очистки проведена экспериментальная проверка комплексного устройства для очистки отработавших газов судового двигателя при работе озонатора на кислороде.

Принципиальная схема лабораторной установки для проведения эксперимента по очистке отработавших газов представлена на рис. 2. Установка очистки состоит из корпуса, оснащенного входным и выпускным газовыми патрубками, штуцерами подачи озона, промывочной воды и дренажа загрязненной воды, внутри которого снизу-вверх расположены смесительная камера и камера очистки. В камере очистки расположены перфорированные контейнеры с гранулами пемзы. Смесь отработавших газов и озона, многократно попадая на поверхность и внутрь гранул, очищается от оксидов азота, которые адсорбируются на поверхности и внутри гранул. Подробное описание предлагаемого способа очистки, конструкции установки и ее исследование при работе озонатора на воздухе рассмотрено в работах [6], [8] и [9].

Подача кислорода на озонатор SOZ-YB-32G (производительность — до 32 г/ч) в составе устройства очистки производилась от кислородного баллона под давлением через редуктор и регулирующий вентиль.

В качестве опытного объекта для проведения натурного эксперимента, так же, как и в процессе исследования установки при работе генератора озона на воздухе, использовался рядный четырехцилиндровый двигатель внутреннего сгорания ЗМЗ-409 мощностью 105 кВт. Отбор и анализ параметров отработавших газов осуществлялся с использованием переносного прибора газового анализа — газоанализатора TESTO 350. Прибор внесен в Государственный реестр средств измерений РФ, № 49192-12 и имеет допуск к применению в Российской Федерации. Частота вращения коленчатого вала двигателя, расход топлива и массовый расход воздуха контролировались с помощью штатной электронной системы управления двигателем.

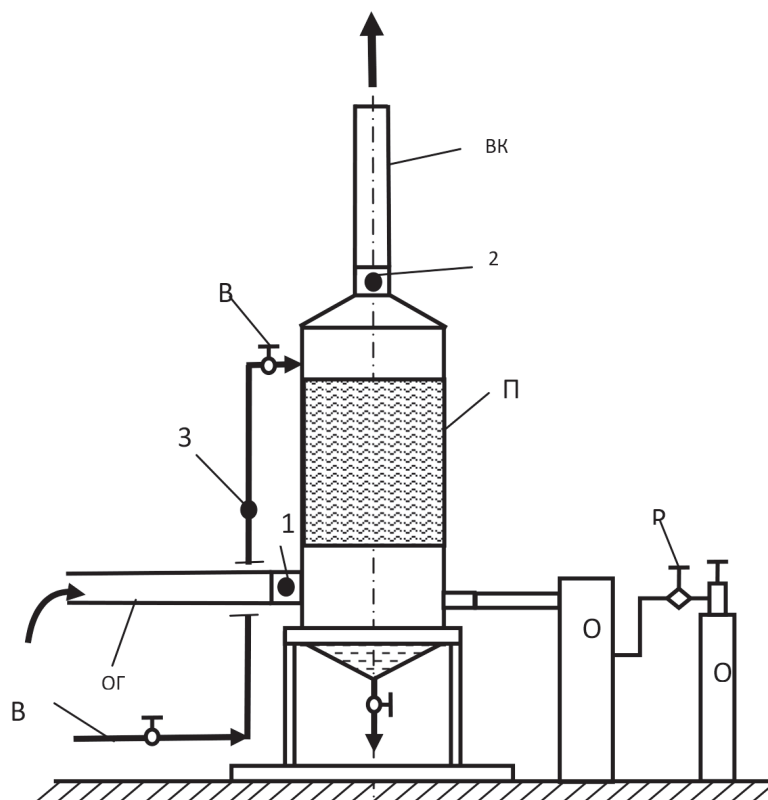


Рис. 2. Принципиальная технологическая схема установки для проведения эксперимента по очистке дымовых газов: ПУ — пилотная установка; ОЗ — озонатор; ОГ — отводной газопровод; ВП — водопровод; В — вентиль; ВК — выпускной коллектор; О₂ — кислородный баллон; Р — редуктор; 1 – 3 — аналитические точки

Отработавшие газы из выпускного трубопровода двигателя под избыточным давлением направляются в установку очистки через входной газовый патрубок и после очистки удаляются через выпускной коллектор в атмосферу. Точки отбора анализов показаны на рис. 2. Результаты эксперимента при кислородной работе озонатора в составе комплексного устройства для очистки отработавших газов судового двигателя приведены в табл. 2 и на рис. 3. В сравнении также представлены результаты эксперимента [7], проведенного при тех же условиях, но при работе озонатора на воздухе.

Таблица 2

Результаты эксперимента по оценке влияния исходного газа озонатора на показатели установки очистки отработавших газов судового двигателя

Номер испытания		1	2	3	4	5
Частота вращения коленчатого вала двигателя, об/мин		2000	2500	3000	3500	4000
Расход топлива, кг/ч		2,1	2,8	3,5	4,8	6,3
Расход воздуха, кг/ч		36,6	46,9	58,2	79	101,5
Концентрация NO _x в отработавших газах, ppm		167	248	430	808	1635
Температура отработавших газов, °С		102	127	156	189	224
Температура очищенных газов, °С		54	63	68	72	81
Исходный газ — воздух	Концентрация NO _x в очищенных газах, ppm	105	187	338	754	1535
	Степень очистки газов от NO _x , %	37,4	24,6	21,4	6,7	6,1
Исходный газ — кислород	Концентрация NO _x в очищенных газах, ppm	3	10	44	303	1147
	Степень очистки газов от NO _x , %	98,2	96,0	89,8	62,5	29,8

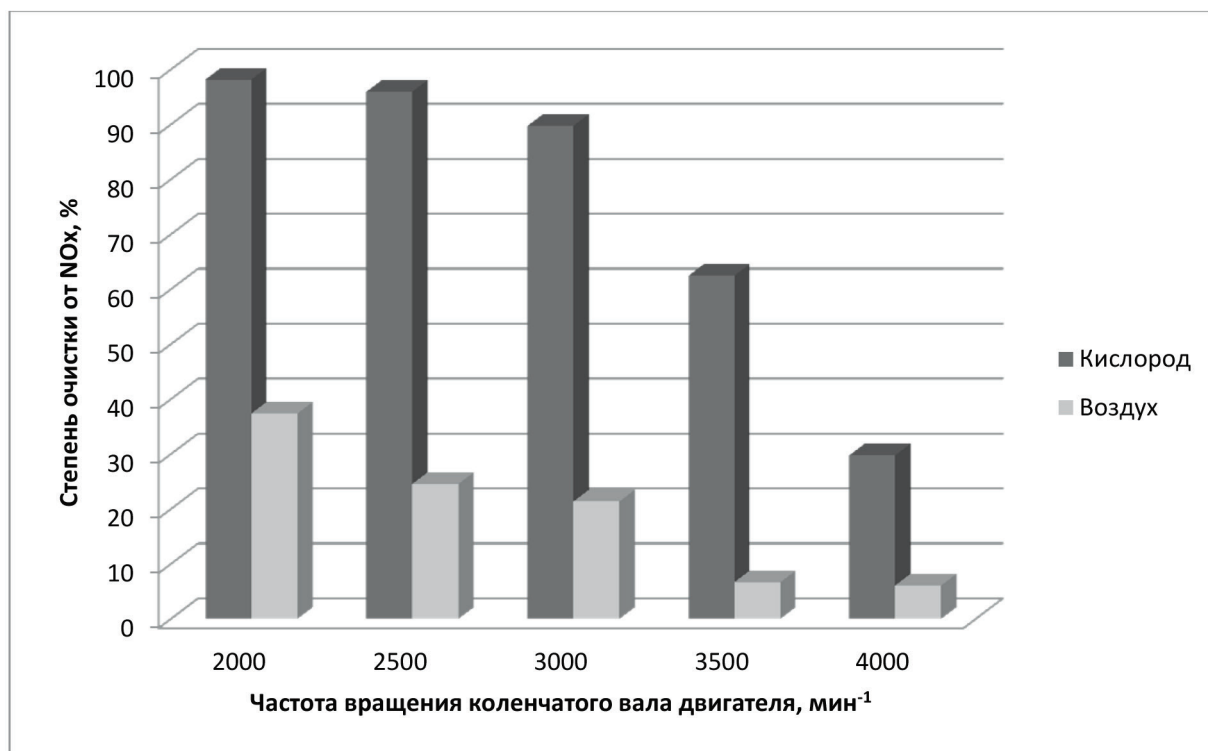


Рис. 3. Влияние исходного газа на степень очистки от NO_x

Степень очистки отработавших газов от NO_x определялась из выражения

$$e = \frac{y_n - y_k}{y_n} \cdot 100 \%,$$

где y_n — начальная концентрация NO_x в отработавших газах, ppm; y_k — конечная концентрация NO_x в отработавших газах, ppm.

Закключение

По результатам эксперимента установлено, что при работе озонатора в составе установки для очистки отработавших газов использование кислорода в качестве исходного газа для получения озона обеспечивает значительные преимущества по сравнению с воздухом. Степень очистки при кислородной генерации озона в среднем в четыре-пять раз выше, чем у того же устройства очистки, но при получении озона из воздуха.

Для получения кислорода на месте использования могут использоваться адсорбционные установки разделения воздуха — концентраторы кислорода. Некоторые производители озонаторного оборудования комплектуют озонаторы встроенными концентраторами кислорода, что обеспечивает технологическую простоту кислородной генерации озона. При этом суммарные затраты электроэнергии для производства 1 кг озона из кислорода меньше, чем при получении озона из воздуха.

При синтезе озона из воздуха, наряду с озоном, образуются оксиды азота (до 10 об %). В озоне, синтезированном из кислорода, оксиды азота отсутствуют, что позволяет при необходимости полностью удалить NO_x из отработавших газов.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Международная Конвенция по предотвращению загрязнения с судов (МАРПОЛ-73/78). — СПб.: ЗАО «ЦНИИМФ», 2012. — Кн. III, пересм. изд. — 336 с.

2. Иванченко А. А. Техника и технология нейтрализации в отработавших газах СЭУ: учеб. пособие / А. А. Иванченко. — СПб.: Изд-во СПГУВК, 2012. — 111 с.
3. Кличханов Ф. А. Исследование озонатора воздуха на двигателе ВАЗ 2123 14 / Ф. А. Кличханов, В. В. Ермилов, А. В. Торба // Сб. тр. междунар. науч.-практ. конф. «Проблемы и перспективы технических наук». — Уфа: АЭТЕРНА, 2015. — С. 26–28.
4. Алексеев В. А. Развитие областей применения озонаторов в промышленности и транспорте / В. А. Алексеев, В. С. Артемьев, В. Г. Григорьев // Техника и технологии: пути инновационного развития: сб. науч. тр. 4-й междунар. науч.-практ. конф. (30 июня 2014 г.). — Курск: ЗАО «Университетская книга», 2014. — С. 13–16.
5. Кормилицын В. И. Исследование очистки дымовых газов котлов от оксидов азота при сжигании природного газа / В. И. Кормилицын, В. С. Ежов // Теплоэнергетика. — 2013. — № 2. — С. 71. DOI: 10.1134/S0040363612080073.
6. Туркин А. В. Очистка выхлопных газов судового двигателя адсорбцией твердым веществом в присутствии озона / А. В. Туркин // Транспортное дело России. — 2013. — № 6. — С. 129–130.
7. Туркин А. В. Экспериментальное исследование эффективности очистки выхлопных газов судового двигателя адсорбцией твердым веществом в присутствии озона / А. В. Туркин, В. А. Туркин // Транспортное дело России. — 2014. — № 4. — С. 187–190.
8. Самойлович В. Г. Аргументы «за» и «против» использования воздуха или кислорода для промышленного производства озона / В. Г. Самойлович, Л. Ю. Абрамович // Первая всероссийская конференция «Озон и другие экологически чистые окислители»: материалы конф. — М., 2005. — С. 144–154.
9. Туркин А. В. Экспериментальное исследование эффективности многосекционного комплексного устройства очистки выхлопных газов судового двигателя / А. В. Туркин, В. А. Туркин // Вестник Астраханского государственного технического университета. Серия: Морская техника и технология. — 2015. — № 4. — С. 79–85.
10. Лунин В. В. Способы получения озона и современные конструкции озонаторов / В. В. Лунин, Н. В. Карягин, С. Н. Ткаченко, В. Г. Самойлович. — М.: МАКС Пресс, 2008. — 216 с.

REFERENCES

1. *International Convention for Prevention of Pollution from Ships (MARPOL-73/78)*. SPb.: ZAO “TsNI-IMF”, 2012. Book III, revised edition.
2. Ivanchenko, A. A. *Tekhnika i tekhnologiya neutralizatsii v otrabotavshikh gazakh SEU: uchebnoe posobie*. SPb.: SPGUVK, 2012.
3. Klichkhanov, F. A., V. V. Ermilov, and A. V. Torba. “Issledovanie ozonatora vozdukha na dvigatele VAZ 2123 14.” *Sbornik trudov mezhdunarodnoi nauchno-prakticheskoi konferentsii «Problemy i perspektivy tekhnicheskikh nauk»*. Ufa: AETERNA, 2015: 26–28.
4. Alekseev, V. A., V. S. Artem'ev, and V. G. Grigor'ev. “Razvitie oblastei primeneniya ozonatorov v promyshlennosti i transporte.” *Tekhnika i tekhnologii: Puti innova-tsionnogo razvitiya: sbornik nauchnykh trudov 4-oi Mezhdunarodnoi nauchno-prakticheskoi konferentsii (30 iyunya 2014 g.)*. Kursk: ZAO “Universitetskaya kniga”, 2014: 13–16.
5. Kormilitsyn, V. I., and V. S. Ezhov. “Studying the removal of nitrogen oxides from boiler flue gases in firing natural gas.” *Thermal Engineering* 60.2 (2013): 147–152. DOI: 10.1134/S0040601512080071.
6. Turkin, A. “The exhaust gas purifying marine engines adsorption of solids in the presence of ozone.” *Transport business of Russia* 6 (2013): 129–130.
7. Turkin, A., and V. Turkin. “Experimental research of marine engines exhaust gas cleaning by solids adsorption in the presence of ozone effectiveness.” *Transport business of Russia* 4 (2014): 187–190.
8. Samoilovich, V. G., and L. Yu. Abramovich. “Argumenty «za» i «protiv» ispol'zovaniya vozdukha ili kisloroda dlya promyshlennogo proizvodstva ozona.” *Pervaya vserossiiskaya konferentsiya «Ozon i drugie ekologicheski chistye okisliteli»: materialy konferentsii*. M., 2005: 144–154.
9. Turkin, A. V., and V. A. Turkin. “Experimental study of efficiency of multisection integrated device for purification of marine engine exhaust gases.” *Vestnik of Astrakhan State Technical University. Series: Marine Engineering and Technologies* 4 (2015): 79–85.
10. Lunin, V. V., N. V. Karyagin, S. N. Tkachenko, and V. G. Samoilovich. *Sposoby polucheniya ozona i sovremennye konstruksii ozonatorov*. M.: MAKSS Press, 2008.

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

Туркин Александр Владимирович —
кандидат технических наук, доцент
ФГОУ ВО «Государственный морской
университет имени адмирала Ф. Ф. Ушакова»
353918, Российская Федерация, Новороссийск,
пр-т Ленина 93
e-mail: alekstur@yandex.ru

INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Turkin, Aleksandr V. —
PhD, associate professor
Admiral Ushakov Maritime
State University
93 Lenin's Avenue, Novorossisk, 353918,
Russian Federation
e-mail: alekstur@yandex.ru

*Статья поступила в редакцию 26 декабря 2016 г.
Received: December 26, 2016.*

ЭЛЕКТРОТЕХНИЧЕСКИЕ КОМПЛЕКСЫ И СИСТЕМЫ

DOI: 10.21821/2309-5180-2017-9-1-201-210

MARINE HF RADIO INSTALLATIONS ARE THE ONLY MEANS OF REMOTE COMMUNICATIONS IN SEA AREA A4 FOR GMDSS (ARCTIC BASIN OF RUSSIA)

A. I. Kulinich, A. V. Pripotnyuk, Yu. M. Ustinov

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

The article is devoted to topical issue of using long-range radio communications in the Arctic region of Russia. It is shown that modern naval vessel operating in high latitudes, is equipped in accordance with the requirements of the GMDSS. The paper presents brief characteristics of such equipment and the possibilities of its different types. The analysis of the operation of VHF equipment of the vessel. Analyses are available on the ship's satellite communications. Detail ship's satellite communications INMARSAT Fleet Broad Band. It is shown that VHF and satellite communications occupy certain niches, but they are not suitable for sustained long distance communications. It becomes obvious that MF/HF-radio is most suitable for use in high latitudes. The obvious advantages and difficulties of applying this type of communication. It is shown that the ionosphere is the cause of increase the communication distance and the appearance of fading. For a stable connection is needed to the wave forecast and the choice of operating frequencies. In the work the study is concluded that the use of HF radio for the exchange of various types of information on practically any distance. It is shown that the number of reasons would have on this process stirring influence, will need to take into account the time of day, solar activity, range and direction radio feature Medoborudovania Northern territories, low exchange rate and high noise level. The conclusion about the necessity of using the latest achievements of science and technology, development of research towards the use of HF radio, and the use of different modes of radiation, methods of anti-interference, increasing speed of information transfer and modernization of equipment.

Keywords: GMDSS, VHF, INMARSAT, solar activity, NAVTEX

For citation:

Kulinich, Andrey I., Andrey V. Pripotnyuk, and Yury M. Ustinov. "Marine HF radio installations are the only means of remote communications in sea area A4 for GMDSS (Arctic basin of Russia)." *Vestnik Gosudarstvennogo universiteta morskogo i rechnogo flota imeni admirala S. O. Makarova* 9.1 (2017): 201–210. DOI: 10.21821/2309-5180-2017-9-1-201-210.

УДК 621.396

СУДОВЫЕ ВЧ-РАДИОУСТАНОВКИ — ЕДИНСТВЕННОЕ СРЕДСТВО ДАЛЬНЕЙ СВЯЗИ В МОРСКОМ РАЙОНЕ А4 ГМССБ (АРКТИЧЕСКОМ БАСЕЙНЕ РОССИИ)

А. И. Кулинич, А. В. Припотнюк, Ю. М. Устинов

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

Статья посвящена актуальному вопросу использования дальней радиосвязи в Арктическом регионе России. Показано, что современное морское судно, работающее в высоких широтах, оснащается в соответствии требованиями ГМССБ. В работе приводится краткая характеристика такой аппаратуры и анализируются возможности различных её видов. Приводится анализ работы ОВЧ-аппаратуры судна. Анализируются имеющаяся на судне аппаратура спутниковой связи. Подробно рассматривается судовая аппаратура спутниковой связи ИНМАРСАТ-Fleet Broad Band. Показано, что ОВЧ- и спутниковая связь занимают определенные ниши, но они непригодны для устойчивой дальней связи. Становится очевидным, что СЧ/ВЧ-радиосвязь наиболее пригодна для использования в высоких широтах. Очевидны достоинства и сложности

применения такого вида связи. Показано, что ионосфера является причиной увеличения дальности связи и появления замираний. Для устойчивой связи необходим волновой прогноз и выбор рабочих частот. В исследовании сделан вывод о применении ВЧ-радиосвязи для обмена различными видами информации на практически любых расстояниях. Показано, что ряд причин будет оказывать на этот процесс мешающее воздействие и необходимо будет учитывать время суток, солнечную активность, дальность и направление радиосвязи, особенность недооборудования северных территорий, малую скорость обмена, а также высокий уровень помех. Сделан вывод о необходимости использования последних достижений науки и техники, развития изысканий в направлении использования ВЧ-радиосвязи, а также использования различных режимов излучения, методов борьбы с помехами, увеличения скорости передачи информации и модернизации аппаратуры.

Ключевые слова: ГМССБ, ОВЧ-радиостанции, ИНМАРСАТ, солнечная активность, НАВТЕКС.

Для цитирования:

Кулинич А. И. Судовые ВЧ-радиоустановки — единственное средство дальней связи в морском районе А4 ГМССБ (Арктическом бассейне России) / А. И. Кулинич, А. В. Припотнюк, Ю. М. Устинов // Вестник Государственного университета морского и речного флота имени адмирала С. О. Макарова. — 2017. — Т. 9. — № 1. — С. 201–210. DOI: 10.21821/2309-5180-2017-9-1-201-210.

Введение

В морском районе А4 ГМССБ, куда включена вся Арктика, несмотря на целый ряд недостатков коротковолновой связи, ВЧ-радиоустановки являются единственным средством дальней радиосвязи [1].

1. Состав судового радиооборудования в морских районах А3 или А4

Состав радиооборудования ГМССБ на судах международного плавания для морских районов А3 или А4 с учётом дублирования аппаратуры приведён на рис. 1. Учитывая, что суда во время плавания могут находиться в морских районах А3 или А4, для этих судов предусмотрено дополнительное радиооборудование системы ИНМАРСАТ — терминал Fleet Broad Band [2] – [4].

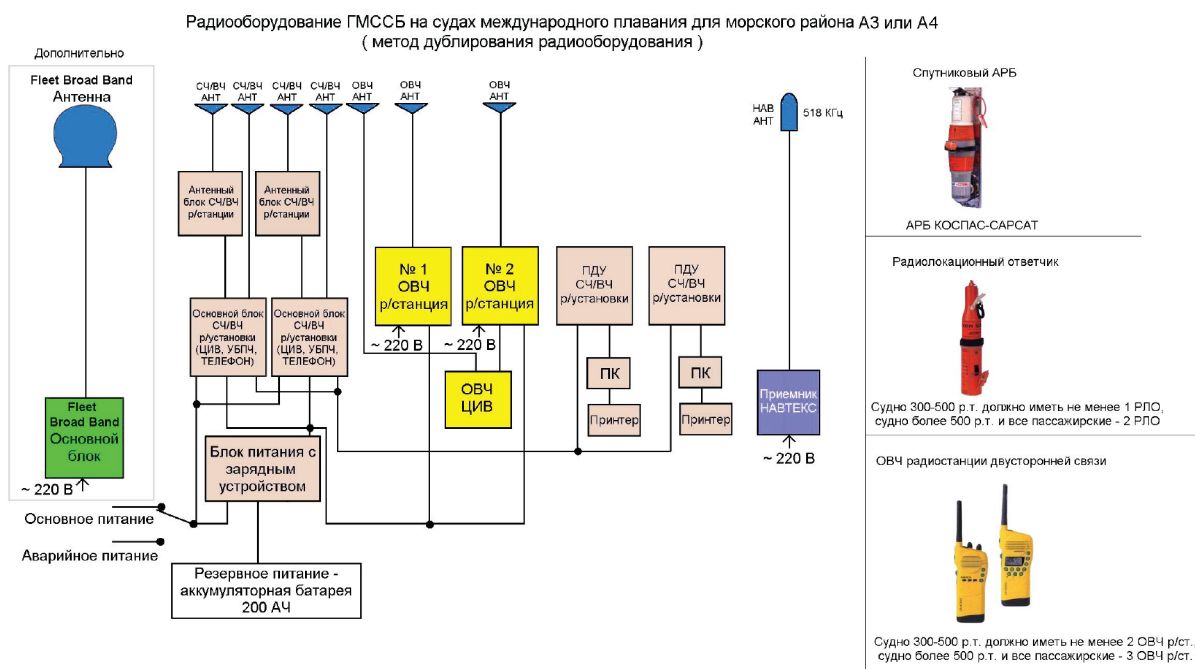


Рис. 1. Состав радиооборудования ГМССБ на судах неограниченного района плавания

Радиооборудование делится на штатные средства связи и на штатное радиооборудование судовых спасательных средств. Вся аппаратура, устанавливаемая на судах, имеет сертификаты одобрения типа [3], [4].

2. Судовые ОВЧ-радиостанции

Судовые ОВЧ-радиостанции предоставляют возможность проведения симплексной или полудуплексной связи на всех морских каналах связи, получения метеоинформации и обеспечения работы на частных каналах [4], [5].

В зависимости от типа радиостанции работают в следующих диапазонах:

- 150,8 ... 163,6 МГц;
- 155,0 ... 163,6 МГц;
- 155,0 ... 163,425 МГц.

Следует отметить, что при полудуплексной работе передатчик отключается во время приема сообщения несмотря на то, что работа производится на двух разных частотах.

Режимы работы: ТЕЛЕФОНИЯ (класс излучения G3E — фазовая модуляция), режим автоматической радиосвязи с использованием ЦИВ (класс излучения G2B — фазовая модуляция, при которой основная несущая модулируется частотами 1300 и 2100 Гц ОВЧ-радиостанции, устанавливаемыми на всех судах независимо от района плавания, в выделенном диапазоне частот обеспечивают работу на частотных каналах с разносом частот на 25 кГц и 12,5 кГц. Особую роль выполняют 70- и 16-й каналы. Вызовы между судами и вызовы судна береговой базовой станцией в режиме ТЕЛЕФОНИЯ производятся на 16-м канале (156,8 МГц), который является каналом бедствия, безопасности и вызова. 70-й канал (156,525 МГц) предназначен для автоматической радиосвязи с использованием ЦИВ [5]. Номинальная выходная мощность передатчика 25 Вт, чувствительность приемника около 0,4 мкВ.

Дальность связи существенно зависит от высоты установки антенны над уровнем моря и режима работы. При выходной мощности передатчика, равной 25 Вт в режиме ТЕЛЕФОНИЯ, если антенны установлены на высоте 4 м над уровнем моря, дальность связи между судами составляет 10 ... 16 миль, дальность связи между базовой станцией, установленной на высоте 100 м и судном, — 27 миль. Дальности действия в режиме ЦИВ возрастают примерно в два раза. Предусмотрено уменьшение выходной мощности передатчика до 1 Вт. В передатчике модулирующее напряжение подвергается предискажению плюс 6 дБ/октаву, в приемнике такому же искажению, но с обратным знаком (минус 6 дБ/октаву). Радиостанции питаются от сети постоянного тока.

3. Судовые терминалы ИНМАРСАТ-Fleet Broad Band

Мультимедийное семейство терминалов ИНМАРСАТ-Fleet позволяет работать как в глобальных, так и в зональных лучах спутников третьего и четвертого поколений, обеспечивая связь в режимах ТЕЛЕФОНИЯ, ФАКС, ДАННЫЕ и доступ к сети Интернет. Эти терминалы — наиболее совершенные, они обеспечивают потребителю большой комплекс услуг, относятся к четвертому поколению аппаратуры и являются мультимедийной аппаратурой связи, так как способны передавать и принимать все виды сообщений: символьную, графическую, звуковую, анимационную и видеоинформацию. Терминалы оснащены встроенными GPS-приемниками [6]. Схема связи при использовании терминалов стандарта ИНМАРСАТ-Fleet приведена на рис. 2.

Стандарт ИНМАРСАТ-Fleet оптимально согласуется с цифровыми сетями связи технологии ISDN (Integrated Service Digital Network), где скорость передачи данных составляет 64 кбит/с и более. Терминалы этого стандарта совместимы с любыми цифровыми ISDN-устройствами, такими как ISDN-модемы, видеотелефоны, маршрутизаторы локальных компьютерных сетей и т. д. (рис. 2). С помощью этих терминалов можно передавать и принимать фото- и видеоизображения [7].

Использование наряду с глобальными лучами зональных лучей спутников позволило создать в терминалах стандарта спутниковые модемы, которые обеспечивают доступ компьютерного оборудования пользователя к сети Интернет и к локальным вычислительным сетям.

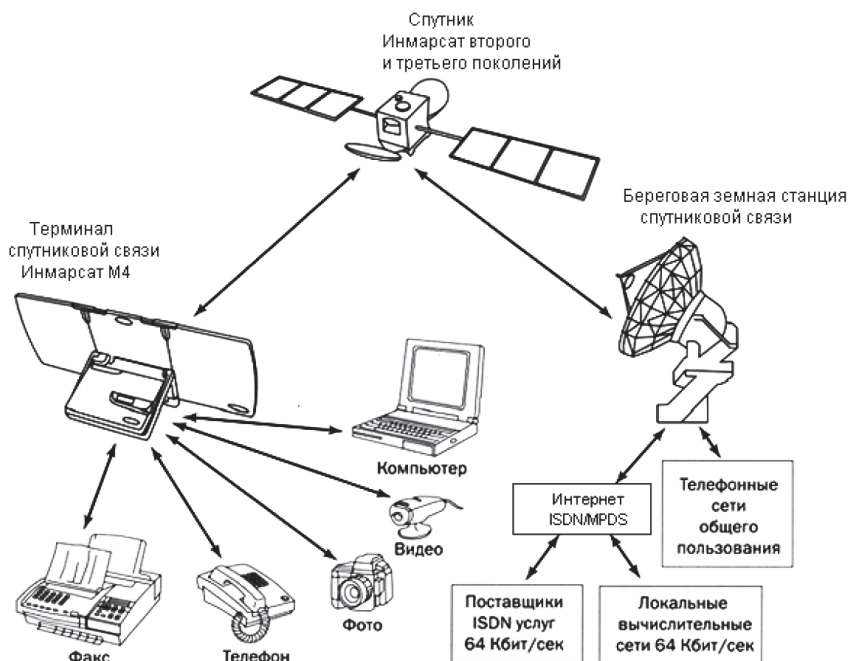


Рис. 2. Схема связи стандарта ИНМАРСАТ-Fleet

Протокол IP (Internet Protocol) поддерживает режим передачи данных MPDS (Mobile Packet Date Service — режим передачи данных с коммутацией пакетов) и обеспечивает мобильный высококачественный доступ к сети Интернет и к корпоративным сетям через спутниковый интернет-модем. Роль провайдеров выполняют операторы береговой земной станции ИНМАРСАТ. Стоимость 1 Мбайт информации в зависимости от наличия или отсутствия абонентской платы составляет 9,15 ... 14 долл. США.

В широкополосной сети отсутствуют задержки в установлении соединения, которые характерны для доступа по коммутируемым сетям, отсутствуют ошибки, вызванные потерей и восстановлением соединений. Пользователи модема обладают всеми возможностями работы в защищенных режимах сети Интернет [8]. На рис. 3 приведена диаграмма цена / объем данных, наглядно свидетельствующая о выгоде применения режима MPDS.

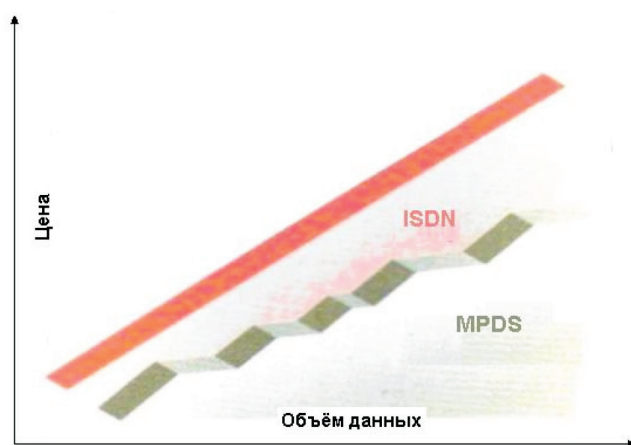


Рис. 3. Диаграмма зависимости цена / объем данных

Сеть ИНМАРСАТ, построенная на базе протокола Интернет IP, обеспечивает эффективную работу прикладных программ, в которых данные передаются пакетами, чередующимися с интер-

валами времени, когда данные не передаются: электронная почта E-mail, доступ к WWW-страницам, подключение к локальным корпоративным вычислительным сетям и частным сетям Ethernet. Сюда же относятся и такие задачи, как обмен файлами и загрузка файлов из ИНТРАНЕТ с использованием протокола FTP (File Transfer Protocole) [9]. Производителями терминалов стандарта ИНМАРСАТ Fleet являются фирмы: NERA (Норвегия) и Thrane & Thrane (Дания), JRC (Япония). Фирма «Thrane & Thrane» выпускает терминалы TT-3088A CAPSAT ® Fleet 33, TT-3086A CAPSAT Fleet 55, TT-3084A CAPSAT ® Fleet 77 [9].

На рис. 4 показан внешний вид терминала TT-3088A CAPSAT ® Fleet 33.



Рис. 4. Внешний вид терминала TT-3088A CAPSAT Fleet 33

Основные технические характеристики терминала для малотоннажных судов TT-3088A CAPSAT ® Fleet 33:

- режимы работы: ТЕЛЕФОНИЯ, ФАКС, E-mail, Internet;
- диапазон частот передатчика 1626,5 ... 1660,5 МГц;
- диапазон частот приемника 1525,0 ... 1559,0 МГц;
- частотный разнос между каналами при приеме 1,25 кГц;
- длина антенного кабеля 1 ... 10 м; 10 ... 30 м; 30 ... 50 м; 50 ... 70 м;
- скорость цифрового потока по зональным лучам в режимах:
ТЕЛЕФОНИЯ..... 4,8 кбит/с;
ФАКС..... 4,8 кбит/с;
- ДАННЫЕ с коммутацией пакетов (MPDS):
 - передача..... 64 кбит/с;
 - прием..... 28 кбит/с;
 - высота антенны..... 35 см;
 - диаметр антенны..... 35 см;
 - вес антенны..... 4,5 кг;
 - вес приемопередатчика..... 1,9 кг;
 - напряжение питания..... 12 или 24 В постоянного тока;
 - максимальная потребляемая мощность..... 108 Вт.

На рис. 5 приведена схема соединений судовых терминалов стандарта ИНМАРСАТ-Fleet для трех видов поставки: минимальный состав (белая непрерывная линия), по выбору (белая пунктирная линия), по дополнительному требованию (синие линии — соединения с маршрутизатором, питание, вход для NMEA сообщений) [10].

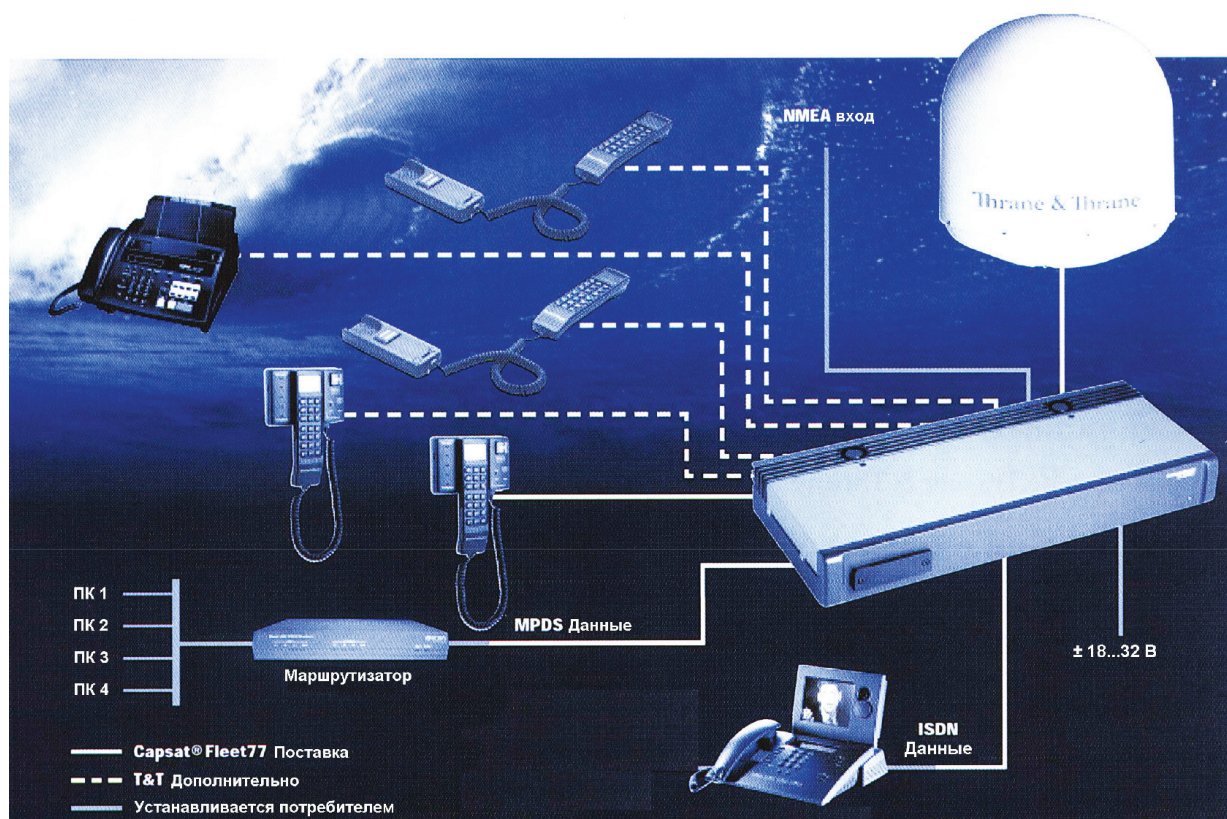


Рис. 5. Схема соединений судовых терминалов стандарта ИНМАРСАТ-Fleet

Новейший терминал Fleet Broad Band включён в состав судового радиооборудования (см. рис. 1) для судов в морских районах А3 или А4 как дополнительное средство, так как в морском районе А4 спутниковая система связи ИНМАРСАТ не работает. Во время плавания в морском районе А3 терминал Fleet Broad Band является эффективным средством связи. Он запущен в коммерческую эксплуатацию в 2008 г. [11].

Основное отличие терминала от предыдущих терминалов Fleet заключается в том, что новые терминалы могут передавать данные с максимальной скоростью 432 кбит/с и одновременно обеспечивать цифровую голосовую связь с полосой занимаемых частот 3,1 кГц [12].

Компания «Thorne&Thorne» разработала три типа терминалов Fleet Broad Band: Sailor 150 Fleet Broad Band, Sailor 250 Fleet Broad Band и Sailor 500 Fleet Broad Band.

Терминал Sailor 250 обеспечивает максимальную скорость 284 кбит/с, а Sailor 500 — 432 кбит/с.

Диаметр антенны Sailor 250 равен 30 см, вес — 3 кг, а диаметр антенны Sailor 500 равен 60 см, вес 18 кг.

4. Приёмники НАВТЕКС

Приёмники службы НАВТЕКС, устанавливаемые на всех судах водоизмещением более 300 рег. т независимо от района плавания, предназначены для автоматического круглосуточного приема с береговых станций НАВТЕКС навигационных и метеорологических извещений, предупреждений, сообщений по поиску и спасанию и срочной информации [1]. Передача сообщений выполняется на английском языке на международной частоте 518 кГц на дальности до 300 миль, а также на национальных языках на региональной частоте 490 кГц. Для улучшения передачи информации НАВТЕКС в экваториальной зоне предусмотрена частота 4209,5 кГц.

Передаваемые сообщения каждой станцией обновляются каждые 4 ч. Береговые станции службы НАВТЕКС работают попеременно, поэтому срочные сообщения печатаются,

если данное сообщение не было принято ранее в течение последних 72 ч. Режим излучения сигналов — F1B (частотная телеграфия), разнос между частотами 170 Гц, скорость передачи — 100 Бод.

Сообщения передаются в коде МТК-3 в режиме FEC (Forward Error Correction — прямое исправление ошибок). Каждая семибитовая кодовая комбинация передается дважды с временным разнесом. Перед началом работы передаются синхронизирующие посылки. Каждый принятый символ проверяется и выводится на печать в следующих случаях:

- если отношение чисел «1» и «0» в обеих кодовых комбинациях равно $\frac{3}{4}$ и кодовые комбинации одинаковы;
- если хотя бы в одной кодовой комбинации отношение чисел «1» и «0» равно $\frac{3}{4}$.

При обнаружении ошибки кодовая комбинация на печать не выводится, вместо символа печатается знак «*» (звездочка).

5. Судовые СЧ/ВЧ-радиостанции

Судовые СЧ/ВЧ-радиостанции обеспечивают симплексную или полудуплексную связь в диапазонах 1,6 ... 30,0 МГц с классами излучений [2]:

- однополосная телефония с верхней боковой полосой J3E (полностью подавленная несущая), R3E (частично подавленная несущая), H3E (полная несущая);
- однополосная телефония с нижней боковой полосой J3E;
- телефония A3E (двухполосная телефония с полной несущей) — только прием сигналов;
- факсимиле F3C (частотная модуляция несущей частоты) — только прием сигналов;
- факсимиле J3C (однополосная модуляция несущей частоты);
- телеграфия J2B (частотная телеграфия на поднесущих частотах боковой полосы). Применяется в режимах работы цифрового избирательного вызова (ЦИВ), ARQ (Automatic Repetition Request — автоматический запрос повторения) и FEC (Forward Error Correction — прямое исправление ошибок). Скорость передачи телеграфных посылок — 100 бод.

При классе излучения J2B приемное устройство настраивается на присвоенную частоту, которая отличается от несущей частоты вверх на 1700 Гц. Диапазон разрешенных рабочих частот для телеграфии составляет 4202 ... 25208 кГц.

Напомним, что морская радиосвязь в режиме однополосной телефонии использует верхнюю боковую полосу. Диапазон разрешенных рабочих частот для радиотелефонии составляет 4000 ... 27500 кГц. Выходная мощность передатчиков в зависимости от фирмы-изготовителя и типа радиостанции разная и меняется в пределах от 60 до 1200 Вт. Во всех радиостанциях применяются выносные устройства для автоматического согласования антенны с волновым сопротивлением фидера на всех рабочих частотах.

Управление радиостанцией производится с помощью наборного поля с клавиатурой. На дисплее индицируются частоты приема и передачи, время, режим работы, уровень выходной мощности и т. д. С помощью кнопочной клавиатуры можно управлять радиостанцией, послать сигнал бедствия на частоте 2182 кГц (ТЕЛЕФОНИЯ) или на частотах ЦИВ: 2187,5; 4207,5; 6312,0; 8414,5; 12577,0; 16804,5 кГц.

В приемопередатчик может быть встроен модем ТЕЛЕКС / ЦИВ и дежурный приемник ЦИВ на частотах бедствия и безопасности ГМССБ. При совместной работе с ЦИВ в СЧ-диапазоне постоянно работает дежурный приемник на частоте ЦИВ 2187,5 кГц. При работе в ВЧ-диапазоне сканируются шесть частот ЦИВ: 2187,5; 4207,5; 6312,0; 8414,5; 12577,0; 16804,5 кГц.

Блок настройки антенны согласует сопротивление излучения антенны с сопротивлением кабеля на всех рабочих частотах и во всех режимах работы. Печатающее устройство может быть применено простейшего вида с клавиатурой для работы в режиме ТЕЛЕКС. Вместо простейшего печатающего устройства можно использовать персональный компьютер и принтер. Как правило, передатчик имеет сетку частот через 100 Гц в диапазоне от 1,6 до 30 МГц, приемник — сетку частот через 10 Гц в диапазоне от 10 кГц до 30 МГц.

В ВЧ-диапазоне радиосвязь построена на основе ионосферных пространственных волн. Пространственные волны, отражаясь от поверхности Земли и соответствующих слоёв ионосферы, обеспечивают неограниченную дальность радиосвязи. В места приема поступают пространственные волны, однократно или двукратно отраженные от слоёв ионосферы, поэтому прием сигналов всегда сопровождается замираниями [7].

Для надежной радиосвязи в ВЧ-диапазоне ежемесячно составляется прогноз волнового расписания, в котором указывается, на каких несущих рабочих частотах следует работать в различные часы суток. Выбор рабочих частот является наиболее сложным в полярных широтах (морской район А4 ГМССБ), где наиболее сложно составить волновое расписание для линий радиосвязи, ориентированных вдоль параллели, когда часть трассы является «дневной», а другая часть — «ночной».

Учитывая, что дальность действия СЧ-радиостанций не превышает 600 км, единственным средством дальней радиосвязи в морском районе А4 является ВЧ-радиосвязь. Дальность действия ВЧ-радиостанций практически не ограничена. Однако существуют трудности установления оперативной радиосвязи между абонентами, обусловленные следующими факторами:

- необходимостью выбора оптимальной рабочей частоты, величина которой зависит от времени суток, сезона года, одиннадцатилетней солнечной активности, направления и длины трассы;
- неразвитостью инфраструктуры ионосферных станций для оперативного контроля состояния ионосферы;
- замиранием сигналов на выходе приёмного устройства из-за интерференции при многолучевом приёме;
- замиранием сигналов на выходе приёмного устройства из-за изменения вида поляризации сигналов в ионосфере и магнитном поле Земли;
- необходимостью адаптации к меняющимся условиям приёма сигналов при ведении радиосвязи;
- малой скоростью передачи в режиме телеграфии из-за дисперсионных искажений в ионосфере формы сигналов;
- высоким уровнем атмосферных, промышленных и контактных помех;
- пропаданием радиосвязи при мощных солнечных вспышках.

На основе анализа последних достижений в области электронной навигации, выполненного по материалам отечественной и зарубежной печати, следует, что необходимы специальные меры для повышения надёжности и оперативности ВЧ-радиосвязи. Эти меры связаны с использованием новых режимов излучений и модернизацией существующего судового ВЧ-радиооборудования [7].

Выводы

1. Модернизация современного судового ВЧ-радиооборудования на основе последних достижений в области электронной навигации необходима для обеспечения надёжной и оперативной радиосвязи в морском районе А4 ГМССБ.
2. Использование стандартного набора радиооборудования больше нацелено на решение задач безопасности и работе при бедствии.
3. Применение СЧ/ВЧ-радиостанций для оперативной связи сопряжено с рядом объективных сложностей, связанных с особенностями распространения радиоволн. Решение данного вопроса возможно при широком использовании компьютеризированной радиосвязи, а также использовании перспективных видов модуляции.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Резников В. Ю. Судовая радиосвязь. Справочник по организации и радиооборудованию ГМССБ / В. Ю. Резников, Ю. М. Устинов, А. А. Дуров [и др.] / под общ. ред. Ю. М. Устинова. — СПб.: Судостроение, 2002. — 480 с.

2. *Маринич А. Н.* Современное судовое оборудование средств электронной навигации, ГМССБ и береговая единая система контроля и управления судоходством: монография / А. Н. Маринич, А. В. Припотнюк, Ю. М. Устинов [и др.] / под ред. Ю. М. Устинова. — Петропавловск-Камчатский: Камчат. ГТУ, 2007. — 261 с.
3. *Ильин А. А.* Цифровые терминалы спутниковых систем связи: справ. изд. / А. А. Ильин, А. Н. Маринич, А. В. Припотнюк, Ю. М. Устинов / под общей ред. Ю. М. Устинова. — СПб.: Деан, 2005. — 192 с.
4. Sub-committee on radiocommunications and search and rescue COMSAR. — 2012. — 16th session. — item 17.
5. *Решетняк С. В.* Теоретические основы оценки изученности рельефа дна арктических морей (Северный морской путь) по критерию навигационно-гидрографического обеспечения: дис. ... д-ра техн. наук / С. В. Решетняк. — СПб.: ГМА им. адм. С. О. Макарова, 2009. — 123 с.
6. *Устинов Ю. М.* Анализ современного состояния судовых средств связи и спасания / Ю. М. Устинов, А. В. Припотнюк, А. И. Кулинич // Вестник Государственного университета морского и речного флота имени адмирала С. О. Макарова. — 2016. — № 2 (36). — С. 166–174. DOI: 10.21821/2309-5180-2016-8-2-166-174.
7. *Рутледж Д.* Энциклопедия практической электроники: пер. с англ. / Д. Рутледж. — М.: ДМК Пресс, 2002. — 528 с.
8. *Кулинич А. И.* Передача данных позиционирования судов в северных широтах с помощью спутниковых систем связи на круговых и эллиптических орбитах для решения задач мониторинга / А. И. Кулинич // Вестник Камчатского государственного технического университета. — 2012. — № 22. — С. 14–18.
9. *Кулинич А. И.* Мониторинг судов на северных широтах с помощью терминалов ИНМАРСАТ-С и ИНМАРСАТ-D+ путём использования модифицированной квазистационарной орбиты системы связи ИНМАРСАТ / А. И. Кулинич, А. Н. Маринич, А. В. Припотнюк, Ю. М. Устинов // Спутниковые технологии и бизнес. — 2013. — Декабрь. — С. 8–12.
10. *Кулинич А. И.* Простейшие судовые терминалы IsatData Pro и IsatPhone Pro для передачи данных и телефонии по системе Инмарсат / А. И. Кулинич, А. Н. Маринич, Ю. М. Устинов // Морское образование: традиции, реалии и перспективы: материалы науч.-практ. конф. 31 марта 2015 г. — СПб.: Изд-во ГУМРФ им. адм. С. О. Макарова, 2015. — Т. 2. — С. 127–131.
11. *Выгонский Ю.* Анализ возможности создания системы спутниковой связи для обслуживания Арктического района / Ю. Выгонский, А. Кузовников, В. Головкин // Спутниковые технологии и бизнес. — 2014. — № 5. — С. 24–31.
12. *Маринич А. Н.* Обзор мобильных спутниковых телефонов для персональной связи на море / А. Н. Маринич, А. В. Припотнюк, Ю. М. Устинов // CONNECT. Мир информационных технологий. — 2014. — № 12. — С. 76–79.

REFERENCES

1. Reznikov, V. Ju., Ju. M. Ustinov, A. A. Durov, et al. *Sudovaja radiosvjaz. Spravochnik po organizacii i radiooborudovaniju GMSSB*. SPb.: Sudostroenie, 2002.
2. Marinich, A. N., A. V. Pripotnjuk, Ju. M. Ustinov, et al. *Sovremennoe sudovoe oborudovanie sredstv jelektronnoj navigacii, GMSSB i beregovaja edinaja sistema kontrolja i upravlenija sudohodstvom: monografija*. Petropavlovsk-Kamchatskij: Kamchat. GTU, 2007.
3. Ilin, A. A., A. N. Marinich, A. V. Pripotnjuk, and Ju. M. Ustinov. *Cifrovye terminaly sputnikovyh sistem svjazi. Spravochnoe izdanie*. SPb.: Dean, 2005.
4. Sub-committee on radiocommunications and search and rescue COMSAR. 2012. 16th session. Item 17.
5. Reshetnyak, S. V. *Teoreticheskie osnovy otsenki izuchennosti rel'efa dna arkticheskikh morei (Severnyj Morskoi Put') po kriteriyu navigatsionno-gidrograficheskogo obespecheniya*. Dr. diss. SPb.: GMA, 2009.
6. Ustinov, Yury Matveevich, Andrey Vladimirovich Pripotnyuk, and Andrey Ivanovich Kulinich. "Analysis of the current state of ship communications and rescue equipment." *Vestnik Gosudarstvennogo universiteta morskogo i rechnogo flota imeni admirala S.O. Makarova* 2(36) (2016): 166–174. DOI: 10.21821/2309-5180-2016-8-2-166-174.
7. *Entsiklopediya prakticheskoi elektroniki*. M.: DMK Press, 2002.
8. Kulinich, A. I. "Data transmission of vessels positioning in northern latitudes by means of satellite com-

munication systems in circular and elliptic orbits for the decision of monitoring problems.” *Bulletin of Kamchatka State Technical University* 22 (2012): 14–18.

9. Kulinich, A. I., A. N. Marinich, A. V. Pripotnjuk, and Ju. M. Ustinov. “Monitoring sudov na severnyh shiroтах s pomoshhju terminalov INMARSAT-S i INMARSAT-D+ putjom ispolzovaniya modifitsirovannoj kvazis-tacionarnoj orbity sistemy svyazi INMARSAT.” *Sputnikovytehnologii i biznes* December (2013): 8–12.

10. Kulinich, A. I., A. N. Marinich, and Ju. M. Ustinov. “The simplest marine terminal IsatData Pro i Isat-Phone Pro for data and telephony services on the Inmarsat system.” *Morskoe obrazovanie: tradicii, realii i perspektivy: materialy nauchno-prakticheskoy konferencii. 31 marta 2015 g.* SPb.: Izd-vo GUMRF im. adm. S. O. Makarova, 2015. Vol. 2. 127–131.

11. Vygonskij, Ju., A. Kuzovnikov, and V. Golovkov. “Analiz vozmozhnosti sozdaniya sistemy sputnikovoj svyazi dlja obsluzhivaniya Arkticheskogo rajona.” *Sputnikovytehnologii i biznes* 5 (2014): 24–31.

12. Marinich, A. N., A. V. Pripotnjuk, and Ju. M. Ustinov. “Obzor mobilnyh sputnikovyh telefonov dlja personalnoj svyazi na more.” *CONNECT. Mir informacionnyh tehnologij* 12 (2014): 76–79.

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

Кулинич Андрей Иванович — аспирант

Научный руководитель:

Устинов Юрий Матвеевич

ФГБОУ ВО «ГУМРФ имени

адмирала С. О. Макарова»

198035, Российская Федерация, Санкт-Петербург,

ул. Двинская 5/7

e-mail: kaf_tsn@gumrf.ru

Припотнюк Андрей Владимирович —

инструктор МУТЦ, методист направления ГМССБ.

ФГБОУ ВО «ГУМРФ имени

адмирала С. О. Макарова»

198035, Российская Федерация, Санкт-Петербург,

ул. Двинская 5/7

e-mail: apripotnyuk@mts.spb.su

Устинов Юрий Матвеевич —

доктор технических наук, профессор

ФГБОУ ВО «ГУМРФ имени

адмирала С. О. Макарова»

198035, Российская Федерация, Санкт-Петербург,

ул. Двинская 5/7

e-mail: kaf_tsn@gumrf.ru

INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Kulinich, Andrey I. — Postgraduate

Supervisor:

Ustinov, Yuri M.

Admiral Makarov State University

of Maritime and Inland Shipping

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

Russian Federation

e-mail: kaf_tsn@gumrf.ru

Pripotnyuk, Andrey V. —

Instructor of Makarov Training Centre.

Admiral Makarov State University

of Maritime and Inland Shipping

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

Russian Federation

e-mail: apripotnyuk@mts.spb.su

Ustinov, Yuri M. —

Dr. of Technical Sciences, professor

Admiral Makarov State University

of Maritime and Inland Shipping

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

Russian Federation

e-mail: kaf_tsn@gumrf.ru

Статья поступила в редакцию 20 декабря 2016 г.

Received: December 20, 2016.

ИНФОРМАЦИОННЫЕ ТЕХНОЛОГИИ И АВТОМАТИЗАЦИЯ НА ТРАНСПОРТЕ

DOI: 10.21821/2309-5180-2017-9-1-211-220

REDUCED-ORDER OBSERVER ALGORITHM COURSE MANAGEMENT SYSTEM OF THE SHIP TO ASSESS DISTURBANCE AND NOISE MEASUREMENTS

V. V. Saharov, A. A. Chertkov, S. V. Saburov

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

To increase reliability and ensure the required quality indicators of the automatic control system course ship need reliable information on the dynamic model of the State vector, adequate to the real object. When exposed to ship outside disturbances, resulting in noise in the measured signals are required to ensure that lowering noise by filtering and sensor application of mathematical information. Sensors can be synthesized using dynamic observers and evaluators. Since the conditions of use of autopilots vector state is always available for the dimension, you must manage the process on the vector output. For optimal control requires data recovery on vector output. When moving a ship in the midst of the excitement of external perturbations cause additional components of error in assessing the vector state. This significantly deteriorate the qualitative indices of ship autopilots complexes and their increasing need to use methods and computational procedures stochastic filtering.

The method and algorithm of dynamic observers reduced dimensionality (Observer David Luenberger), notable for the fact that it reduces the error estimation of the vector of state variables of the channel object, functioning in the face of changing external Wednesday, by constructing a model of the extended status object system Wednesday. Score is based on algorithms of linearization of nonlinear state-space models using optimal filtration, laboratory matrix instrumentation and computer technology. An example of the calculation of the three-dimensional dynamic observer to evaluate the perturbation vectors and noise measurements made on the basis of the proposed algorithm. The results of the evaluation of state variables and perturbations produced using canonical forms of State equations correspond to the best (performance) the transitional processes in these dynamic models when translating from a given initial state in the settled condition in minimal time.

Keywords: dynamic model of a ship, the observer reduced dimension vector output, algorithm, modal synthesis method of systems.

For citation:

Saharov, Vladimir V., Alexandr A. Chertkov, and Sergei V. Saburov. "Reduced-order observer algorithm course management system of the ship to assess disturbance and noise measurements." *Vestnik Gosudarstvennogo universiteta morskogo i rechnogo flota imeni admirala S.O. Makarova* 9.1 (2017): 211–220. DOI: 10.21821/2309-5180-2017-9-1-211-220.

УДК. 621.398.04

АЛГОРИТМ НАБЛЮДАТЕЛЯ ПОНИЖЕННОГО ПОРЯДКА СИСТЕМЫ УПРАВЛЕНИЯ КУРСОМ СУДНА ДЛЯ ОЦЕНКИ ВОЗМУЩЕНИЙ И ШУМОВ ИЗМЕРЕНИЙ

В. В. Сахаров, А. А. Чертков, С. В. Сабуров

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

Для повышения надежности и обеспечения требуемых качественных показателей системы автоматического управления курсом судна необходима достоверная информация о векторе состояния динамической модели, адекватной реальному объекту. При воздействии на судно внешних возмущений, приводящих к появлению помех в измеряемых сигналах, требуется обеспечить понижение уровня шумов путем фильтрации и примене-

ния математических датчиков информации. Датчики могут быть синтезированы с использованием динамических наблюдателей и оценщиков. Поскольку в условиях эксплуатации авторулевых вектор состояния не всегда доступен для измерения, необходимо управлять процессом по вектору выхода. Для оптимального управления требуется восстановление информации по вектору выхода. При движении судна в условиях волнения внешние возмущения приводят к возникновению дополнительных составляющих погрешности в оценке вектора состояния. При этом значительно ухудшаются качественные показатели судовых авторулевых комплексов, и для их повышения требуется использовать методы и вычислительные процедуры стохастической фильтрации.

Рассматривается метод и алгоритм динамического наблюдателя пониженной размерности (наблюдателя Давида Луенбергера), отличающийся тем, что он позволяет уменьшить погрешность оценки вектора переменных состояния судового объекта, функционирующего в условиях изменяющейся внешней среды, путем построения модели состояния расширенной системы «объект – среда». Оценка производится на основе алгоритмов линеаризации нелинейных моделей в пространстве состояния с использованием оптимальной фильтрации, инструментария матричной лаборатории и компьютерных технологий. Приведен пример расчета трехмерного динамического наблюдателя для оценки векторов возмущений и шумов измерений, выполненный на основе предложенного алгоритма. Результаты оценки переменных состояния и возмущений, полученные с использованием канонических форм уравнений состояния, соответствуют оптимальным (по быстрдействию) переходным процессам в рассматриваемых динамических моделях при переводе из заданного начального состояния в установившееся состояние за минимальное время.

Ключевые слова: динамическая модель судна, наблюдатель пониженной размерности, вектор выхода, алгоритм, модальный метод синтеза систем.

Для цитирования:

Сахаров В. В. Алгоритм наблюдателя пониженного порядка системы управления курсом судна для оценки возмущений и шумов измерений / В. В. Сахаров, А. А. Чертков, С. В. Сабуров // Вестник Государственного университета морского и речного флота имени адмирала С. О. Макарова. — 2017. — Т. 9. — № 1. — С. 11–220. DOI: 10.21821/2309-5180-2017-9-1-211-220.

Введение

Системы автоматизации и управления технологическими процессами на современных водоизмещающих судах характеризуются высокой размерностью и сложностью. Для обеспечения оптимального управления судовыми динамическими системами требуется получение достоверной информации о переменных состояния. Обеспечение заданной точности и надежности управления объектом при воздействии возмущений на измерения углов курса и крена, а также угловой скорости вращения судна требует компромиссных решений, связанных с выбором быстрдействия системы и точности оценки переменных состояния. Вектор состояния не всегда доступен для измерений. Если измерение вектора состояния затруднено по каким-либо причинам, можно воспользоваться математическими датчиками, выполненными на основе наблюдателей неполной размерности. Измерения возмущений связаны с появлением дополнительных составляющих ошибки оценки переменных состояния. Наряду с инструментальными датчиками информации, применение математических датчиков позволяет идентифицировать параметры и структуру управляемых систем средствами и методами теории идентификации с оценками на основе аналоговых и цифровых фильтров. В системах реального времени оценки должны производиться с использованием методов и вычислительных процедур стохастической и, в частности, биномиальной фильтрации.

Развитие и совершенствование способов конструирования динамических наблюдателей, предложенных в [1] – [7], а также их практическое применение на судах позволяют значительно повысить эффективность и надежность эксплуатации объектов водного транспорта средствами автоматизации, создать механизм алгоритмизации процессов энергосбережения. С учетом специфики воздействия на объект внешних сил и моментов в допустимой области вариации параметров нелинейные модели, как показано в [5], [6] и [10] – [12], приводятся к линейным моделям. Вместе с тем практическое использование наблюдателей для оценки векторов возмущений и шумов измерений на конкретных объектах также имеет свою специфику, которая должна учитываться в процессе синтеза [13] – [14].

Кроме наблюдателей полного порядка, или наблюдателей Калмана, у которых размерность вектора состояния равна размерности вектора состояния объекта, могут быть предложены также наблюдатели Давида Луенбергера пониженного порядка [4]. Такие наблюдатели используют информацию о состоянии объекта, непосредственно содержащуюся в измерениях вектора выхода. Это позволяет построить алгоритм оценки с помощью модели порядка $(n - p)$, где $p = \text{rank}(C)$. Обычно $p = 1$.

Основная часть

Покажем возможность построения наблюдателя пониженного порядка на примере стационарного полностью наблюдаемого объекта, уравнения состояния которого имеют вид:

$$\begin{aligned}\dot{x}(t) &= Ax(t) + Bu(t); \\ y(t) &= Cx(t),\end{aligned}\tag{1}$$

где A — $(n \times n)$ -матрица; B — $(n \times k)$ -матрица и C — $(p \times n)$ -матрица постоянных коэффициентов; $x(t)$ — $(n \times 1)$ -мерный вектор состояния; $u(t)$ и $y(t)$ — векторы управления и выхода соответствующей размерности. Измерения производятся для части переменных состояния, если $p < n$. Для системы управления с одним входом матрица B для системы с одним входом имеет размерность $(n \times 1)$.

Пусть ранг матрицы C равен p . Для упрощения уравнения выхода выполним преобразование базиса в уравнении (1). Выберем произвольную $(n - p) \times n$ -матрицу F так, чтобы матрица

$$T = \begin{bmatrix} F \\ C \end{bmatrix}$$

была невырожденной. Это всегда возможно выполнить, так как $\text{rank } C = p$. Введем новый вектор состояния $z(t) = T \cdot x(t)$ и представим его в данном виде:

$$z(t) = \begin{bmatrix} w(t) \\ y(t) \end{bmatrix} \begin{matrix} \} n - p; \\ \} p, \end{matrix}$$

где $w(t) \in R^{n-p}$, $y(t) \in R^p$, т. е. выходы объекта совпадают в выбранном базисе с последними p компонентами его вектора состояния. Выполнив преобразование базиса с матрицей T , перейдем к уравнениям состояния:

$$\begin{bmatrix} \dot{w}(t) \\ \dot{y}(t) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} A_{11} & A_{12} \\ A_{21} & A_{22} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} w(t) \\ y(t) \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} B_1 \\ B_2 \end{bmatrix} u(t).\tag{2}$$

Из системы (2) можно выделить структуру (подсистему) порядка $(n - p)$ с известными (доступными измерению) входами $u(t)$, $y(t)$. Заметим, для нее всегда можно выбрать требуемые коэффициенты характеристического уравнения.

Рассмотрим алгоритм синтеза наблюдателя пониженного порядка на примере наблюдателя $(n - 1)$ порядка для системы со скалярным выходом ($\text{rank } C = 1$). Алгоритм синтеза наблюдателя пониженной размерности состоит из следующих шагов [4], [9].

1. Путем линейного преобразования уравнения состояния объекта (матрицы A , B , C) приведем преобразования к форме идентификационного канонического представления (ИКП), или наблюдаемой форме Давида Луенбергера [4], при которой матрица A является транспонированной матрицей Фробениуса:

$$A_F = \begin{bmatrix} 0 & 1 & 0 & \dots & 0 \\ 0 & 0 & 1 & \dots & 0 \\ \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \\ 0 & 0 & 0 & \dots & 1 \\ -\alpha_n & -\alpha_{n-1} & -\alpha_{n-2} & \dots & -\alpha_1 \end{bmatrix},\tag{3}$$

где $\alpha_1, \alpha_2, \dots, \alpha_n$ — коэффициенты характеристического многочлена объекта; матрица C равна

$$C = [0, \dots, 0 \ 1].\tag{4}$$

2. Выберем желаемые коэффициенты β_i характеристического полинома наблюдателя:

$$(\det I_{n-1} - A_n) = s^{n-1} + \beta_1 s^{n-2} + \dots + \beta_{n-1}.$$

3. Строим матрицу преобразования P вида:

$$P = \begin{bmatrix} & & & -\beta_{n-1} \\ & I_{n-1} & & -\beta_{n-2} \\ & & \dots & \\ & & & -\beta_1 \\ 0 & \dots & 0 & 1 \end{bmatrix}; \quad P^{-1} = \begin{bmatrix} & & & \beta_{n-1} \\ & I_{n-1} & & \beta_{n-2} \\ & & \dots & \\ & & & \beta_1 \\ 0 & \dots & 0 & 1 \end{bmatrix}. \quad (5)$$

Нетрудно заметить, что если матрица приведена к виду ИКП, то в результате преобразования получим

$$\tilde{A} = PAP^{-1} = \begin{bmatrix} 0 & 0 & \dots & 0 & -\beta_{n-1} & (\alpha_1 - \beta_1)\beta_{n-1} - \alpha_n \\ 1 & 0 & \dots & 0 & -\beta_{n-2} & (\alpha_1 - \beta_1)\beta_{n-2} - \alpha_{n-1} + \beta_{n-1} \\ \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \\ 0 & 0 & \dots & 1 & -\beta_1 & (\alpha_1 - \beta_1)\beta_1 - \alpha_2 + \beta_2 \\ 0 & 0 & \dots & 0 & 1 & -\alpha_1 + \beta_1 \end{bmatrix}, \quad (6)$$

а также

$$\tilde{B} = \begin{bmatrix} b_1 - \beta_{n-1}b_n \\ b_2 - \beta_{n-2}b_n \\ \dots \\ b_{n-1} - \beta_1b_n \\ b_n \end{bmatrix}. \quad (7)$$

Выделим из матрицы $\tilde{A}$ верхнюю треугольную подматрицу $\bar{A}$ порядка $(n-1)$ и расположим ее в верхнем левом углу матрицы $\tilde{A}$. образуем первые $(n-1)$ -строк матрицы $\tilde{B}$, из которых сформируем матрицу (вектор-столбец) $\bar{B}$. Введем обозначение верхних $(n-1)$ -строк последнего столбца матрицы $\tilde{A}$ символом $\bar{a}_n$. Тогда уравнение наблюдателя Луенбергера примет вид

$$\dot{\tilde{x}}(t) = \bar{A}\tilde{x}(t) + \bar{a}_n y(t) + \bar{B}u(t).$$

Для оценки вектора состояния в исходном базисе, представленном в форме ИКП, образуем вектор $\tilde{x}(t) = \text{col}\{\tilde{x}(t), y(t)\}$. Оценку состояния в базисе ИКП получим по формуле

$$\hat{x}(t) = P^{-1}\tilde{x}(t).$$

Рассмотрим процедуру синтеза наблюдателя $(n-1)$ -порядка для оценки возмущений и шумов измерений. Сначала выберем модель управляемого объекта с возмущениями, которые интерпретируются решениями дифференциальных уравнений с изменяющимися начальными условиями, что позволяет косвенно оценить влияние внешних воздействий. С учетом полученных оценок будем иметь модель внешних воздействий, которую введем в состав расширенной динамической системы (объект, внешние возмущения) и получим наблюдатель. В результате оценки будут содержать как оценки вектора состояния объекта, так и внешних воздействий.

В тех случаях, когда внешние воздействия моделируются рядами, состоящими из многочленов вида

$$\sum_{i=1}^N e^{\lambda_i t} P_i(t),$$

процедура синтеза наблюдателя значительно упрощается. Здесь $\lambda_i \in \Lambda$ — постоянные; $P_i(t)$ — многочлены с заданными коэффициентами. Упрощение обеспечивается за счет того, что такие модели представляют собой систему линейных дифференциальных уравнений с постоянными

коэффициентами, для которых, например, в системе MATLAB содержатся функции, предназначенные для исследования инвариантных во времени систем с помощью LTI (Linear Time Invariant) объектов. LTI-объекты можно исследовать во временной и частотной областях с помощью специальных функций практически в режимах прямых вычислений.

Рассмотрим алгоритм оценки внешних воздействий для модели объекта, заданной уравнениями состояния:

$$\begin{cases} \dot{x}(t) = A(t)x(t) + B(t)u(t) + f(t); \\ y(t) = C(t)x(t) + v(t), \end{cases} \quad (8)$$

при начальных условиях $x(t_0) = x_0$, $t \geq t_0$. Здесь $x(t) \in R^n$ — вектор состояния объекта; $u(t) \in R^m$, $y(t) \in R^l$ — векторы управления и выхода; $A(t)$, $B(t)$, $C(t)$ — матрицы линейной нестационарной системы; $f(t)$, $v(t)$ — воздействующие на объект, соответственно, внешние возмущения и шум (погрешность) измерений. В процессе синтеза наблюдателя выполняются измерения $u(t)$, $y(t)$, неизмеряемыми переменными являются $x(t)$, $f(t)$, $v(t)$.

Представим внешние воздействия $f(t)$, $v(t)$ в виде выходных процессов линейной системы, заданной в пространстве состояний уравнениями:

$$\begin{aligned} \dot{x}_c(t) &= A_c(t)x_c(t); \\ y_c(t) &= C_c(t)x_c(t); \quad x_c(t_0) = x_{c0}; \quad t \geq t_0, \end{aligned} \quad (9)$$

где $x_c(t)$ — вектор состояния среды размерности $(n_c \times 1)$; $y_c(t)$ — вектор выхода модели внешних возмущений размерности $((n_c + l) \times 1)$.

Заметим, что $y_c(t) = \text{col}\{f(t), v(t)\}$. A_c , C_c — известные матрицы. Составная матрица C_c

$$C_c = \begin{bmatrix} C_f \\ C_v \end{bmatrix}$$

содержит подматрицу C_f размерности $(n \times n_c)$ и подматрицу C_v размерности $(l \times n_c)$, которые определяют связь $x_c(t)$ и $f(t)$ с помехами $v(t)$ в (1). В системе (9) вектор начальных состояний x_{c0} также неизвестен.

Введем расширенный («совокупный») вектор состояния системы «объект – среда»:

$$\bar{x}(t) = (x(t), x_c(t)) \in R^{n \times n_c}.$$

Объединив уравнения (8) и (9), получим уравнения расширенной системы в виде:

$$\begin{aligned} \dot{\bar{x}}(t) &= \bar{A}(t)\bar{x}(t) + \bar{B}u(t); \\ \bar{y}(t) &= \bar{C}(t)\bar{x}(t); \quad \bar{x}(t_0) = \bar{x}_0; \quad t \geq t_0. \end{aligned} \quad (10)$$

Матрицы состояния, управления и выхода этой системы имеют вид:

$$\bar{A} = \begin{bmatrix} A & C_f \\ 0_{n_c \times n} & A_c \end{bmatrix}; \quad \bar{B} = \begin{bmatrix} B \\ 0_{n_c \times m} \end{bmatrix}; \quad \bar{C} = [C \quad C_v].$$

Видно, что для динамической системы (10) размерности $\bar{n} = n + n_c$ может быть предложен наблюдатель со следующей структурой:

$$\begin{cases} \dot{\hat{x}}(t) = \bar{A}(t)\hat{x}(t) + \bar{B}(t)u(t) + L(t)(y(t) - \hat{y}(t)); \\ \hat{y}(t) = \bar{C}(t)\hat{x}(t), \quad \hat{x}(t_0) = \hat{x}_0, \quad t \geq t_0. \end{cases} \quad (11)$$

где $\hat{x}(t) \in R^n$ — вектор состояния наблюдателя, служащий оценкой состояния модели «объект – среда»; $\hat{y}(t) \in R^l$ — вектор выхода наблюдателя, служащий оценкой выхода расширенной системы объекта и среды; $L(t)$ — матрица (размерности $(n \times l)$) коэффициентов обратной связи по невязке между выходами расширенной системы и наблюдателя.

Рассмотрим процедуру оценки влияния возмущений и шумов измерений на примере упрощенной модели судна:

$$I_x \frac{d^2\theta}{dt^2} = u(t) + M(t), \quad (12)$$

где I_x — момент инерции судна относительно продольной оси; $\theta(t)$ — угол крена судна; $u(t)$, $M(t)$ — управляющий и возмущающий моменты.

Если вектор $u(t)$ известен и угловая скорость крена $\omega_x(t) = \frac{d\theta}{dt}(t)$ доступна для измерений, то оценке подлежит возмущающий момент $M(t)$.

Для переменной $M(t)$, моделируемой линейной функцией $M(t) = M_0 + vt$ с неизвестными M_0 и v , предлагается модель

$$\begin{cases} \dot{M}(t) = v(t); \\ \dot{v}(t) = 0 \end{cases} \quad (13)$$

с неизвестными начальными условиями $M(0)$ и $v(0)$, на основе которой в работе получено уравнение состояния вида (10) с матрицами $\bar{A}, \bar{B}, \bar{C}$:

$$\bar{A} = \begin{bmatrix} 0 & 1/I_x & 0 \\ 0 & 0 & 1 \\ 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}; \quad \bar{B} = \begin{bmatrix} 1/I_x \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix}; \quad \bar{C} = [1 \quad 0 \quad 0]. \quad (14)$$

Построим модель наблюдателя $(n-1)$ -порядка для оценки возмущений и шумов измерений. Исходной моделью объекта будут служить уравнения расширенной системы (12), (13) с матрицами (14). На основе изложенного алгоритма уравнения состояния системы сначала приводятся к виду ИКП. С помощью формул (3) и (4) построим матрицы $\tilde{A}, \tilde{C}$ канонического вида:

$$\tilde{A} = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 \\ 1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 \end{bmatrix}; \quad \tilde{C} = [0 \quad 0 \quad 1].$$

Затем определяются матрицы наблюдаемости Q исходной системы и $\tilde{Q}$ — системы вида ИКП. В результате находятся матрицы преобразования T :

$$Q = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & I_x^{-1} & 0 \\ 0 & 0 & I_x^{-1} \end{bmatrix}; \quad \tilde{Q} = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 1 \\ 0 & 1 & 0 \\ 1 & 0 & 0 \end{bmatrix};$$

$$T = Q^{-1}Q = \begin{bmatrix} 0 & 0 & I_x^{-1} \\ 0 & I_x^{-1} & 0 \\ 1 & 0 & 0 \end{bmatrix}.$$

Выберем желаемый порядок характеристического многочлена наблюдателя в форме многочлена Баттерворта, для которого известны переходные процессы и корни характеристического уравнения:

$$A_n(s) = s^2 + \sqrt{2}\Omega_0 s + \Omega_0^2,$$

где с помощью параметра Ω_0 задается быстродействие наблюдателя. Тогда $\beta_1 = \sqrt{2}\Omega_0$, $\beta_2 = \Omega_0^2$.

Матрицу преобразования P приведем к каноническому виду (5):

$$P = \begin{bmatrix} 1 & 0 & -\Omega_0^2 \\ 0 & 1 & -\sqrt{2}\Omega_0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}; \quad P^{-1} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & \Omega_0^2 \\ 0 & 1 & \sqrt{2}\Omega_0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}.$$

Теперь нетрудно с помощью (6) – (7) сформировать матрицы:

$$\tilde{A} = P\tilde{A}P^{-1} = \begin{bmatrix} 0 & -\Omega_0^2 & -\sqrt{2}\Omega_0^3 \\ 1 & -\sqrt{2}\Omega_0 & -\Omega_0^2 \\ 0 & 1 & \sqrt{2}\Omega_0 \end{bmatrix}; \quad \tilde{B} = \begin{bmatrix} -\Omega_0 I_x^{-1} \\ -\sqrt{2}\Omega_0 I_x^{-1} \\ J_x^{-1} \end{bmatrix}.$$

Матрица $\tilde{A}$ содержит подматрицу $\bar{A}$ второго порядка и верхние две строки матрицы $\tilde{B}$, из которых образуем вектор-столбец $\bar{B}$. Тогда имеем:

$$\bar{A} = \begin{bmatrix} 0 & -\Omega_0^2 \\ 1 & -\sqrt{2}\Omega_0 \end{bmatrix}; \quad \bar{a}_3 = \begin{bmatrix} -\sqrt{2}\Omega_0^3 \\ -\Omega_0^2 \end{bmatrix}; \quad \bar{B} = \begin{bmatrix} -\Omega_0^2 I_x^{-1} \\ -\sqrt{2}\Omega_0 I_x^{-1} \end{bmatrix}.$$

Приходим к уравнениям наблюдателя второго порядка:

$$\begin{cases} \dot{\hat{x}}_1(t) = -\Omega_0^2 \hat{x}_1(t) - \sqrt{2}\Omega_0^3 \omega_x(t) - \Omega_0^2 I_x^{-1} u(t); \\ \dot{\hat{x}}_2(t) = \hat{x}_1(t) - \sqrt{2}\Omega_0 \hat{x}_2(t) - \Omega_0^2 \omega_x(t) - \sqrt{2}\Omega_0 I_x^{-1} u(t). \end{cases} \quad (15)$$

Далее сформируем вектор $x(t) = \text{col}\{x(t), \omega_x(t)\}$. Для получения оценки состояния в исходном базисе (12), (13) найдем матрицу обратного перехода T_b — сначала от $\tilde{x}$ к $\tilde{x}$, затем — к $\hat{x}$:

$$T_b = T^{-1}P^{-1} = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 1 \\ 0 & I_x & I_x \sqrt{2}\Omega_0 \\ I_x & 0 & I_x \Omega_0^2 \end{bmatrix}.$$

Вектор $\hat{x}(t) = T_b \tilde{x}(t)$ содержит оценки $\hat{\omega}_x(t)$, $\hat{M}(t)$ и $\hat{v}(t)$. В явном виде оценка возмущений моделируется соотношениями:

$$\begin{cases} \hat{M}(t) = I_x \hat{x}_1(t) + I_x \sqrt{2}\Omega_0 \hat{x}_2(t); \\ \hat{v}(t) = I_x \omega_x(t) + I_x \Omega_0^2 \hat{x}_2(t). \end{cases} \quad (16)$$

Видно, что с помощью уравнений (15), (16) конструируется наблюдатель Луенбергера для рассматриваемой задачи.

Вычисления для рассматриваемого примера выполнены с помощью программы, составленной в кодах MATLAB с использованием инструментария Symbolic Toolbox.

Результаты моделирования системы (16) в среде MATLAB представлены на рис. 1 и 2, где M — возмущающий момент, изменяющийся во времени; $\hat{M}$ — момент, восстановленный с помощью динамического наблюдателя; v и $\hat{v}$ — соответственно исходное и восстановленное значения шумов измерений.

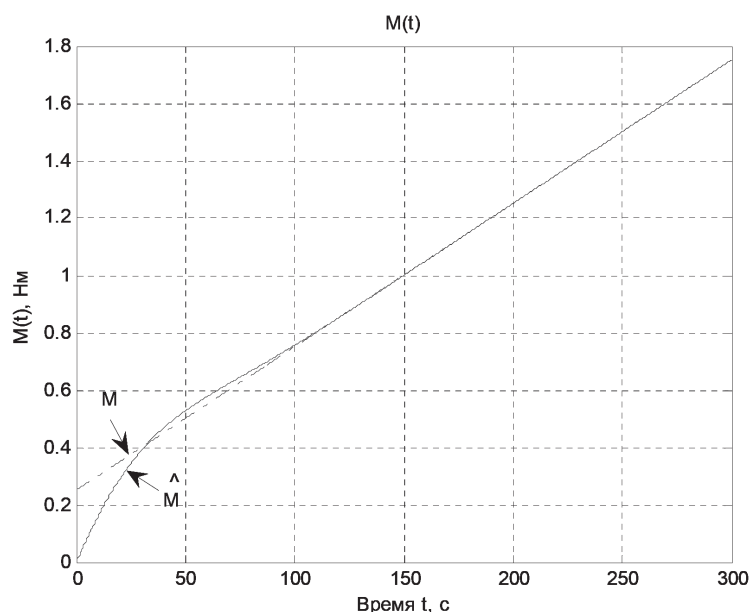


Рис. 1. Переходный процесс оценивания возмущений в обобщенной системе

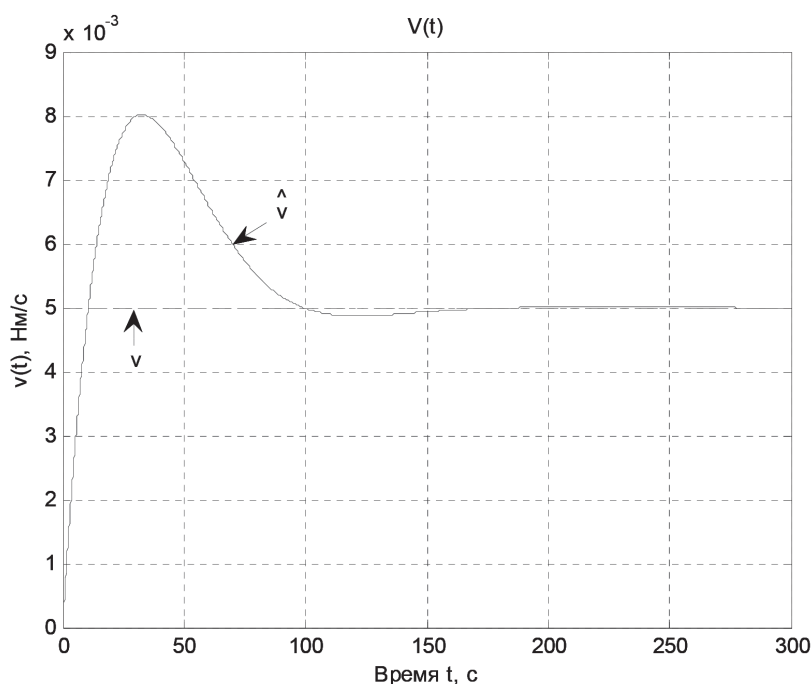


Рис. 2. Переходный процесс оценивания шумов измерений

Из графиков видно, что время переходного процесса в наблюдателе составляет не более 100 с. Параметры моделируемой системы: $I_x = 1000 \text{ кг} \cdot \text{м}^2$; $M(0) = 0,25 \text{ Н} \cdot \text{м}$; $v(0) = 5 \cdot 10^{-3} \text{ Н} \cdot \text{м/с}$; $\Omega_0 = 0,05 \text{ 1/с}$.

Выводы

В работе приводятся результаты исследований авторов, связанные с построением алгоритма наблюдателя пониженной размерности с использованием модели расширенной системы «объект – среда», что позволяет получить оценки векторов возмущений и шумов измерений по доступным измерениям вектору выхода — угловой скорости крена. Корректность предлагаемых технических решений подтверждается путем расчета оптимальных траекторий динамических объектов.

Для линейной модели наблюдателя устойчивость гарантируется обоснованным выбором характеристического многочлена наблюдателя — многочлена Баттерворта второго порядка, корни которого мало отличаются от корней характеристического уравнения замкнутой системы управления судном. Выбор обобщенной модели наблюдателя путем введения векторов $\bar{x}_1(t)$, $\bar{x}_2(t)$, $\bar{x}_3(t)$ позволяет предложить способ мониторинга датчиков угловой скорости и угла дрейфа, являющихся переменными состояния объекта. Наблюдатели фактически являются математическими датчиками информации и могут использоваться как для восстановления недоступных измерению переменных состояния, так и переменных, измерение которых в реальных условиях затруднено.

Предложенный алгоритм численной оценки вектора состояний средствами математического программирования может эффективно применяться на судах для управления технологическими процессами, плохо формализуемыми в математической форме.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Сазонов А. Е. Модальный метод синтеза наблюдателя для системы управления курсом судна / А. Е. Сазонов, В. В. Сахаров, А. А. Чертков // Вестник Государственного университета морского и речного флота имени адмирала С. О. Макарова. — 2016. — № 4 (38). — С. 211–223. DOI: 10.21821/2309-5180-2016-8-4-211-223.

2. Сахаров В. В. Синтез оптимального оценщика для системы управления судовым динамическим объектом / В. В. Сахаров, О. В. Шергина, А. А. Чертков // Вестник Государственного университета морского и речного флота имени адмирала С. О. Макарова. — 2013. — № 1 (20). — С. 26–31.
3. Ramdani N. Computing reachable sets for uncertain nonlinear monotone systems. / N. Ramdani, N. Meslem, Y. Candau // Nonlinear Analysis: Hybrid Systems. — 2010. — Vol. 4. — Is. 2. — Pp. 263–278. DOI: 10.1016/j.nahs.2009.10.002.
4. Luenberger D. G. Introduction to Dynamic Systems, Theory, Models, and Applications / D. G. Luenberger. — New York: John Wiley & Sons, 1979. — 446 p. DOI: 10.1002/bs.3830260412.
5. Андриевский Б. Р. Избранные главы теории автоматического управления с примерами на языке MatLab / Б. Р. Андриевский, А. Л. Фрадков. — СПб.: Наука, 2000. — 475 с.
6. Yang J. A complete solution to a simple case of dynamic observer error linearization: New approach to observer error linearization / J. Yang, J. Back, J. H. Seo // IEICE transactions on fundamentals of electronics, communications and computer sciences. — 2011. — Vol. 94. — No. 1. — Pp. 424–429.
7. Митряшкин Ю. В. Линейные модели управляемых динамических систем. Ч. 1. Уравнения «вход – выход» и «вход – состояние – выход»: учеб. пособие / Ю. В. Митряшкин. — М.: Изд-во МГТУ им. Н. Э. Баумана, 2008. — 222 с.
8. Hui S. Observer design for systems with unknown inputs / S. Hui, S. H. Zak // International Journal of Applied Mathematics and Computer Science. — 2005. — Vol. 15. — Is. 4. — Pp. 431–446.
9. Chen X. State observer for a class of nonlinear systems and its application to machine vision / X. Chen and H. Kano // IEEE Transactions on Automatic Control. — 2004. — Vol. 49. — Is. 11. — Pp. 2085–2091. DOI: 10.1109/TAC.2004.837529.
10. Boutat D. On the transformation of nonlinear dynamical systems into the Extended Nonlinear Observable Canonical Form / D. Boutat, K. Busawon // International Journal of Control. — 2011. — Vol. 84. — Is. 1. — Pp. 94–106. DOI: 10.1080/00207179.2010.541285.
11. Zheng G. A single output dependent observability normal form / G. Zheng, D. Boutat, and J. P. Barbot // SIAM Journal on Control and Optimization. — 2007. — Vol. 46. — Is. 6. — Pp. 2242–2255. DOI: 10.1137/050627137.
12. Tomera M. Nonlinear controller design of a ship autopilot / M. Tomera // International Journal of Applied Mathematics and Computer Science. — 2010. — Vol. 20. — Is. 2. — Pp. 271–280. DOI: 10.2478/v10006-010-0020-8.
13. Wang Y. Observer design using a generalized time-scaled block triangular observer form / Y. Wang, A. F. Lynch // Systems & Control Letters. — 2009. — Vol. 58. — Is. 5. — Pp. 346–352. DOI: 10.1016/j.sysconle.2008.12.005.
14. McGookin E. W. Ship steering control system optimisation using genetic algorithms / E. W. McGookin, D. J. Murray-Smith, Y. Li, T. I. Fossen // Control Engineering Practice. — 2000. — Vol. 8. — Is. 4. — Pp. 429–443. DOI: 10.1016/S0967-0661(99)00159-8.

REFERENCES

1. Sazonov, Anatoliy Efimovich, Vladimir Vasilevich Saharov, and Alexandr Alexandrovich Chertkov. “A modal method for the synthesis of an observer for heading control.” *Vestnik Gosudarstvennogo universiteta morskogo i rechnogo flota imeni admirala S. O. Makarova* 4(38) (2016): 211–223. DOI: 10.21821/2309-5180-2016-8-4-211-223.
2. Saharov, V. V., O. V. Shergina, and A. A. Chertkov. “Optimal estimator synthesis for ship dynamic object control.” *Vestnik gosudarstvennogo universiteta morskogo i rechnogo flota imeni admirala S. O. Makarova* 1(20) (2013): 26–31.
3. Ramdani, Nacim, Nacim Meslem, and Yves Candau. “Computing reachable sets for uncertain nonlinear monotone systems.” *Nonlinear Analysis: Hybrid Systems* 4.2 (2010): 263–278. DOI: 10.1016/j.nahs.2009.10.002.
4. Luenberger D. G. *Introduction to Dynamic Systems, Theory, Models, and Applications*. New York: John Wiley & Sons, 1979. DOI: 10.1002/bs.3830260412.
5. Andrievskij, B. R., and A. L. Fradkov. *Izbrannye glavy teorii avtomaticheskogo upravleniya s primerami na jazyke MatLab*. SPb.: Nauka, 2000.
6. Yang, J., J. Back, and J. H. Seo. “A complete solution to a simple case of dynamic observer error linearization: New approach to observer error linearization.” *IEICE transactions on fundamentals of electronics, communications and computer sciences* 94.1 (2011): 424–429.

7. Mitrajshkin, Ju. V. *Linejnye modeli upravlyaemyh dinamicheskikh sistem. Chast 1. Uravneniya «vход — vyход» и «vход — sostojanie — vyход»: uchebnoe posobie*. M.: izd-vo MGTU im. N. Je. Baumana, 2008.
8. Hui, Stefen, and Stanisław H. Zak. "Observer design for systems with unknown inputs." *International Journal of Applied Mathematics and Computer Science* 15.4 (2005): 431–446.
9. Chen, Xinkai, and Hiroyuki Kano. "State observer for a class of nonlinear systems and its application to machine vision." *IEEE Transactions on Automatic Control* 49.11 (2004): 2085–2091. DOI: 10.1109/TAC.2004.837529.
10. Boutat, Driss, and Krishna Busawon. "On the transformation of nonlinear dynamical systems into the extended nonlinear observable canonical form." *International Journal of Control* 84.1 (2011): 94–106. DOI: 10.1080/00207179.2010.541285.
11. Zheng, Gang, Driss Boutat, and Jean-Pierre Barbot. "Single output-dependent observability normal form." *SIAM Journal on Control and Optimization* 46.6 (2007): 2242–2255. DOI:10.1137/050627137.
12. Tomera, M. "Nonlinear controller design of a ship autopilot." *International Journal of Applied Mathematics and Computer Science* 20.2 (2010): 271–280. DOI: 10.2478/v10006-010-0020-8.
13. Wang, Yebin, and Alan F. Lynch. "Observer design using a generalized time-scaled block triangular observer form." *Systems & Control Letters* 58.5 (2009): 346–352. DOI: 10.1016/j.sysconle.2008.12.005.
14. McGookin, Euan W., David J. Murray-Smith, Yun Li, and Thor I. Fossen. "Ship steering control system optimisation using genetic algorithms." *Control Engineering Practice* 8.4 (2000): 429–443. DOI: 10.1016/S0967-0661(99)00159-8.

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

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

Чертков Александр Александрович —
 кандидат технических наук, доцент
 ФГБОУ ВО «ГУМРФ имени
 адмирала С.О. Макарова»
 198035, Российская Федерация, Санкт-Петербург,
 ул. Двинская 5/7
 e-mail: chertkov51@mail.ru

Сабуров Сергей Валерьевич — аспирант
Научный руководитель:
 Сахаров Владимир Васильевич
 ФГБОУ ВО «ГУМРФ имени
 адмирала С. О. Макарова»
 198035, Российская Федерация, Санкт-Петербург,
 ул. Двинская 5/7
 e-mail: kaf_osnpr@gumrf.ru

INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

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

Chertkov, Alexandr A. —
 PhD, associate professor
 Admiral Makarov State University
 of Maritime and Inland Shipping
 5/7 Dvinskaya Str., St. Petersburg 198035,
 Russian Federation
 e-mail: chertkov51@mail.ru

Saburov, Sergei V. — Postgraduate
Supervisor:
 Saharov, Vladimir V.
 Admiral Makarov State University
 of Maritime and Inland Shipping
 5/7 Dvinskaya Str., St. Petersburg 198035,
 Russian Federation
 e-mail: kaf_osnpr@gumrf.ru

Статья поступила в редакцию 9 ноября 2016 г.
 Received: November 9, 2016.

Научное периодическое издание

Вестник Государственного университета морского и речного флота имени адмирала С. О. Макарова

Том 9. № 1

2017 год

Выпускающие редакторы
Н. А. Карамзина, Т. В. Середова
Дизайн и верстка *М. Н. Евсюткина*
Технический редактор *Е. И. Тюленева*

Подписано в печать с оригинал-макета 28.02.17. Формат 60×90/8
Гарнитура Times New Roman. Усл. печ. л. 27,75. Тираж 500 экз. Заказ № 120/17

Государственный университет морского и речного флота имени адмирала С. О. Макарова
198035, Санкт-Петербург, ул. Двинская, 5/7