

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. № 3

**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. — № 3. — 234 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

СОДЕРЖАНИЕ

ЭКСПЛУАТАЦИЯ ВОДНОГО ТРАНСПОРТА, СУДОВОЖДЕНИЕ ... 447

- Ершов А. А., Хухарев Д. А.* Планирование проведения экспериментальной проверки диаграммы (планшета) управления судном 447
- Кузнецов А. Л., Кириченко А. В., Попов Г. Б.* Метод генетических химер для решения задачи рационализации маршрутов морской транспортировки 456
- Китаев М. В., Дорожко В. М.* Разрушение уединенной волны подводным препятствием 468
- Епихин А. И.* Построение системы поддержки принятия решений для комплексного обеспечения безопасности танкеров-газовозов 481
- Теренчук А. В.* Методы прогноза и избегания резонанса с использованием круговых диаграмм 489
- Маликова Т. Е., Аносов Н. М., Стрелков А. Ю.* Совершенствование способа погрузки пакетированных грузов на палубу судна 499
- Григорьев Н. Н., Сигаев Д. Б.* Формы и эффективность международной морской организации (ИМО) при борьбе с усталостью моряков 506
- Прокофьев В. А.* Обоснование применения когнитивного подхода к управлению морским судоходством 516

ВОДНЫЕ ПУТИ СООБЩЕНИЯ И ГИДРОГРАФИЯ 524

- Гапеев А. М., Рябов Г. Г., Нычик Т. Ю.* Исследование вариантов верхней головы проектируемого шлюза Багаевского гидроузла 524
- Барашок П. И.* Причины возникновения артефактов в форме «волн» на цифровых моделях рельефа дна 537

СУДОСТРОЕНИЕ И СУДОРЕМОНТ 552

- Горбанева Е. А.* Экспериментальное и численное исследование энергоэффективного конструктивного исполнения танка наливного судна 552
- Кирсанов М. Н.* Анализ усилий и деформаций в корабельном шпангоуте, моделируемом фермой 560

СУДОВЫЕ ЭНЕРГЕТИЧЕСКИЕ УСТАНОВКИ, СИСТЕМЫ И УСТРОЙСТВА 570

- Ерофеев В. Л., Жуков В. А., Мельник О. В.* О возможностях использования вторичных энергетических ресурсов в судовых ДВС 570
- Живлюк Г. Е., Петров А. П.* Особенности развития экологически безопасных современных дизельных энергетических установок 581
- Яковлев П. В., Просвирина И. С.* Численное моделирование температурных полей в шатровом укрытии для сушки судовых корпусных деталей 597

Том 9. № 3

2017

РЕДАКЦИОННЫЙ СОВЕТ

Гл. редактор

С. О. Барышников,

д.т.н., проф.

rector@gumrf.ru

Зам. гл. редактора

А. П. Нырков,

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

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

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

Подписной индекс в каталоге Роспечать — 37276.

Все материалы, поступившие в редакцию, рецензируются.

**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.

Кулешов И. И., Ходаковский В. М. Экспериментальное обоснование
выбора размера конечного элемента при расчёте головок поршней 603
Матвеев В. Т., Очеретяный В. А., Дологлонян А. В. Характеристики
рабочих процессов воздухонезависимых одноконтурных
микрогазотурбинных установок для подводной техники 612

ЭЛЕКТРОТЕХНИЧЕСКИЕ КОМПЛЕКСЫ И СИСТЕМЫ..... 619

Каретников В. В., Пащенко И. В., Соколов А. И. Перспективы внедрения
безэкипажного судоходства на внутренних водных путях
Российской Федерации 619
Васильченко Д. С., Журавлев А. Е. Организация радиальных
и мультиплексных каналов в бортовых системах автоматического
управления 628
Самосейко В. Ф., Шарашкин С. В., Гельвер Ф. А. Идентификация
параметров реактивного электродвигателя с анизотропной магнитной
проводимостью ротора 637

**ИНФОРМАЦИОННЫЕ ТЕХНОЛОГИИ И АВТОМАТИЗАЦИЯ
НА ТРАНСПОРТЕ 645**

Голоскоков К. П., Чиркова М. Ю. Разработка модели выбора
технических средств судовых информационных систем 645
Дмитриенко Д. В. Параметрическая оптимизация элементов
конструкций портовых перегрузочных машин 655
Печников Д. А. Модели управления процессом
критериально-ориентированного тестирования при подготовке
специалистов на флоте 663

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

OPERATION OF WATER TRANSPORT, NAVIGATION 447

Ershov A. A., Huharev D. A. Planning of trials to check the diagrams
(tables) maneuvering of a vessel 447

Kuznetsov A. L., Kirichenko A. V., Popov G. B. Chimerical genetic
algorithm for sea route rationalization 456

Kitaev M. V., Dorozhko V. M. Destruction of a solitary wave on submerged
obstacle 468

Epikhin A. I. Creation of a decision support system for the integrated
security of tanker-gas carriers 481

Terenchuk A. V. Methods of forecasting and avoiding resonance
with the use of pie charts 489

Malikova T. E., Anosov N. M., Strelkov A. Yu. Advances in method
of loading packaged goods on vessel's deck 499

Grigoriev N. N., Sigaev D. B. Forms and effectiveness of IMO in seamen
fatigue mitigation 506

Prokofev V. A. The rationale for the use of the cognitive approach
to the maritime shipping management 516

WATERWAYS AND HYDROGRAPHY 524

Gapeev A. M., Ryabov G. G., Nychik T. Ju. Study of options for top head
of designed gateway of Bagaevsk waterworks 524

Barashok P. I. Causes of wave artefacts appearances on the seabed digital
terrain models 537

SHIPBUILDING AND SHIP REPAIR 552

Gorbaneva E. A. Experimental and numerical study of constructive
energy-efficient performance on the tank tanker 552

Kirsanov M. N. Analysis of forces and deformations in the ship frame
simulated by truss 560

SHIP POWER PLANTS, SYSTEMS AND DEVICES 570

Erofeyev V. L., Zhukov V. A., Melnik O. V. On the possibilities of using
secondary energy resources in marine engine 570

Zhivljuk G. E., Petrov A. P. Features of the development of
environmentally safe modern diesel power plants 581

Yakovlev P. V., Prosvirina I. S. Numerical simulation of temperature
fields in tent-shelter for drying ship hull parts 597

Kuleshov I. I., Khodakovskiy V. M. Experimental rationale for the election
size of the finite element in the calculation of the piston crowns 603

Matviienko V. T., Ocheretianyi V. A., Dologlonyan A. V. Characteristics
of operational processes of air independent single-circuit micro gas-turbine
installations for underwater technology 612

ELECTRICAL EQUIPMENT AND SYSTEMS 619

Karetnikov V. V., Pashchenko I. V., Sokolov A. I. Prospects of introducing
unmanned navigation on inland waterways of the Russian Federation 619

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

Vasilchenko D. S., Zhuravlev A. E. Organization of radial and multiplex channels in on-board automatic control systems 628
Samoseyko V. F., Sharashkin S. V., Gelfer F. A. Identification of the parameters of the reluctance motor with anisotropic magnetic conductivity of rotor 637

INFORMATION TECHNOLOGY AND AUTOMATION IN TRANSPORT 645

Goloskokov K. P., Chirkova M. Y. Development of a model of the choice of means shipboard information systems..... 645
Dmitrienko D. V. Parametric optimization of structural elements of port handling machines..... 655
Pechnikov D. A. Model management of the process criteria-oriented testing at training of specialists in the navy 663

ЭКСПЛУАТАЦИЯ ВОДНОГО ТРАНСПОРТА, СУДОВОЖДЕНИЕ

DOI: 10.21821/2309-5180-2017-9-3-447-455

PLANNING OF TRIALS TO CHECK THE DIAGRAMS (TABLES) MANEUVERING OF A VESSEL

A. A. Ershov, D. A. Huharev

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

This article aims at improving the safety of vessel traffic in the implementation of the mooring by experimental verification of the proposed diagram (table) ship management.

The development and operation of ports is impossible without ensuring the safety of navigation. Most Russian ports are located in the narrows and the court in front of the passage to the berths of the port must pass through the limited width and depth of channels and fairways, to turn, to take their position at the pier. Then the ship has to make a rapprochement with the pier on a pre-selected direction. In the process of performing each of the operations the vessel must ensure maximum safety conditions taking into account the possible presence of wind and currents, and to prevent collision of vessels, stranding and piles for berthing facilities.

Analysis of recent emergencies which occurred with the ships in the Russian and foreign ports, shows that many of them were the result of raids on vessels near berths. Usually to ensure the safety of vessel traffic in the conditions of narrowness of the issues should the decision of the hydrographic, navigational tasks, and the development of calculation methods for handling and steering the vessel, and methods of mathematical modeling of ship traffic in the narrows. In earlier works, the authors proposed to calculate diagram (table) control of a vessel at the mooring. This article suggests methods for planning the experiment to validate a previously calculated diagrams ship management.

The article proposes the methodology of the experiment for experimental verification of the pre-calculated diagrams ship management. Also concludes that the holding of such experiments to facilitate mooring of vessels may be useful without preliminary calculations of the diagrams (tables) ship management.

The experience of the test diagrams ship management for specific vessel shows that this technique can be used on all ships to clarify the maneuvering capabilities of vessels to complex mooring operations.

Using the proposed in the article experimental methods for different ships will allow all types of vessels to improve safety of implementation of mooring operations in ports.

Keywords: experimental verification, the safety conditions of mooring operations, the increase in port safety.

For citation:

Ershov, Andrey A., and Dmitry A. Huharev. "Planning of trials to check the diagrams (tables) maneuvering of a vessel." *Vestnik Gosudarstvennogo universiteta morskogo i rechnogo flota imeni admirala S. O. Makarova* 9.3 (2017): 447–455. DOI: 10.21821/2309-5180-2017-9-3-447-455.

УДК 656.61.052.7

ПЛАНИРОВАНИЕ ПРОВЕДЕНИЯ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЙ ПРОВЕРКИ ДИАГРАММЫ (ПЛАНШЕТА) УПРАВЛЕНИЯ СУДНОМ

А. А. Ершов, Д. А. Хухарев

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

Статья направлена на повышение безопасности движения судов при осуществлении швартовных операций путем экспериментальной проверки, предложенной авторами диаграммы (планшета) управления судном.

Развитие и эксплуатация портов невозможны без обеспечения безопасности судоходства. Большинство российских портов расположено в узкостях, и суда перед проходом к причалам порта должны пройти по ограниченным по ширине и глубине каналам и фарватерам, развернуться и занять свое положение у причала. Затем судно должно совершить сближение с причалом по заранее выбранному направлению. В процессе выполнения каждой операции судно должно обеспечивать максимальные условия безопасности с учетом возможного наличия ветра и течения, а также предупреждать столкновения судов, посадки на мель и навалы на причальные сооружения.

Анализ последних аварийных ситуаций, произошедших с судами в российских и иностранных портах, показывает, что многие из них явились результатом навалов на суда, стоящие возле причалов. Обычно для обеспечения безопасности движения судов в условиях узкости необходимо решение гидрографических и навигационных задач, а также развитие расчетных методов управляемости и маневрирования судном и методов математического моделирования движения судов в узкостях. Ранее в публикациях авторов предлагалось рассчитывать диаграммы (планшеты) управления судном при швартовках. В данной статье предлагаются методы планирования проведения эксперимента для проверки ранее рассчитанной диаграммы управления судном.

В статье предлагается методика проведения эксперимента для экспериментальной проверки заранее рассчитанной диаграммы (планшета) управления судном. Также делается вывод о том, что проведение подобных экспериментов для облегчения швартовочных операций судов может быть полезным и без предварительных расчетов диаграмм (планшетов) управления судном. Опыт проведения экспериментальной проверки диаграммы (планшета) управления конкретным судном показывает, что данная методика может быть использована на всех судах для уточнения их маневренных возможностей перед проведением сложных швартовочных операций. Использование предложенных в статье экспериментальных методов позволит судам всех типов повысить безопасность выполнения швартовочных операций во всех портах.

Ключевые слова: экспериментальная проверка, условия безопасности швартовки, повышение безопасности в портах.

Для цитирования:

Ершов А. А. Планирование проведения экспериментальной проверки диаграммы (планшета) управления судном / А. А. Ершов, Д. А. Хухарев // Вестник Государственного университета морского и речного флота имени адмирала С. О. Макарова. — 2017. — Т. 9. — № 3. — С. 447–455. DOI: 10.21821/2309-5180-2017-9-3-447-455.

Введение (Introduction)

Анализ последних аварийных ситуаций, произошедших с судами в российских и иностранных портах, показывает, что многие из них явились результатом навалов на суда, стоящие возле причалов. При этом заходящее судно двигалось по ограниченным по глубине и ширине каналам и фарватерам порта в условиях ветра. Таким образом, в случае аварии при проходе по каналам и фарватерам порта заходящее судно не смогло «уложиться» в отведенную для него безопасную ширину канала или фарватера. В работах [1] – [3] авторами предлагалось для этих целей рассчитывать специальные диаграммы (планшеты) управления судном при швартовках. Подобные задачи были проанализированы в работах [4] – [7] и др. Комплексные задачи обеспечения безопасности движения судов в узкостях и при подходах к портам решались в работах [8] – [10]. В иностранных работах данные проблемы рассматривались в работах [11] – [12]. В настоящей статье предлагается процедура проведения натурного эксперимента для проверки и уточнения заранее рассчитанной диаграммы (планшета) управления судном.

Методы и материалы (Methods and Materials)

Рассчитанная в соответствии с зависимостями и методиками, предложенными в работах [1] – [3], диаграмма (планшет) управления судном может быть проконтролирована и уточнена путем проведения натурных испытаний судна. При этом предлагается следующий порядок проведения натурных испытаний судна для уточнения заранее рассчитанной диаграммы управления судном при швартовках.

1. В штилевую погоду или при ограниченном ветре и волнении судно выходит в район проведения испытаний в удалении от основных водных путей. При наличии в районе проведения

испытаний течения в качестве основного ориентира для определения места судна используется шлюпка или свободно плавающая вешка, радиолокационное изображение которой хорошо видно экране радиолокатора.

2. По заранее рассчитанной для данного судна диаграмме управления выбирается направление движения судна, которое должно быть проконтролировано при испытаниях. В качестве этого направления наиболее выгодно проверять те направления, которые соответствуют основным схемам швартовки данного судна, например, направления движения с углом дрейфа 30° , 45° , 60° , 90° (по заранее рассчитанной диаграмме управления судном).

3. По заранее рассчитанной диаграмме управления судном определяется положение органов управления судном, соответствующих данному направлению движения судна (рис. 1).

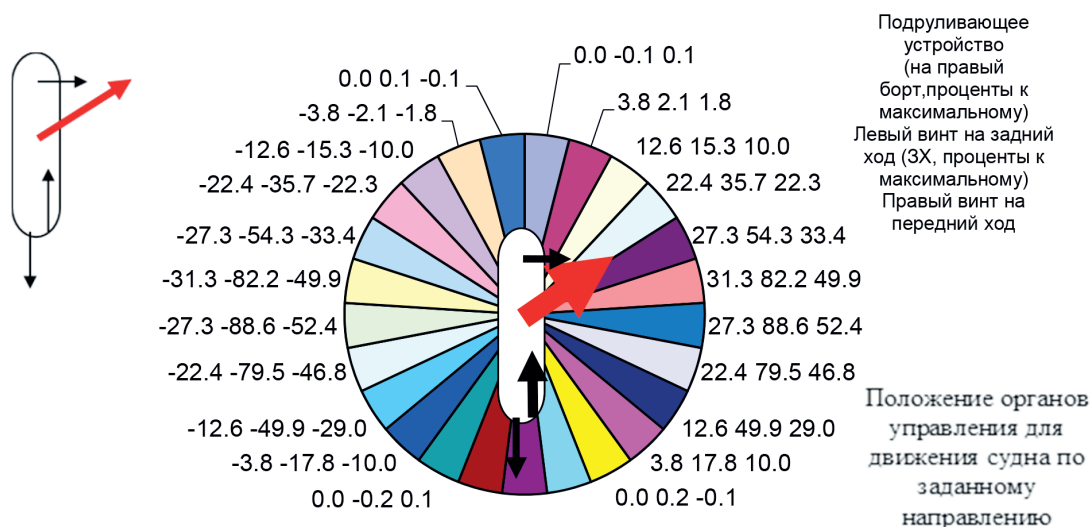


Рис. 1. Круговая диаграмма управления судном при швартовке, скорость движения 0,2 м/с

4. Органы управления судном приводятся в заранее рассчитанное положение, начинается движение судна.

5. В процессе движения с заданной дискретностью производится измерение пеленга и дистанции до свободно плавающего ориентира (рис. 2). Методика определения необходимой дискретности измерений пеленга и дистанции на свободно плавающий ориентир приведена в пп. 6 – 8. Одновременно производится измерение курса судна. Если курс судна начинает изменяться, то корректируется положение органов управления по методике, изложенной в [1] – [3]. Используя плавную корректировку положения органов управления, добиваются постоянства курса при движении судна.

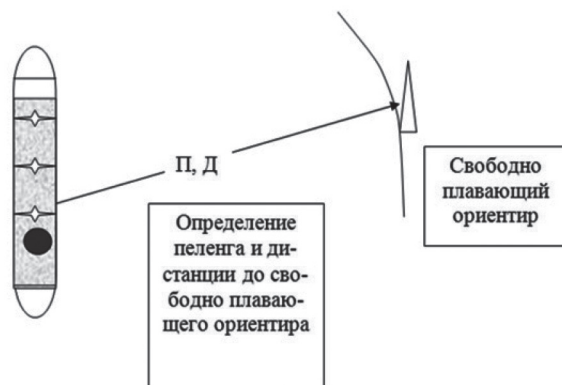


Рис. 2. Определение пеленга судна до свободно плавающего ориентира при проведении испытаний по контролю и уточнению диаграммы управления судном

6. С помощью соединения на карте полученных по пеленгу и дистанции обсерваций от ориентировочного положения свободно плавающего ориентира (например, шлюпки) определяется путевой угол ПУ (угол скорости судна) при движении с данным положением органов управления.

7. Угол дрейфа судна рассчитывается по выражению

$$\beta = \text{ПУ} - \text{ИК}, \quad (1)$$

где β — угол дрейфа судна, град; ПУ — путевой угол судна, град; ИК — истинный курс судна, град.

8. На диаграмме управления судном наносится откорректированное по результатам испытаний положение органов управления судна при соответствующем ему угле дрейфа, определенном во время испытаний (рис. 3).

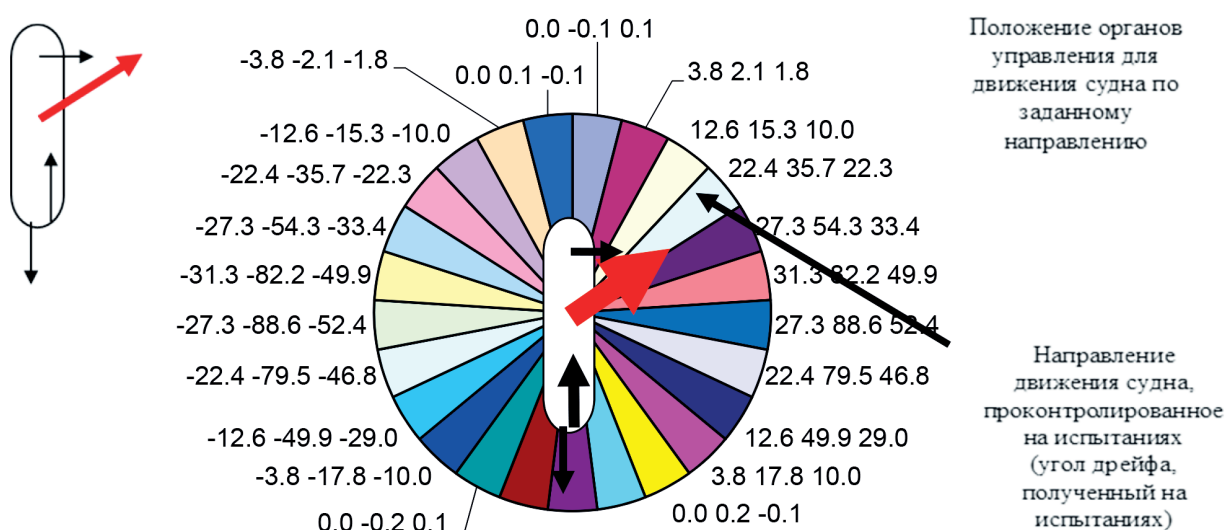


Рис. 3. Уточнение диаграммы управления судном по данным натурных испытаний

При проведении маневренных испытаний для уточнения рассчитанной диаграммы управления судном наиболее важное значение имеет определение направления угла дрейфа β , по которому будет двигаться судно при заданном положении органов управления. В общем случае определение направления движения судна при данном положении органов управления зависит от точности определения места судна и дискретности снятия обсерваций. На рис. 4 представлена основная причина появления ошибок в определении направления движения судна при данном положении органов управления, данной точности определения места судна (ОМС) и данной дискретности обсерваций. При определенном способе получения обсерваций точность ОМС характеризуется радиальной ошибкой. При этом в самом худшем случае судно может оказаться в крайних положениях окружности, определяющей эту радиальную ошибку ОМС.

Как видно из рис. 4, если судно находится в крайних положениях окружности, определяющих радиальную ошибку ОМС, то возникает погрешность в определении направления, по которому движется судно при данном положении органов управления судном (ошибка в определении угла дрейфа при движении судна).

Расстояния, проходимые судном за определенное время между обсервациями, одинаково независимы от того, в каком положении окажется судно при данной точности определения места. Поэтому более точно источник появления погрешностей может быть охарактеризован дугой окружности, длина которой приближенно равна удвоенному значению радиальной ошибки ОМС — $2 \cdot M$.

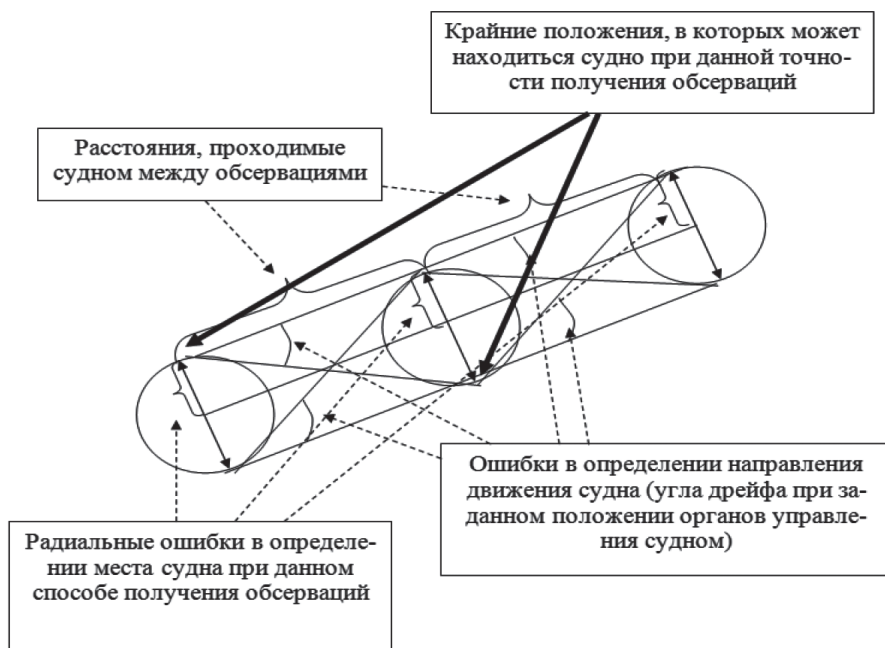


Рис. 4. Определение ошибки обсерваций при проведении натурного эксперимента

Как следует из рис. 5, дуга окружности

$$CC1 \approx 2M. \quad (2)$$

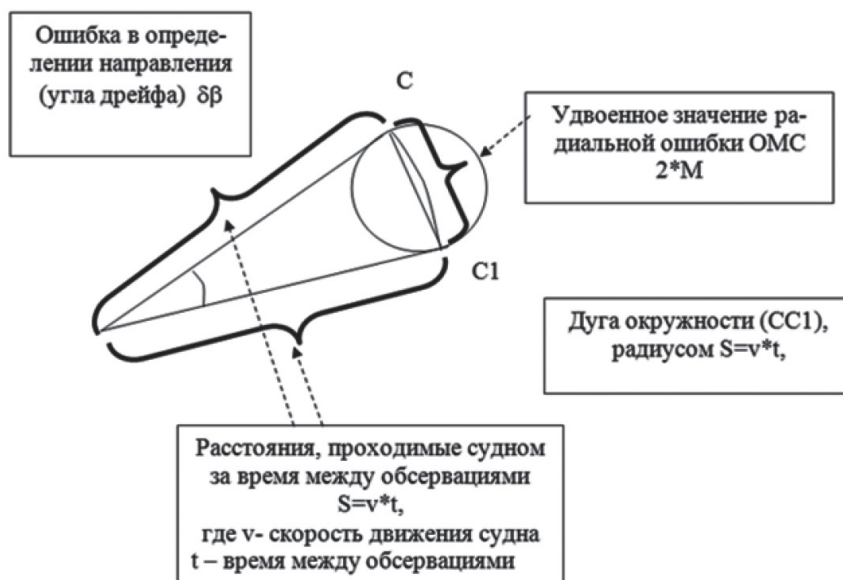


Рис. 5. Схема расчета ошибки ОМС при проведении натурного эксперимента

С учетом того, что

$$CC1 = S\delta_{\beta} = vt\delta_{\beta}, \quad (3)$$

получаем

$$t = \frac{2M}{v\delta_{\beta}}, \quad (4)$$

где t — время между наблюдениями, с; δ_β — ошибка в определении направления (угла дрейфа), рад.

Таким образом, при равной точности определения места судна для получения ошибки в определении места судна, не превышающей данную величину M , с уменьшением скорости движения судна необходимо увеличивать время между наблюдениями (увеличивать дискретность наблюдений).

Результаты (Results)

Для подтверждения достоверности основных положений диссертации: предложенных методик расчета диаграммы (планшета) управления судном и их практического применения на действующих судах, авторами выполнялись расчеты и натурные испытания на газовозе LNG «Pioneer».

Основные характеристики газовоза LNG «Pioneer»:

длина максимальная — 277 м;

длина между перпендикулярами — 266 м;

ширина на миделе — 43,4 м;

осадка судна при полной загрузке — 11,4 м.

Газовоз LNG «Pioneer» оборудован одним винтом и носовым подруливающим устройством. Результаты расчета диаграммы (планшета) управления судном по материалам [1] – [3] для LNG «Pioneer» представлены на рис. 6.

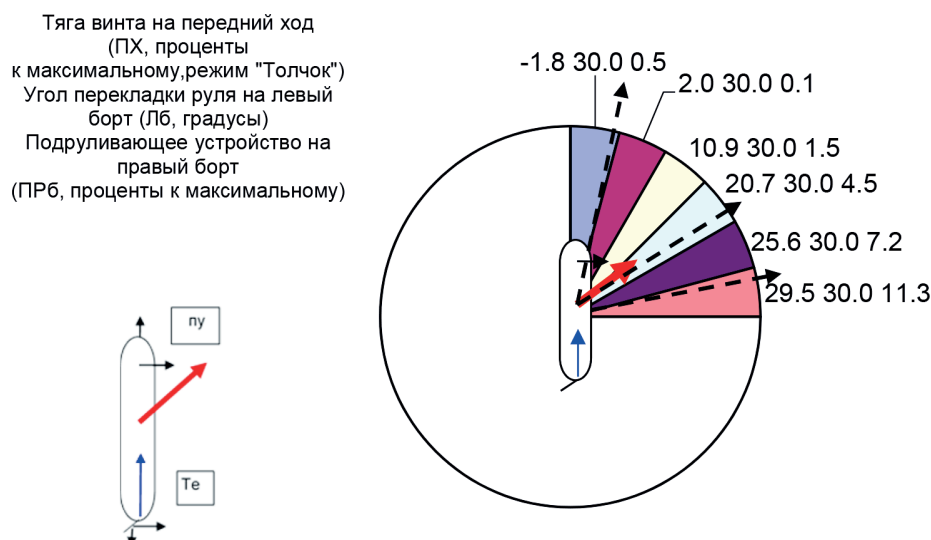


Рис. 6. Уточненная диаграмма управления LNG «Pioneer» при скорости движения судна 0,2 м/с

В соответствии с материалами настоящей статьи, в 2016 г. во время рейса Южная Корея – Арабские Эмираты проводились натурные испытания по уточнению диаграммы (планшета) управления судна, полученной расчетным путем. Испытания проводились для судна, находившегося на рейде в штилевую погоду, в соответствии с требованиями методик, представленных в данной статье. В качестве свободно плавающего ориентира использовалась рабочая шлюпка. По результатам проведения натурных испытаний была получена уточненная диаграмма (планшет) управления судном, которая представлена на рис. 6. На этой диаграмме нанесены реальные направления движения LNG «Pioneer» при расчетном положении органов управления (в виде черных пунктирных стрелок). Полученные результаты подтверждают достоверность расчётных данных по определению параметров диаграммы управления судном, представленных в bibliографических источниках [1] – [3], а также дают возможность уточнять параметры движения судна путем проведения натурных испытаний для диаграмм (планшетов) управления судном, полученных расчетным путем.

Обсуждение (Discussion)

Полученные в настоящей статье выводы совпадают с данными других авторов о важности избежания столкновений и навалов судов при выполнении швартовных операций и необходимости использования в данном направлении различных подходов, включая математическое моделирование и проведение различных экспериментов на судне. Произошедшие в последнее время навалы судов на причалы, включая навал танкера при швартовке в порту Приморск, приведший к выводу из строя причального комплекса и многочисленным убыткам, подтверждает важность вопросов обеспечения безопасности швартовных операций в настоящее время. Предложенные в настоящей статье подходы к планированию и проведению натурных экспериментов на судне могут использоваться непосредственно перед проведением реальных швартовных операций. В этом случае более точно учитывается состояние загрузки судна и ветроволновых условий предстоящих швартовных операций.

Выводы

1. Проведение натурных экспериментов по уточнению заранее рассчитанных диаграмм (планшетов) управления судном при швартовках по методикам, предложенным в настоящей статье, позволяет уточнить положение органов управления судном и повысить безопасность судна при проведении безопасных швартовных операций.
2. Описанные в настоящей статье натурные эксперименты могут проводиться в случае, если позволяет акватория, непосредственно перед проведением реальных швартовных операций. При этом более точно учитываются состояние загрузки судна и ветроволновые условия предстоящей швартовки.
3. Проведение натурных экспериментов может проводиться судами и без предварительного расчета диаграммы (планшета) управления судном с целью накопления данных о возможности маневрирования судном при проведении швартовных операций.
4. Как показывает опыт практического использования результатов настоящей работы, проведение натурных экспериментов даже в ограниченном виде перед проведением швартовных операций для уточнения положения органов управления судном является перспективным подходом к обеспечению безопасности швартовных операций.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Ершов А. А.* Совершенствование управления судном при швартовках / А. А. Ершов, Д. А. Хухарев // Научно-технический вестник Поволжья. — 2015. — № 3. — С. 132–134.
2. *Ершов А. А.* Обеспечение безопасности и эффективности швартовных операций / А. А. Ершов, Д. А. Хухарев // Научно-технический вестник Поволжья. — 2015. — № 4. — С. 65–67.
3. *Ершов А. А.* Перспективы автоматизации управления судном при швартовках / А. А. Ершов, Д. А. Хухарев // XIII Международная науч.-практ. конф. «Научные перспективы XXI века. Достижения и перспективы нового столетия». Ежемес. науч. журн. — Новосибирск, 2015. — № 6 (13). — С. 144–145.
3. *Логиновский В. А.* Моделирование оценки вероятности посадки судна на грунт с помощью нечетких чисел / В. А. Логиновский, А. А. Струков // Вестник Государственного университета морского и речного флота имени адмирала С. О. Макарова. — 2013. — № 1 (20). — С. 89–96.
4. *Zubova A. A.* Methodology for the Ship to Ship Hydrodynamic interaction Investigation Applying the CFD Methods / A. A. Zubova, D. V. Nikushchenko // Proceedings of the 11th International Conference on Hydrodynamics (ICHHD 2014). — Singapore, 2014. — Pp. 328–340.
5. *Zubova A. A.* Hydrodynamic interaction phenomena investigations during the ship overtaking maneuver for marine related simulators with the use of CFD methods / A. A. Zubova, D. V. Nikushchenko // Proceedings of International Conference on Marine Simulation and Ship Manoeuvrability 2015 (MARSIM 2015). — Curran Associates, Inc., 2016. — Pp. 672–684.
6. *Бурмака А. И.* Стратегия расхождения судов в ситуации чрезмерного сближения / А. И. Бурмака // Вестник Государственного университета морского и речного флота имени адмирала С. О. Макарова. — 2014. — № 1 (23). — С. 20–22.

7. Некрасов С. Н. Навигационные риски буксировки судна в стесненных навигационных условиях / С. Н. Некрасов, К. И. Ефимов, Д. В. Трененков // Вестник Государственного университета морского и речного флота имени адмирала С. О. Макарова. — 2014. — № 6 (28). — С. 13–19.
8. Ершов А. А. Использование зон безопасного расхождения для движения судов на подходах к портам и внутренних водных путях / А. А. Ершов // Сборник научных трудов профессорско-преподавательского состава ГУМРФ имени адмирала С. О. Макарова. — СПб.: Изд-во ГУМРФ им. адм. С. О. Макарова, 2014. — С. 6–13.
9. Паринов П. П. Новые способы обеспечения безопасного движения судов в Большом порту Санкт-Петербург и на подходах к порту: дис. ... канд. техн. наук: 05.22.19. — Защищена 21.12.2010; утв. 12.06.2011 / Петр Петрович Паринов. — СПб., 2010. — 120 с.
10. 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.
11. Hasegawa K. On harbor maneuvering and neural control system for berthing with tug operation / K. Hasegawa, T. Fukutomi // Proc. 3rd International Conference on Manoeuvring and Control of Marine Craft. — 1994. — Pp. 197–210.
12. Kijima K. A Ship Manoeuvring Motion in the Proximity of Pier / K. Kijima, Y. Furukawa // Manoeuvring and Control of Marine Craft (MCMC'94). 3rd International Conference. — Southampton, UK, 1994. — Pp. 211–222.

REFERENCES

1. Ershov, A. A., and D. A. Huharev. "Improvement of mooring of the ships." *Scientific and Technical Volga region Bulletin* 3 (2015): 132–134.
2. Ershov, A. A., and D. A. Huharev. "Ensuring safe and efficient mooring operations." *Scientific and Technical Volga region Bulletin* 4 (2015): 65–67.
3. Loginovskij, V. A., and A. A. Strukov. "Modeling of the probability assessment of grounding the vessel by fuzzy numbers." *Vestnik Gosudarstvennogo universiteta morskogo i rechnogo flota imeni admirala S. O. Makarova* 1(20) (2013): 89–96.
4. Zubova, A. A., and D. V. Nikushchenko. "Methodology for the Ship to Ship Hydrodynamic interaction Investigation Applying the CFD Methods." *Proceedings of the 11th International Conference on Hydrodynamics (ICHD 2014)*. Singapore, 2014: 328–340.
5. Zubova, A. A., and D. V. Nikushchenko. "Hydrodynamic interaction phenomena investigations during the ship overtaking maneuver for marine related simulators with the use of CFD methods." *Proceedings of International Conference on Marine Simulation and Ship Manoeuvrability 2015 (MARSIM 2015)*. Curran Associates, Inc., 2016: 672–684.
6. Burmaka, A. I. "The strategy of maneuvering of ships in a situation of excessive proximity." *Vestnik Gosudarstvennogo universiteta morskogo i rechnogo flota imeni admirala S. O. Makarova* 1(23) (2014): 20–22.
7. Nekrasov, S. N., Efimov K. I., and D. V. Trenchenkov. "Navigation risks towing in cramped navigational conditions." *Vestnik Gosudarstvennogo universiteta morskogo i rechnogo flota imeni admirala S. O. Makarova* 6(28) (2014): 13–19.
8. Ershov, A. A. "Usage zones of safe passage in approaches to ports and inland waterways." *Sb. nauch. tr. prof.-prep. sost. GUMRF im. adm. S. O. Makarova*. SPb.: Izd-vo GUMRF imeni admirala S. O. Makarova, 2014: 6 – 13.
9. Parinov, P. P. Novye sposoby obespecheniya bezopasnogo dvizheniya sudov v Bol'shom portu Sankt-Peterburg i na podkhodakh k portu. PhD diss. SPb., 2010.
10. Ershov, A. A. Razrabotka sistemy intellektualnoj podderzhki sudovoditelja dlja snizhenija opasnosti stolknovenij sudov. Dr. diss. SPb., 2012.
11. Hasegawa, Kazuhiko, and T. Fukutomi. "On harbor maneuvering and neural control system for berthing with tug operation." *Proc. 3rd International Conference on Manoeuvring and Control of Marine Craft*. 1994: 197 – 210.
12. Kijima, K., and Y. Furukawa. "A Ship Manoeuvring Motion in the Proximity of Pier." *Manoeuvring and Control of Marine Craft (MCMC'94)*. 3rd International Conference. Southampton, UK, 1994: 211–222.

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

Ершов Андрей Александрович —

доктор технических наук, доцент

ФГБОУ ВО «ГУМРФ имени адмирала

С. О. Макарова»

198035, Российская Федерация, г. Санкт-Петербург,

ул. Двинская, 5/7

e-mail: ershov_63@mail.ru

Хухарев Дмитрий Андреевич — аспирант

Научный руководитель:

Ершов Андрей Александрович

ФГБОУ ВО «ГУМРФ имени адмирала

С. О. Макарова»

198035, Российская Федерация, г. Санкт-Петербург,

ул. Двинская, 5/7

e-mail: ershov_63@mail.ru

INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Ershov, Andrey A. —

Dr. of Technical Sciences, associate professor

Admiral Makarov State University of Maritime

and Inland Shipping

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

Russian Federation

e-mail: ershov_63@mail.ru

Huharev, Dmitry A. — 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: ershov_63@mail.ru

Статья поступила в редакцию 15 мая 2017 г.

Received: May 15, 2017.

CHIMERICAL GENETIC ALGORITHM FOR SEA ROUTE RATIONALIZATION**A. L. Kuznetsov, A. V. Kirichenko, G. B. Popov**Admiral Makarov State University of Maritime and Inland Shipping,
St. Petersburg, Russian Federation

Solution for the route optimization problem is one of the basic problems of any transportation organization. Multi-criteria optimization is methodically impossible, but single criterion optimization may be a serious trouble, as the specified problem become transcomputational with initial data growth. At the same time, route optimization has important practical meaning, especially for such developing regions as Arctic region. Unlike developed regions, where most rational routes are already settled naturally (as a result of trials and errors), Arctic region has no such settled solution, which makes the optimal solution problem relevant. Geometric route length is selected as optimization criterion for problem description. Although this criterion may be drastically enhanced in practical implementation. Thus, the problem narrows down to the well-known travelling salesman problem (TSP). Evolutionary programming, based on genetic algorithms, appears to be a possible solution. It is indicated that genetic algorithms require modifications for adequate implementation for the problem. The authors suggest a modification, based on chimerical genetic method. The paper describes basics of the modified method, MS Excel prototype and a model, developed in a specialized modelling environment of AnyLogic 6. Prototype adequacy is proved by comparison with results of the brute force method for a small number of base points, which allows to make precise calculations. The model adequacy, in its turn, is proved by comparison with the tested prototype results. Specially planned testing experiments confirm both prototype and model adequacy. In conclusion, different port disposition examples are discussed.

Keywords: route rationalization, travelling salesman problem, genetic algorithms, adequacy proof.

For citation:

Kuznetsov, Aleksandr L., Aleksandr V. Kirichenko, and German B. Popov. "Chimerical genetic algorithm for sea route rationalization." *Vestnik Gosudarstvennogo universiteta morskogo i rechnogo flota imeni admirala S.O. Makarova* 9.3 (2017): 456–467. DOI: 10.21821/2309-5180-2017-9-3-456-467.

УДК 656.6**МЕТОД ГЕНЕТИЧЕСКИХ ХИМЕР ДЛЯ РЕШЕНИЯ
ЗАДАЧИ РАЦИОНАЛИЗАЦИИ МАРШРУТОВ МОРСКОЙ ТРАНСПОРТИРОВКИ****А. Л. Кузнецов, А. В. Кириченко, Г. Б. Попов**ФГБОУ ВО «ГУМРФ имени адмирала С. О. Макарова», Санкт-Петербург,
Российская Федерация

Решение задачи оптимизации маршрутов является одной из основных проблем организации любой перевозки. Многокритериальная оптимизация невозможна методически, но и однокритериальная оптимизация может явиться серьезной проблемой, поскольку поставленная задача с увеличением объема исходных данных становится трансвычислительной. В то же время оптимизация маршрутов имеет важное практическое значение особенно для таких развивающихся регионов, как Арктика. В отличие от развитых регионов, где наиболее рациональные маршруты давно установились естественным путем (в результате проб и ошибок), в Арктическом регионе не существует устоявшегося решения, что делает задачу поиска оптимального решения крайне актуальной. Выбранным критерием оптимальности для изложения проблемы служит геометрическая длина маршрута, хотя в реальном применении понятие «расстояние» может быть существенно дополнено. Таким образом, задача сводится к известной задаче коммивояжера. В статье обсуждаются существующие методы поиска решения этой задачи. Возможным вариантом решения предлагаются методы эволюционного программирования, основывающегося на генетических алгоритмах. Показано, что генетические алгоритмы требуют модификации для корректного использования в решении поставленной задачи. Авторы статьи предлагают модификацию, основанную на методе генетических химер. В статье изложена основа модифицированного метода, описан реализованный в среде

MS Excel прототип алгоритма, а затем описана созданная в специализированной среде AnyLogic 6 рабочая модель. Адекватность прототипа доказана сравнением с результатами полного перебора для небольшого числа базовых точек, позволяющего точно вычислить правильное решение. Для рабочей модели, в свою очередь, устанавливается адекватность проверенному прототипу. Специально спланированные эксперименты по тестированию подтверждают адекватность прототипа и модели. В заключение рассмотрены различные примеры использования модели и расположения портов.

Ключевые слова: рационализация маршрутов, задача коммивояжера, генетические алгоритмы, доказательство адекватности.

Для цитирования:

Кузнецов А. Л. Метод генетических химер для решения задачи рационализации маршрутов морской транспортировки / А. Л. Кузнецов, А. В. Кириченко, Г. Б. Попов // Вестник Государственного университета морского и речного флота имени адмирала С. О. Макарова. — 2017. — Т. 9. — № 3. — С. 456–467. DOI: 10.21821/2309-5180-2017-9-3-456-467.

Введение (Introduction)

Среди множества логистических задач, рассматриваемых при организации любых перевозок, всегда в том или ином виде присутствует задача определения оптимального маршрута. Оптимальность в строгом математическом значении всегда понимается в смысле некоторого выбранного критерия. Им может быть наименьшая длина маршрута, минимальная стоимость перевозки, кратчайшее время в пути и т. д. Формальных алгоритмов многокритериальной оптимизации не существует, поэтому для принятия во внимание нескольких факторов обычно используются различные способы свертки линейных и нелинейных свертки — аддитивных или мультипликативных. Несмотря на все предпринимаемые усилия, в полученном интегральном критерии присутствует значительный субъективный фактор. Как результат, найденное решение оказывается половинчатым, далеким от оптимума по каждому из базовых критериев, и полученная оптимальность становится неочевидной. Эвристические «заплатки» в виде лексикографических методов, методов Парето и других способны улучшать решения в отдельных частных случаях, не решая проблему потери общности и универсальности. Кроме того, дискретный характер большинства переменных, входящих в критерии оптимизации, не позволяет применять эффективные и хорошо изученные классические методы функционального анализа, оставляя полный перебор вариантов единственным методом с доказуемой результативностью. В то же время размерность пространства поиска обычно исключает использование этого инструмента.

Как следствие, задача оптимизации в указанной постановке остается актуальной для математики как теоретической дисциплины, на практике в лучшем случае вытесняясь в сферу методов поддержки решений. Кроме того, при практическом применении действует жестокий принцип естественного экономического отбора, который позволяет быстро оптимизировать решение самостоятельно. В результате этого на установившихся направлениях, маршрутах и стрингах глобальных транспортных сетей задача оптимизации маршрутов давно решена самым убедительным образом, а возможные постановки в большинстве случаев сводятся к анализу чувствительности к отклонениям от сложившихся шаблонов.

В своей почти начальной постановке задача оптимизации маршрутов возникла на этапах масштабного освоения новых территорий и проектирования соответствующей сети морских перевозок для их транспортного обслуживания. Таким полигоном, в частности, сегодня является зона Арктики, Северного морского пути и прилегающих территорий. Ввиду неуставившегося характера грузопотоков, возникающих в ответ на многообразие разнообразных транспортных задач региона (обеспечение Северного завоза, организации вывоза добываемых природных ископаемых, обеспечение функций снабжения, поддержка экспедиционного завоза, оборонная деятельность и др.), данная задача приобретает новую актуальность [1] – [3]. В частности, возобновляется интерес и к самой простой и решенной в линейном судоходстве задачи: определению наименее

затратного кругового рейса с заходом в конкретные порты с конкретным грузом при перевозках в Арктическом регионе.

Целью данной статьи является создание алгоритмического инструмента, способного решать задачи оптимизации круговых судовых рейсов, базируясь на критерии длины маршрута. Для достижения данной цели необходимо решить следующие задачи: разработать прототип модели доступными неспециализированными средствами, доказать адекватность прототипа сверкой с результатами метода полного перебора, разработать модель в специализированной среде моделирования и доказать адекватность модели сверкой с результатами прототипирования и метода полного перебора.

Методы и материалы (Methods and Materials)

Известно, что рассматриваемую задачу можно свести к задаче коммивояжера (Travelling Salesman Problem — TSP), заключающейся в поиске наиболее выгодного маршрута, пролегающего через n пунктов, с заходом в пункты по одному разу и возвратом в исходный пункт [4], [5]. Количество возможных маршрутов N , удовлетворяющих указанному условию, определяется выражением $N = n!$, где n — количество пунктов захода.

С точки зрения теории вычислительной сложности данная задача является трансвычислительной, так как при значениях $n \geq 67$ требуется обработка более 10^{94} бит информации методом полного перебора, что превышает предел Бремерманна, равный 10^{93} [6]. Этот факт позволяет отнести задачу к классу NP-сложных задач, что означает невозможность нахождения решения за полиномиальное время, т. е. время, полиномиально зависящее от объёма исходных данных [7]. Поэтому любые современные варианты поиска решения данной задачи основываются на использовании эвристических алгоритмов [8], [9] либо применении методов линейного программирования [10]. Одним из наиболее эффективных среди интенсивно исследуемых методов, по мнению авторов статьи, является эволюционное программирование, точнее, генетические алгоритмы.

Первые предположения касательно создания самообучающейся машины, базирующейся на принципах, схожих с принципами эволюционной теории, были высказаны А. Тьюрингом еще в 1950 г. Им были сформулированы основополагающие понятия эволюционного программирования: наследование, мутации, естественный отбор на основе целевой функции [11]. В дальнейшем ряд учёных развивали идеи, заложенные Тьюрингом, однако методологический базис оставался неизменным. Непосредственно генетические алгоритмы как часть эволюционного программирования получили распространение благодаря работам Джона Генри Холланда [12].

В основе использования любого генетического алгоритма лежит понятие *целевой функции* (Fitness) для каждого рассматриваемого варианта решения. Значение целевой функции, полученное для каждого варианта решения задачи, позволяет судить о том, насколько он подходит для ее решения.

В классическом варианте генетический алгоритм состоит из следующих шагов:

1. *Инициализация* (Initialization) — создание популяции возможных решений проблемы. Как правило, изначальные «особи» популяции, т. е. конкретные варианты решения, задаются случайно.

2. *Селекция* (Selection) — на каждом шаге выполнения алгоритма из популяции выбирается определённое количество «особей», лучше других удовлетворяющих условию целевой функции в данном поколении (на данном шаге). Только эти «особи» получают возможность скрещиваться между собой и давать потомство. В рассматриваемом случае это решения, несущие в себе части (хромосомы) родительских решений. Необходимо отметить, что количество «родителей» не обязательно равно двум. Некоторые исследователи считают, что увеличение количества родительских решений, предоставляющих свои хромосомы, благоприятно сказывается на качестве вычислений [13].

3. *Применение генетических операторов* (Genetic Operators) скрещивания (Crossover) и мутации (Mutations). «Особь», выбранная на этапе селекции, скрещивается между собой определенным образом, давая потомство, которое займёт место отмерших, т. е. наименее удовлетворяющих условиям целевой функции, «особей» в следующем поколении. Однако данный механизм может привести к так называемому «вырождению популяции», выражающемуся в невозможности преодоления локального минимума при помощи одних скрещиваний. Для предотвращения вырождения вводятся мутации — периодические случайные изменения «хромосом» в отдельных «особях».

4. *Остановка алгоритма* (Termination). Обычно условиями остановки (Termination Condition) выступают: нахождение решения, удовлетворяющего условиям задачи, достижение фиксированного количества шагов выполнения алгоритма, ручное вмешательство (Manual Inspection) и т. д.

Описанная общая схема алгоритма допускает модификации, позволяющие адаптировать его к потребностям конкретной задачи. Такие модификации рассмотрены далее в статье.

Предположим, что на некотором побережье имеются n портов, в которые необходимо совершить по одному судозаходу в рамках кругового рейса. Координаты портов в простейшем случае задаются в декартовой системе координат и измеряются в милях, т. е. расстояние между двумя любыми портами можно рассчитать по формуле

$$S_{i,j} = \sqrt{(x_i - x_j)^2 + (y_i - y_j)^2}, \quad (1)$$

где $S_{i,j}$ — расстояние между портом i и портом j ; x_i, x_j — координаты соответствующих портов по оси абсцисс; y_i, y_j — координаты соответствующих портов по оси ординат.

Используя формулу (1), можно построить матрицу расстояний между всеми портами, с помощью которой будет вычисляться длина каждого кругового рейса. Для простоты изложения не будем принимать во внимание факторы стоимости и общего времени рейса, тем самым полагая целевой функцией минимизацию длины маршрута рейса.

Каждый рейс состоит из последовательности портов, в которые необходимо совершить судозаход. Поскольку все рейсы круговые, первый и последний порты в последовательности всегда совпадают. Таким образом, для шести портов рейсы могут быть представлены комбинациями из шести неповторяющихся чисел от одного до шести. Поскольку для целевой функции безразлично, начиная с какого порта идет последовательность, количество комбинаций, в которое будут входить все уникальные варианты последовательности портов, определяется выражением $N = (n - 1)!$ При выбранном для демонстрационного примера числе портов $n = 6$ количество различных маршрутов составит 120. Найти маршрут наименьшей длины из такого количества комбинаций оказывается возможным при помощи *метода полного перебора*, что позволит проверить корректность работы алгоритма.

Необходимо отметить, что генетический алгоритм в классической форме не совсем удобен для решения задачи коммивояжера. Причина этого кроется в невозможности использования для скрещивания геномов двух «родителей» напрямую, поскольку «гены» (конкретные порты в маршруте) одного «родителя» могут быть уже использованы в «генах» другого, что противоречит условию захода во все порты только один раз (на рис. 1, *а* показаны повторяющиеся при наследовании «гены»). Для предотвращения подобных случаев предложен механизм создания «химер» — «особей» следующего поколения, наполовину повторяющих геном «родителя», наполовину генерирующих собственный геном из недостающих элементов (на рис. 1, *б* выделены «гены», сформированные случайным образом). От каждого «однополого родителя», таким образом, формируются две «особи»: одна с «головой родителя» и случайным «хвостом», другая — с «хвостом родителя» и случайной «головой», что и объясняет их название.

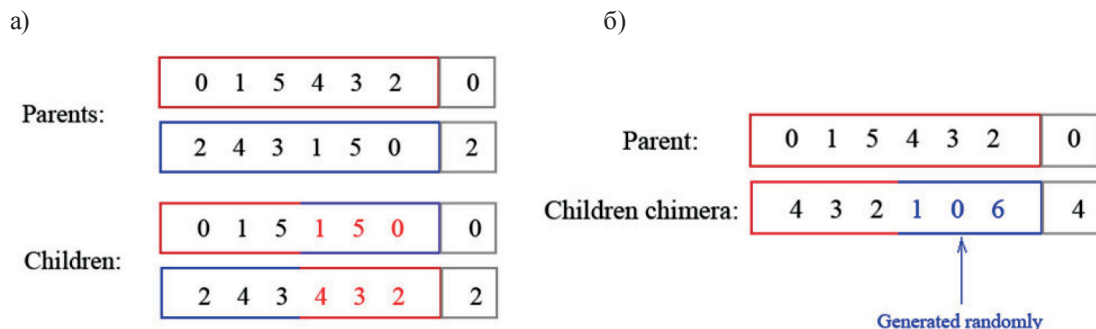


Рис. 1. Механизм наследования генов:

а — классический генетический алгоритм; б — метод генетических химер

Прототип указанной модификации генетического алгоритма можно реализовать средствами MS Excel. С этой целью необходимо задать координаты портов в декартовой системе и сформировать автоматически вычисляемую матрицу расстояний между ними (рис. 2).

	A	B	C	D	E	F	G	H	I	J	K
1		x	y			1	2	3	4	5	6
2	ПОРТ 1	500	100		1	0	206	451	430	488	187
3	ПОРТ 2	450	300		2	206	0	459	341	444	79
4	ПОРТ 3	50	75		3	451	459	0	214	119	382
5	ПОРТ 4	110	280		4	430	341	214	0	127	281
6	ПОРТ 5	20	190		5	488	444	119	127	0	374
7	ПОРТ 6	389	250		6	187	79	382	281	374	0

Рис. 2. Задание координат портов
и расчёт матрицы расстояний между ними

Далее необходимо задать начальную популяцию, т. е. сформировать случайные начальные варианты маршрутов круговых рейсов (конечный пункт совпадает с первым, поэтому не указывается). В расчетном примере объем популяции выбран равным восьми, и начальными значениями могут служить любые неповторяющиеся перестановки чисел от двух до шести, которые являются «особями» нулевого поколения. Для каждой «особи популяции» с помощью матрицы попарных расстояний может быть рассчитана длина соответствующего маршрута. На основании этого из созданных «особей» отбирается половина наиболее приспособленных (выделяются четыре решения с минимальным значением целевой функции, т. е. с минимальной длиной маршрута). На рис. 3 показана начальная «популяция». Отбираемые «особи» представлены нижними цветными строками.

		1	2	3	4	5	6				
	1	1	4	2	3	6	5	2473		1471,307	8
	2	1	4	2	5	3	6	1901		1792,384	5
	3	1	4	2	5	6	3	2420		1837,714	4
	4	1	4	2	6	3	5	1838		1900,927	2
	5	1	4	2	6	5	3	1792			
	6	1	4	3	2	5	6	2106			
	7	1	4	3	2	6	5	2043			
	8	1	4	3	5	2	6	1471			
		1	4	3	5	6	2				
1471	1750,58	1	4	3	5	2	6	1471	1		
		1	4	2	6	5	3	1792	2		
		1	4	2	6	3	5	1838	3		
		1	4	2	5	3	6	1901	4		

Рис. 3. Генерация случайных «особей» первого поколения
и выбор четырех лучших из них

После этого каждое следующее поколение генерируется аналогичным табличным блоком, несущим в себе все функции по преобразованию. Тиражирование такого блока в листе MS Excel позволяет быстро и легко создать любое количество шагов генетического алгоритма. Такой «блок поколения» приведен на рис. 4.

	4	1	1	4	3	2	6	5	2043			1360,98	8
	1	2	1	4	3	5	2	6	1471			1471,307	2
	1	3	1	4	2	6	3	5	1838			1792,384	4
	1	4	1	4	2	6	5	3	1792			1837,714	3
	4	5	1	4	2	3	5	6	1908				
	1	6	1	4	2	6	3	5	1838				
	1	7	1	4	2	5	6	3	2420				
	2	8	1	2	4	5	3	6	1361				
1361	1627,36		1	2	4	5	3	6	1361	1			
			1	4	3	5	2	6	1471	2			
			1	4	2	6	5	3	1792	3			
			1	3	2	6	4	5	1885	4			

Рис. 4. «Блок поколения»

Как видно из рис. 4, «особи» соответствующих цветов, отбираемые из предыдущего поколения, расщепляются на «голову» и «хвост», а их недостающие части генерируются случайным образом. Генерация средствами MS Excel сводится к перестановке элементов в соответствии с одним из пяти возможных протоколов. Схема перестановки по каждому протоколу представлена на рис. 5.

Protocol #	Permutation		
1	A	C	B
2	B	A	C
3	C	A	B
4	B	C	A
5	C	B	A

Рис. 5. Протоколы перестановки «генов»

Номер протокола генерируется случайным образом (этот номер содержится во втором столбце блока рис. 4), что и реализует случайный механизм образования соответствующей недостающей части «химеры». Так же, как и в исходной популяции, в каждом блоке поколения отыскиваются четыре наименьших значения длины маршрута (второй справа столбец блока на рис. 4) и номера «особей», которые соответствуют этим значениям. Они будут отобраны для химерного размножения в следующем поколении (четыре последние строки). Минимум целевой функции, достигнутый в данном поколении, приводится в первом столбце, четвертой строке снизу на рис. 4. Как видно из ранее изложенного, каждый блок поколения равен одному шагу генетического алгоритма.

Во избежание «вырождения» системы, возможность которого была указана ранее, используется механизм мутаций. С этой целью два «гена», произвольно выбранные из «головы» и «хвоста» одной из «особей», меняются местами. Таким образом, в каждом поколении одна из четырех «особей» мутирует, предотвращая циклическое движение алгоритма вокруг локального минимума и создавая возможность для перехода к более перспективной локалии.

Для проверки корректности работы вышеописанного алгоритма можно составить массив из 120 строк, включающий все уникальные варианты решения (перестановки). Расчет длины маршрута для каждого из вариантов представляет собой метод полного перебора, на основании которого в данном массиве выбирается минимальное решение. Все решения, получаемые на каждом из k шагов прогона генетического алгоритма, для изучения эффективности сравниваются с этим минимальным значением (рис. 6). В приведенном на этом рисунке примере число шагов алгоритма

ма составило $k = 15$, а реальный минимум, который был найден, составил $k = 13$ шагов. Однако этот параметр зависит как от генерации случайных «особей» нулевого поколения, так и от генерации случайного значения протоколов перестановок. Результаты прототипирования были также сверены с результатами, полученными *методом ветвей и границ*, позволяющим отсекал подмножества решений, заведомо не содержащие оптимальные маршруты.

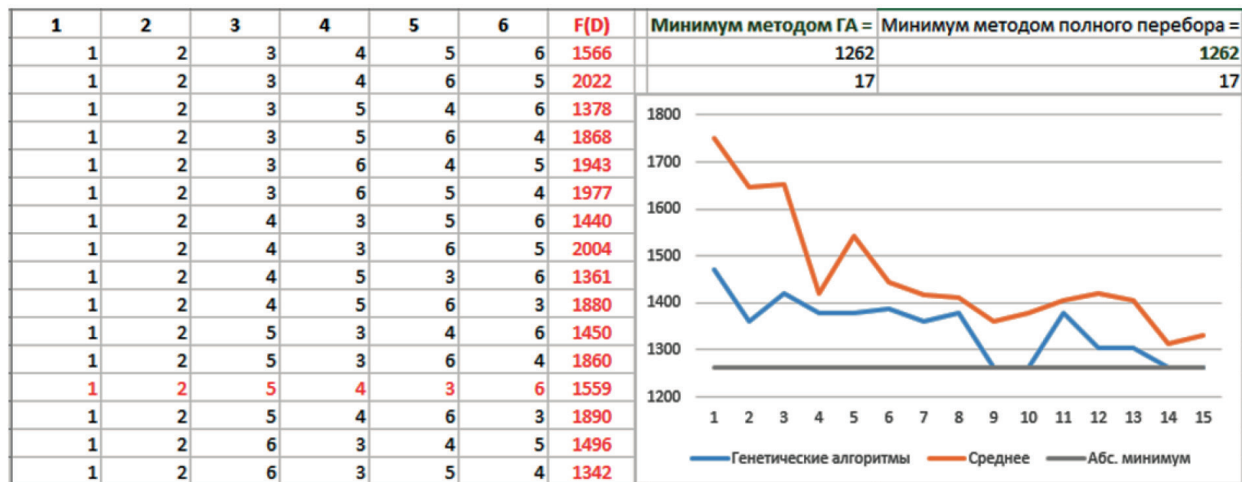


Рис. 6. Проверка методом полного перебора, сравнение эффективности методов

После прототипирования и проверки адекватности метода средствами MS Excel была разработана более мощная модель в специализированной среде моделирования AnyLogic 6 (информация о лицензии: USB-ключ #00559). Моделирование данной задачи в среде AnyLogic 6 базируется на двух событиях, представленных на рис. 7. Событие *base* задаёт координаты для шести портов, рассчитывает матрицу дистанций между портами и генерирует нулевое поколение из 12 случайных маршрутов. Это событие выполняется один раз в момент времени, равный нулю. Второе событие — *algorithm* — является циклическим, выполняется каждую единицу времени (для удобства восприятия человеком) и служит основой генетического алгоритма модели. При выполнении этого события происходит подсчёт целевой функции для каждой «особи», выбор лучших шести «особей» в популяции, разделение «особей» на «химеры», генерация случайных «хвостов химер», мутации, а также отслеживание минимального значения в течение всего времени прогона модели.

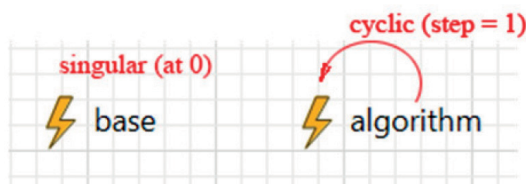


Рис. 7. Базовые события в AnyLogic 6

Для удобства сравнения результатов начальные данные в этой модели совпадают с начальными данными прототипа в MS Excel (см. рис. 2 и 8).

```
pts[0].setPos(500, 100);
pts[1].setPos(450, 300);
pts[2].setPos(50, 75);
pts[3].setPos(110, 280);
pts[4].setPos(20, 190);
pts[5].setPos(389, 250);
```

Рис. 8. Задание начальных координат портов в AnyLogic 6

Принцип работы модели (рис. 9) аналогичен принципу работы прототипа. Основным различием является практически неограниченное количество шагов при прогоне модели, что позволяет проводить более глубокие вычисления. Кроме того, нет необходимости копировать блоки поколений, чтобы увеличить количество шагов, что значительно упрощает моделирование.



Рис. 9. Общий алгоритм работы модели на AnyLogic 6

Мутации в модели представлены повторяемой перестановкой двух случайных «генов» в «особи». Число повторов выбрано равным $0,25n$, где n — число портов захода. Данное значение было найдено эмпирическим путем как благотворно влияющее на скорость выполнения модели. Количество «мутирующих особей» задаётся в виде доли от размера «популяции».

Результаты (Results)

На рис. 10 представлены результаты двух прогонов модели, в которых исходные данные взяты из прототипа модели (см. рис. 8) в первом случае (рис. 10, а) без мутаций, во втором (рис. 10, б) — с мутациями. В первом случае система не смогла найти значения меньше 1303, во втором случае было найдено значение 1263, являющееся абсолютным минимумом по результатам проверки *методом полного перебора*.

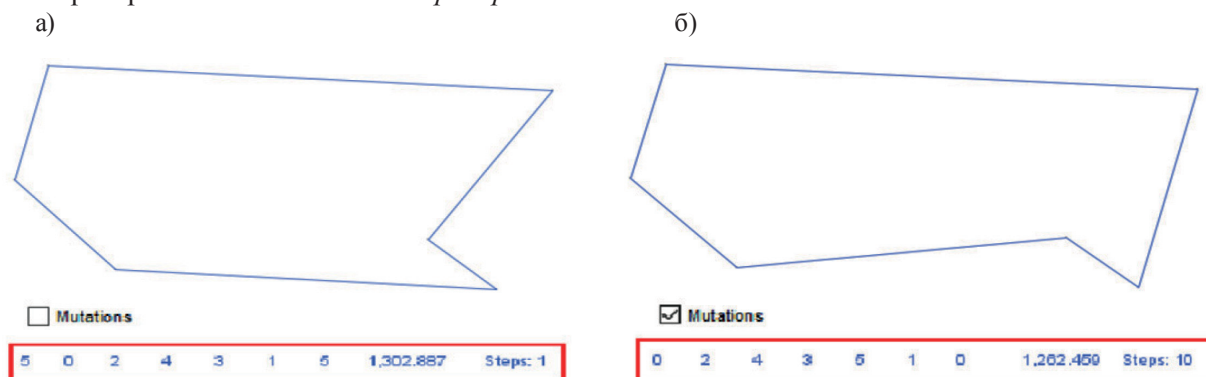


Рис. 10. Результаты прогона модели на AnyLogic 6:
а — без «мутаций»; б — с «мутациями»

Помимо экспериментов, повторяющих поведение прототипа, были проведены эксперименты с большим числом портов захода. На рис. 11, а представлены результаты прогона модели

для 20 портов захода с их круговым расположением. Количество «особей в популяции» установлено вдвое большим, чем число портов захода. Мутации распространялись на 30 % «особей». Модели потребовалось 3 184 346 шагов для нахождения правильного решения для 20 точек. Однако в реальности маршруты круговых рейсов представляют из себя, скорее, ломаную линию, при этом порты могут быть расположены в виде кластеров на разных побережьях. В связи с этим был проведен эксперимент, представленный на рис. 11, б. Порты сгруппированы в два кластера со случайными отклонениями от заданных координат для каждого кластера таким образом, что их расположение формирует линию побережья. Количество «особей» и доля мутировавших «особей» такие же, как и в предыдущей серии экспериментов. Для нахождения оптимального решения модели потребовалось 1 538 140 шагов.

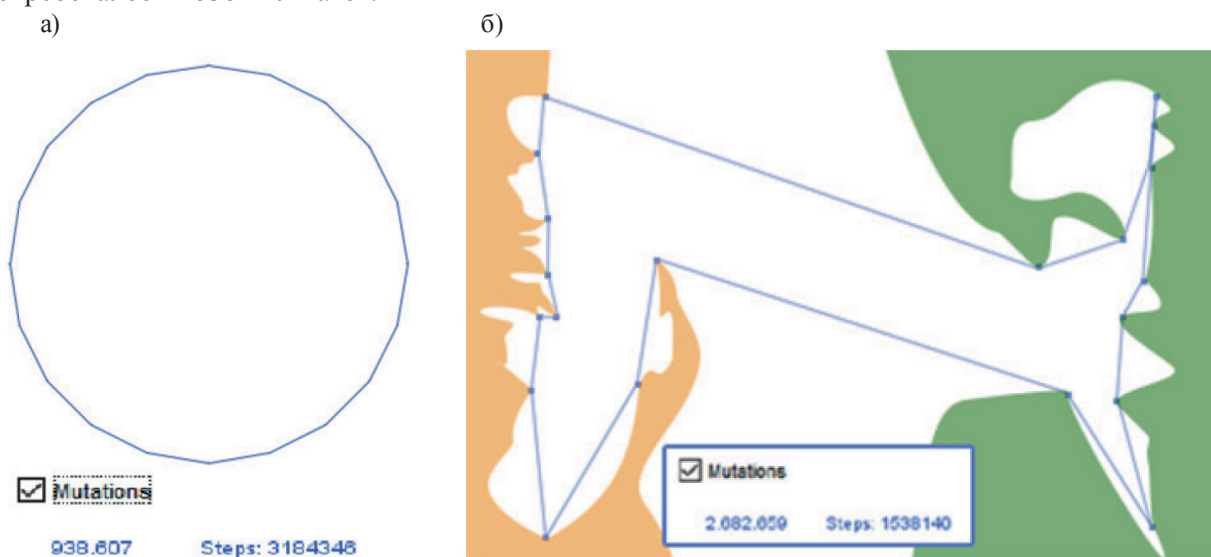


Рис. 11. Результаты прогона модели на AnyLogic 6 для 20 портов:
а — с круговым расположением; б — с кластерным расположением

Обсуждение (Discussion)

Результаты, приведенные на рис. 10, свидетельствуют о необходимости включения механизма мутаций в любую модель, основанную на генетических алгоритмах. Если данный механизм не проработан, велика вероятность того, что модель найдет лишь локальный минимум, как это видно на рис. 10, а. Однако влияние мутаций на работу модели на этом не заканчивается. Для более глубокого изучения влияния этого механизма на результаты прогона модели добавлена возможность его выключения во время прогона. В результате моделирования было выявлено, что постоянные мутации отрицательно влияют на скорость нахождения моделью абсолютного минимума. Периоды мутаций необходимо чередовать с периодами безмутационной эволюции при достаточно большом количестве портов захода. Кроме того, важным фактором является калибровка системы мутаций, а именно: доля популяции, на которую они влияют, частота мутаций, число мутирующих «генов» и т. д. Рис. 10 также демонстрирует, что результаты моделирования при помощи AnyLogic 6 совпадают с результатами прототипирования при помощи MS Excel, а также результатами, полученными методом полного перебора, что подтверждает адекватность модели.

Для изучения поведения модели была проведена серия экспериментов с большим числом портов захода, которые для обеспечения наглядности были расположены на одной окружности, как показано на рис. 11, а. Очевидно, что при таком расположении портов кратчайший путь через все точки равен периметру фигуры, вписываемой в окружность, и не может быть

больше длины окружности. Следовательно, моделирование будет успешно проведено, когда модель найдёт путь, равный периметру обхода всех точек, как показано на рис. 11. Значительное увеличение количества шагов, затрачиваемых моделью на поиск оптимального решения по сравнению с рис. 10, объясняется природой задачи, рассмотренной ранее в данном исследовании.

На рис. 11, б приведен пример, более тесно связанный с реальностью, в котором некоторые 20 портов сформированы в два кластера по 10 портов на двух разных побережьях. Рис. 10 и 11 с матрицами расстояний между портами доступны для скачивания по ссылке: <https://journal.gumrf.ru/files/upload/art/9-3-1KKP.rar>.

Заключение (Conclusion)

Задача оптимизации играет важнейшую роль в регионах с развивающейся транспортной инфраструктурой и неустановившимися грузовыми потоками. Этим обусловлена актуальность данной задачи. Одним из наиболее эффективных методов поиска решения является *эвристическое программирование*, а именно использование генетических алгоритмов. На основе этого метода разработаны прототип и модель в специализированной среде моделирования и доказана их адекватность. Дальнейшим развитием в данной области представляется изучение возможностей рационализации перевозок между кластерами портов.

Таким образом, на основании ранее изложенного можно сделать следующие выводы:

1. Предложен алгоритм решения задачи поиска наименьшего по длине пути, основанный на современных методах эволюционного программирования. Практический смысл задачи обусловлен ее применимостью для решения проблем оптимизации в транспортной логистике.
2. Адекватность алгоритма доказана на примере варианта постановки задачи, допускающего проверку нахождения оптимального решения методом полного перебора, т. е. реализации задачи коммивояжера для шести портов захода.
3. На основании исследованного прототипа в профессиональной среде моделирования создана модель, позволяющая изучать проблему для необходимых практически размеров пространства поиска.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Лебедев Г. В. Перспективы развития арктической морской транспортной системы / Г. В. Лебедев, Г. Е. Румянцев // Вестник Государственного университета морского и речного флота имени адмирала С. О. Макарова. — 2014. — № 3 (25). — С. 179–189.
2. Ботнарюк М. В. Анализ состояния и перспективы развития Северного морского пути / М. В. Ботнарюк // Вестник Государственного университета морского и речного флота имени адмирала С. О. Макарова. — 2013. — № 1 (20). — С. 186–194.
3. Давыденко А. А. Обоснование концепции создания транспортной системы совместного использования в арктическом регионе Российской Федерации / А. А. Давыденко, А. В. Кириченко, А. А. Кузнецов // Вестник Государственного университета морского и речного флота имени адмирала С. О. Макарова. — 2015. — № 3 (31). — С. 120–124. DOI: 10.21821/2309-5180-2015-7-3-120-124.
4. Schrijver A. On the history of combinatorial optimization (till 1960) / A. Schrijver // Handbooks in Operations Research and Management Science. — 2005. — Vol. 12. — Pp. 1–68. DOI: 10.1016/S0927-0507(05)12001-5.
5. García A. Polynomially solvable cases of the bipartite travelling salesman problem / A. García, J. Tejel // European Journal of Operational Research. — 2017. — Vol. 257. — Is. 2. — Pp. 429–438. DOI: 10.1016/j.ejor.2016.07.060.
6. Bremermann H. J. Optimization through evolution and recombination / H. J. Bremermann // Self-Organizing Systems. — USA, Washington DC, Spartan Books, 1962. — Pp. 93–106.

7. Knuth D. E. Postscript about NP-hard problems / D. E. Knuth // ACM SIGACT News. — 1974. — Vol. 6. — Is. 2. — Pp. 15–16. DOI: 10.1145/1008304.1008305.
8. Changdar C. An efficient genetic algorithm for multi-objective solid travelling salesman problem under fuzziness / C. Changdar, G. S. Mahapatra, R. K. Pal // Swarm and Evolutionary Computation. — 2014. — Vol. 15. — Pp. 27–37. DOI: 10.1016/j.swevo.2013.11.001.
9. Nguyen H. D. Implementation of an effective hybrid GA for large-scale travelling salesman problems / H. D. Nguyen, I. Yoshihara, K. Yamamori, M. Yasunaga // IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics, Part B (Cybernetics). — 2007. — Vol. 37. — Is. 1. — Pp. 92–99. DOI: 10.1109/TSMCB.2006.880136.
10. Morton G. A contribution to the “Travelling-salesman” Problem / G. Morton, A. H. Land // Journal of the Royal Statistics Society. Series B (Methodological). — 1955. — Vol. 17. — No. 2. — Pp. 185–203.
11. Turing A. M. Computer machinery and intelligence / A. M. Turing // Mind. — 1950. — Vol. 59. — No. 236. — Pp. 433–460. DOI: 10.1093/mind/LIX.236.433.
12. Holland J. H. Adaptation in Natural and Artificial Systems / J. H. Holland. — UK, London: The MIT Press, 1992. — 211 p.
13. Eiben A. E. Genetic algorithms with multi-parent recombination / A. E. Eiben, P.-E. Raué, Zs. Ruttkay // International Conference on Parallel Problem Solving from Nature. — Springer Berlin Heidelberg, 1994. — Pp. 78–87. DOI: 10.1007/3-540-58484-6_252.

REFERENCES

1. Lebedev, G. V., and G. E. Rumyantsev. “The prospects of arctic marine transportation system’s development.” *Vestnik Gosudarstvennogo universiteta morskogo i rechnogo flota imeni admirala S.O. Makarova* 3(25) (2014): 179–189.
2. Botnariuk, M. V. “Analysis and perspectives of North sea way development.” *Vestnik Gosudarstvennogo universiteta morskogo i rechnogo flota imeni admirala S.O. Makarova* 1(20) (2013): 186–194.
3. Davydenko, A. A., A. V. Kirichenko, and A. L. Kuznetsov. “Theoretical justification for the development of multi-users transportation system in the Arctic region of Russian Federation.” *Vestnik Gosudarstvennogo universiteta morskogo i rechnogo flota imeni admirala S.O. Makarova* 3(31) (2015): 120–124. DOI: 10.21821/2309-5180-2015-7-3-120-124.
4. Schrijver, A. “On the history of combinatorial optimization (till 1960)” *Handbooks in Operations Research and Management Science* 12 (2005): 1–68. DOI: 10.1016/S0927-0507(05)12001-5
5. García, A., and J. Tejel. “Polynomially solvable cases of the bipartite travelling salesman problem.” *European Journal of Operational Research* 257.2 (2017): 429–438. DOI: 10.1016/j.ejor.2016.07.060.
6. Bremermann, H. J. “Optimization through evolution and recombination.” *Self-Organizing Systems*; edited by M. C. Yovits, G. T. Jacobi and G. D. Goldstine. Washington, DC: Spartan Books, 1962: 93–106.
7. Knuth, D. E. “Postscript about NP-hard problems.” *ACM SIGACT News* 6.2 (1974): 15–16. DOI: 10.1145/1008304.1008305.
8. Changdar, C., G. S. Mahapatra, and R. K. Pal. “An efficient genetic algorithm for multi-objective solid travelling salesman problem under fuzziness.” *Swarm and Evolutionary Computation* 15 (2014): 27–37. DOI: 10.1016/j.swevo.2013.11.001.
9. Nguyen, H. D., I. Yoshihara, K. Yamamori, and M. Yasunaga. “Implementation of an effective hybrid GA for large-scale travelling salesman problem.” *IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics, Part B (Cybernetics)* 37.1 (2007): 92–99. DOI: 10.1109/TSMCB.2006.880136.
10. Morton, G., and A. H. Land. “A contribution to the “Travelling-Salesman” Problem.” *Journal of the Royal Statistics Society. Series B (methodological)* 17.2 (1955): 185–203.
11. Turing, A. M. “Computer machinery and intelligence.” *Mind* 59.236 (1950): 433–460. DOI: 10.1093/mind/LIX.236.433.
12. Holland, J. H. *Adaptation in Natural and Artificial Systems*. London: The MIT Press, 1992.
13. Eiben, Agoston E., P.-E. Raue, and Zs Ruttkay. “Genetic algorithms with multi-parent recombination.” *International Conference on Parallel Problem Solving from Nature*. Springer Berlin Heidelberg, 1994: 78–87. DOI: 10.1007/3-540-58484-6_252.

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

Кузнецов Александр Львович —

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

Кириченко Александр Викторович —

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

Попов Герман Борисович — аспирант

Научный руководитель:
Кузнецов Александр Львович
ФГБОУ ВО «ГУМРФ имени
адмирала С. О. Макарова»
198035, Российская Федерация, г. Санкт-Петербург,
ул. Двинская, 5/7
e-mail: german_bp@mail.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

Kirichenko, Aleksandr V. —

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

Popov, German B. — Postgraduate

Supervisor:
Kuznetsov, Aleksandr L.
Admiral Makarov state University of Maritime
and Inland Shipping
5/7 Dvinskaya Str, St. Petersburg, 198035,
Russian Federation
e-mail: german_bp@mail.ru

Статья поступила в редакцию 27 апреля 2017 г.

Received: April 27, 2017.

DESTRUCTION OF A SOLITARY WAVE ON SUBMERGED OBSTACLE

M. V. Kitaev¹, V. M. Dorozhko²

¹ — Far Eastern Federal University, Vladivostok, Russian Federation

² — V. I. Il'ichev Pacific Oceanological Institute, Far Eastern Branch
of the Russian Academy of Sciences, Vladivostok, Russian Federation

The article is devoted to numerical modeling of destruction of a solitary wave by underwater obstacles of two types: single obstacles and obstacles in the form of a periodic sequence of single obstacles. Based on the approximation of 3rd order solutions of the Korteweg-de Vries equation a solitary wave generation was made in the computational domain. The time sequence of water surface elevation profiles, which illustrates the process of destruction and restoration of a solitary wave at a considerable distance from the underwater obstacle, was computed. It was found, the result of the remote consequences of the destruction of a solitary wave by an underwater obstacle is its restoration. The decrease of a solitary wave height is due to a partial reflection from the underwater obstacle and the formation of a trail of small waves moving behind the restored solitary wave. It is shown, together with the destruction of the profile of a solitary wave, the structure of the isolines of the velocity of the liquid acquires a chaotic form, which is characterized by a violation of symmetry and uniform distribution of the velocity isolines. The reason for the restoration of a solitary wave was found in motion of a solitary wave in a thin liquid layer above an underwater obstacle. The front part of this layer moves at a high speed and gradually creates an elevation of the free surface in the form of a solitary wave. The restoration of the initial symmetry and uniform distribution of isolines of fluid velocity is a criterion for the restoration of a solitary wave. Value of the destruction of a solitary wave on single and periodic underwater obstacles was estimated using the indicator of the energy dissipation of a solitary wave and the decrease in its height. The parameters (height and length) of single underwater obstacles and periodic sequences of single obstacles that provide the maximum decrease in the height of a solitary wave were calculated. Restoration of a solitary wave after complete destruction by an underwater obstacle is example of the unique property of solution to retain their previous shape.

Keywords: solitary wave, computational fluid dynamics, underwater obstacle, destruction of a solitary wave, restoration of a solitary wave.

For citation:

Kitaev, Maksim V., and Veniamin M. Dorozhko. "Destruction of a solitary wave on submerged obstacle." *Vestnik Gosudarstvennogo universiteta morskogo i rechnogo flota imeni admirala S.O. Makarova* 9.3 (2017): 468–480. DOI: 10.21821/2309-5180-2017-9-3-468-480.

УДК 004.942

РАЗРУШЕНИЕ УЕДИНЕННОЙ ВОЛНЫ ПОДВОДНЫМ ПРЕПЯТСТВИЕМ

М. В. Китаев¹, В. М. Дорошко²

¹ — Дальневосточный федеральный университет, г. Владивосток, Российская Федерация

² — Тихоокеанский океанологический институт им. В. И. Ильичева ДВО РАН,
г. Владивосток, Российская Федерация

В статье представлены результаты численного моделирования процесса разрушения уединенной волны подводными препятствиями двух типов: одиночными препятствиями и препятствиями в виде периодической последовательности одиночных препятствий. На основе аппроксимации 3-го порядка решения уравнения Кортевега–де Фриза выполнена генерация уединенной волны в расчетной области. Вычислена временная последовательность профилей возвышений поверхности воды, иллюстрирующих процесс разрушения и восстановления уединенной волны на удалении от подводного препятствия. Установлено, что результатом отдаленных последствий разрушения уединенной волны подводным препятствием является её восстановление, при этом уменьшение высоты обусловлено рассеянием энергии в связи с частичным отра-

жением уединенной волны от подводного препятствия и формированием шлейфа малых волн, движущихся за восстановившейся уединенной волной. Показано, что вместе с разрушением профиля уединенной волны структура изолиний скорости жидкости приобретает хаотичный вид, характеризующийся нарушением симметрии и равномерного распределения изолиний скорости. Установлена причина восстановления уединенной волны, состоящая в том, что вследствие движения уединенной волны в тонком слое жидкости над подводным препятствием формируется приповерхностный слой жидкости, передняя часть которого движется с высокой скоростью, постепенно образуя возвышение свободной поверхности в форме уединенной волны. Критерием восстановления уединенной волны является восстановление исходной симметрии и равномерного распределения изолиний скорости жидкости. Оценена степень разрушительного действия на уединенную волну одиночных и периодических подводных препятствий с помощью показателей рассеяния энергии уединенной волны и снижения её высоты. Вычислены параметры (высота и длина) одиночных подводных препятствий и периодических последовательностей, сформированных из одиночных препятствий, обеспечивающих максимальное снижение высоты уединенной волны, соответственно, до 43 % и 21 % от её начального значения. Отмечается, что восстановление уединенной волны после полного разрушения подводным препятствием является примером уникальных свойств солитонов сохранять свою прежнюю форму.

Ключевые слова: уединенная волна, вычислительная гидродинамика, подводное препятствие, разрушение уединенной волны, восстановление уединенной волны.

Для цитирования:

Китаев М. В. Разрушение уединенной волны подводным препятствием / М. В. Китаев, В. М. Дорожко // Вестник Государственного университета морского и речного флота имени адмирала С. О. Макарова. — 2017. — Т. 9. — № 3. — С. 468–480. DOI: 10.21821/2309-5180-2017-9-3-468-480.

Введение

Аномально высокие (до 30 м) морские волны могут нанести судам и морским инженерным сооружениям непоправимый ущерб [1]. Иногда их называют «волнами-убийцами» (Freak-waves), которые возникают в морях и океанах в местах с глубиной, превышающей половину длины такой волны, т. е. на глубоком море. Считалось, что они относятся к чрезвычайно редким явлениям природы, однако космические наблюдения свидетельствуют о высокой частоте их возникновения. Так, только за период 2006 – 2010 гг. было зарегистрировано 78 случаев возникновения аномальных волн [2].

Исследования последнего времени [3], [4] показали, что к аномальным волнам можно отнести также и *уединенные волны* (Solitary Waves), которые представляют собой возвышение свободной поверхности воды, движущееся с постоянной скоростью без изменения формы. В отличие от «волн-убийц», уединенные волны возникают на море с глубиной, много меньшей её длины, т. е. на мелком море. «Волны-убийцы» возникают и обрушиваются в течение короткого отрезка времени — одного периода волны [5], уединенные волны могут двигаться без изменения формы в течение длительного периода времени [6], величина которого ограничивается либо естественной диссипацией волны, либо подводными препятствиями, приводящими к её разрушению. Впервые такую волну наблюдал в 1834 г. шотландский ученый Джон Скотт Рассел [6], который впоследствии назвал её *уединенной волной*. Некоторые ученые, например, Эйри, указывали на невозможность движения волны конечной амплитуды на мелком море без изменения формы, Буссинеск и Рэлей разрешили эту проблему путем учета как нелинейных, так и дисперсионных процессов.

Конечность амплитуды создает условия для возникновения нелинейных процессов, выражающихся в искажении формы волны в виде увеличения крутизны её фронта. Дисперсионные процессы выражаются в преобладании скорости волн длинноволновой части спектра уединенной волны, этот фактор снижает крутизну фронта. При достижении баланса между этими процессами уединенная волна распространяется без изменения формы. Для математического обоснования существования уединенной волны потребовалось продолжительное время. Только в 1895 г. Кортевег и де Фриз получили уравнение, решение которого представляет

бегущую уединенную волну при допущении малости параметров нелинейности и дисперсии и тем самым завершили дискуссии по поводу реальности уединенных волн. В 1965 г. Забуски и Крускал установили, что асимптотическим решением уравнения Кортевега–де Фриза является уединенная волна, которая существует во многих областях физики. Принимая во внимание, что при столкновении уединенные волны не изменяют своей формы, Забуски и Крускал называли их *солитонами*. Это открытие актуализировало на долгие годы исследования в самых различных областях науки.

Как и «волны-убийцы», уединенные волны могут представлять серьезную опасность для морских судов [7]. В некоторых работах [8] цунами (большая волна в гавани) рассматривается как уединенная волна, представляющая собой в открытом море небольшое возвышение высотой до одного метра и длиной в несколько десятков километров, которое при подходе к шельфовому уклону вырастает до высот «волны-убийцы» и обрушившись на берег, может нанести ущерб береговым сооружениям. В связи с этим особую актуальность приобретают исследования, связанные с изучением способов защиты от уединенных волн путем их разрушения подводными препятствиями. В настоящее время известно значительное число работ, связанных с различными аспектами взаимодействия уединенной волны с подводными препятствиями, в которых рассматриваются вопросы разрушения уединенной волны. Так, например, в работе [9] численными методами изучается взаимодействие уединенной волны с одиночным препятствием, расположенным на дне бассейна. Установлено, что с увеличением высоты и длины препятствия в направлении движения уединенной волны усиливается как её разрушение, так и отражение от препятствия. При этом уединенная волна распадается на несколько волн различной амплитуды. В работах [10], [11] предлагается выполнить разрушение уединенной волны с помощью периодической последовательности препятствий или путем распределения в прибрежной зоне специальных железобетонных конструкций с целью уменьшения выбега волны на береговой уклон [12]. Можно выделить работу [13], в которой представлены результаты численного моделирования разрушения уединенной волны двумя одиночными препятствиями, установленными последовательно один за другим в направлении движения волны. Исследование, в частности, было направлено на изучение разрушающих свойств препятствий в зависимости от расстояния между ними. Максимальный эффект разрушения получен для варианта, когда расстояние между препятствиями составило одну длину уединенной волны.

Тем не менее результатов рассмотренных работ недостаточно для формирования представлений о характеристиках подводных препятствий, необходимых для максимального разрушения уединенных волн. До сих пор остается неизвестной систематизированная оценка зависимости разрушительных свойств подводных препятствий (одиночных и периодических) от их размеров. Кроме того, использованные в некоторых работах ламинарные модели турбулентности могут привести к ошибкам при вычислении поля скоростей в зоне разрушения уединенной волны, где имеют место высокие скорости сдвига между смежными параллельными слоями жидкости, генерирующими значительную энергию турбулентности. В рассмотренных ранее работах вычисления выполнены на коротких интервалах времени в малоразмерных (в сравнении с длиной уединенной волны) расчетных областях. Из источника [6] известно, например, что в связи с тем, что уединенные волны обладают уникальным свойством сохранять свою идентичность, можно предположить наличие неизвестных отдаленных последствий, изменяющих представления о разрушительных свойствах подводных препятствий, полученных для малоразмерных расчетных областей.

В данной статье ставится задача выполнить численное моделирование *методом вычислительной гидродинамики* (с применением RNG k -epsilon модели турбулентности) процесса разрушения полноразмерных уединенных волн подводными препятствиями двух видов: одиночным прямоугольным препятствием и периодической последовательностью одиночных препятствий

с целью определить геометрические характеристики подводных препятствий, обеспечивающих максимальные рассеяние энергии и снижение высоты уединенной волны.

Особенностью задачи является соблюдение ограничений на соотношения глубины моря, высоты и длины уединенной волны, которые накладывает на указанные величины уравнение Кортевега–де Фриза [6], а именно: параметр нелинейности $\varepsilon = A/H$ должен быть меньше единицы (условие конечности амплитуды волны), а дисперсии $\gamma = H^2/\lambda^2$ — много меньше единицы, где A и λ — соответственно высота и длина уединенной волны; H — глубина моря.

Для реализации поставленной задачи использовалась численная модель, позволяющая формировать полноразмерный численный бассейн, на дне которого в заданном месте устанавливается подводное одиночное препятствие или периодическая последовательность одиночных препятствий. В процессе вычислений должны регистрироваться следующие параметры уединенной волны: абсцисса и высота максимума, полная энергия, а также геометрическая структура изолиний поля скорости жидкости. Кроме того, в процессе вычислений предусматривается визуализация расчетной области для иллюстрации процессов движения и разрушения уединенной волны. Размеры расчетной области должны позволить проследить отдаленные последствия процесса разрушения уединенной волны.

Методы и материалы

В соответствии с тенденцией использования численных методов [14] для моделирования уединенных волн применим для решения поставленной задачи *метод вычислительной гидродинамики* (CFD — Computational Fluid Dynamics). CFD-метод использует уравнения неразрывности несжимаемой жидкости и сохранения импульса (RANS-уравнения — Reynolds-Averaged Navier-Stokes Equations) [15], имеющие 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 ρ — плотность жидкости; $i, j = 1, 2, 3$ — индексы переменных в абсолютной системе координат $ox_1x_2x_3$; u_1, u_2, u_3 — осредненные в масштабе флуктуаций жидкости значения абсолютной скорости; t — время; p — гидродинамическое давление; μ — динамическая вязкость жидкости; δ_{ij} — символ Кронекера; u'_1, u'_2, u'_3 — флуктуации абсолютной скорости жидкости; g — ускорение свободного падения; предпоследний член во втором уравнении данной системы — напряжение Рейнольдса.

Численное моделирование выполнено в расчетной области (рис. 1), представляющей собой виртуальный бассейн, на дне которого установлено одиночное препятствие прямоугольной формы (см. рис. 1, а) или периодическая последовательность одиночных препятствий (см. рис. 1, б) общей длиной λ . На поверхности воды перед препятствиями в начальный момент времени создавалась уединенная волна w . Разбиение расчетной области квадратными сеточными элементами на схеме не показано. С течением времени уединенная волна двигалась от начального положения до удаленной точки r . В определенные моменты времени движения уединенной волны вычислялись её высота, полная энергия и структура скорости жидкости.

Рассмотрим основные моменты [16] решения системы уравнений (1). Для обеспечения решения расчетная область разбивалась одинаковыми прямоугольными сеточными элементами, что позволило сформировать с использованием метода конечного объема разностный аналог системы уравнений RANSE, которая решалась методом Гаусса–Зейделя. Применение алгоритма PISO (Pressure-Implicit with Splitting of Operators) обеспечило связь между полями скорости и давления и выполнение уравнения неразрывности. Метод Гаусса–Зейделя применен для аппроксимации градиентов переменных.

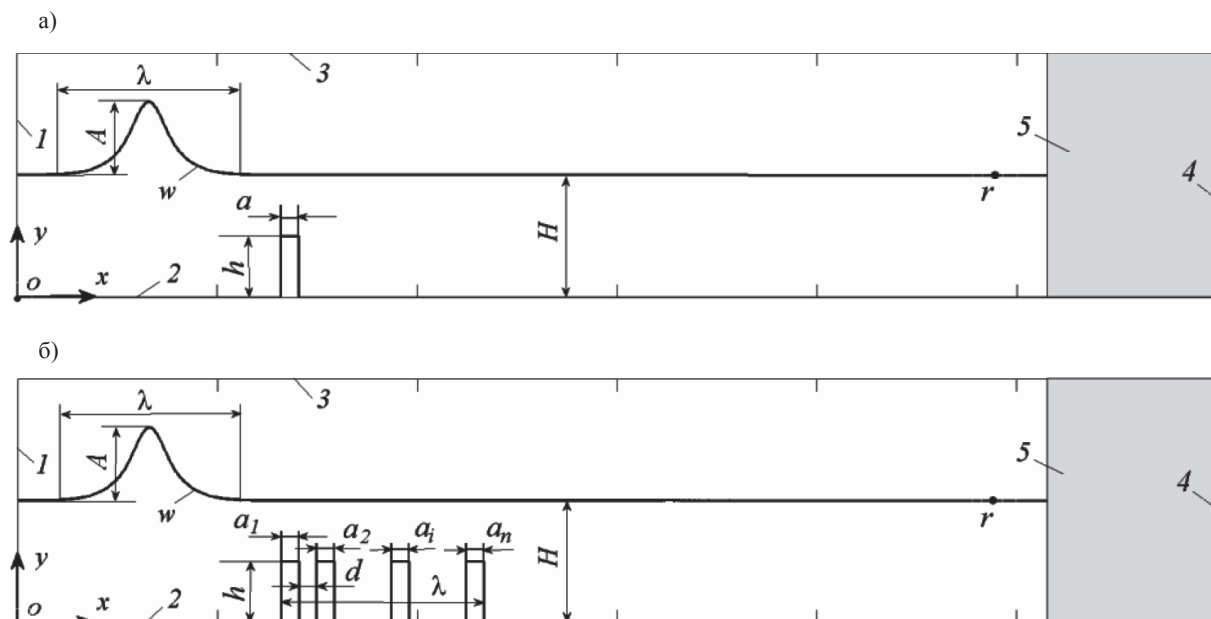


Рис. 1. Схема расчетной области численной модели:

a — с одиночным подводным препятствием прямоугольной формы;
 b — с периодической последовательностью одиночных препятствий;
 1 — входная граница; 2 — нижняя граница (дно); 3 — верхняя граница;
 4 — выходная граница; 5 — область повышенного затухания волн;
 oxy — система координат расчетной области; w — начальный профиль уединенной волны;
 r — конечная точка регистрации полной энергии и высоты восстановившейся уединенной волны;
 A и λ — соответственно высота и длина уединенной волны; H — глубина воды;
 a и h — соответственно длина и высота одиночного препятствия;
 $a_1, a_2, \dots, a_p, \dots, a_n$ — длины одиночных препятствий одинаковой высоты h ,
 формирующих периодическую последовательность общей длиной λ ,
 состоящей из n одиночных препятствий; d — интервал между смежными одиночными препятствиями

Схемы второго порядка точности применены для дискретизации полей давления и скорости. Напряжение Рейнольдса, учитывающее дополнительные потери и перераспределение энергии в турбулентном потоке, вычислялось с использованием модели турбулентности RNG $k - \epsilon$, где k — кинетическая энергия турбулентности, ϵ — удельная скорость её диссипации. Устойчивость вычислений обеспечивалась путем выполнения критерия Куранта–Фридрихса–Леви, согласно которому для 2D-задачи должно выполняться условие

$$\frac{u_x \Delta t}{l_x} + \frac{u_y \Delta t}{l_y} < CFL, \quad (2)$$

где l_x и l_y — размеры сеточного элемента соответственно в горизонтальном и вертикальном направлениях; CFL — константа. Во временной области выбран переменный шаг Δt дискретизации решения, поддерживающий при изменении скоростей жидкости u_x и u_y заданное значение величины CFL .

Для решения системы уравнений (1) требуется задание граничных и начальных условий. Граничное условие на нижней границе 2 расчетной области (см. рис. 1) соответствует нулевому значению нормальной компоненте скорости жидкости. На верхней открытой границе 3 выдерживалось атмосферное давление воздуха. На выходной границе 4 расчетной области поддерживалось постоянное давление, равное давлению воды в прилегающей области. Для исключения отражения волн от выходной границы 4 в зоне 5 создана область с повышенным затуханием волн. На каждом временном шаге решения определялось положение границы раздела воздух – вода (профиль w) методом объема жидкости (VOF — Volume of Fluid method), согласно которому в каждом сеточном

элементе, граничащем со свободной поверхностью, вычислялась доля жидкости, на основании которой геометрическим методом строилась свободная поверхность. Граничные условия на входной границе l расчетной области задавались в виде вектора скорости ($\mathbf{V}$) втекающей жидкости, полученного из решения уравнения Кортевега–де Фриза [17], [18] в виде разложения в степенной ряд третьего порядка относительно малого параметра нелинейности $\varepsilon = A/H$ (A — высота волны, H — глубина моря). В соответствии с указанным решением выражения для профиля w и компонент скорости u_x и u_y вектора скорости ($\mathbf{V}$) уединенной волны имеют вид:

$$\frac{w}{H} = 1 + \varepsilon s^2 - \frac{3}{4}(\varepsilon s q)^2 + \varepsilon^3 \left(\frac{5}{8} s^2 q^2 - \frac{101}{58} s^4 q^2 \right), \quad (3)$$

$$\begin{aligned} \frac{u_x}{C_0} = & \varepsilon s^2 - \varepsilon^2 \left[-\frac{1}{4} s^2 + s^4 + \left(\frac{y}{H} \right)^2 \left(\frac{3}{2} s^2 - \frac{9}{4} s^4 \right) \right] - \\ & - \varepsilon^3 \left[\frac{19}{40} s^2 + \frac{1}{5} s^4 - \frac{6}{5} s^6 + \left(\frac{y}{H} \right)^2 \left(-\frac{3}{2} s^2 - \frac{15}{4} s^4 + \frac{15}{2} s^6 \right) \right] + \\ & + \varepsilon^3 \left[\left(\frac{y}{H} \right)^4 \left(-\frac{3}{8} s^2 + \frac{45}{16} s^4 - \frac{45}{16} s^6 \right) \right]; \end{aligned} \quad (4)$$

$$\begin{aligned} \frac{u_y}{q y C_0 / H \sqrt{3\varepsilon}} = & -\varepsilon s^2 + \varepsilon^2 \left[\frac{3}{8} s^2 + 2s^4 + \left(\frac{y}{H} \right)^2 \left(\frac{1}{2} s^2 - \frac{3}{2} s^4 \right) \right] + \\ & + \varepsilon^3 \left[\frac{49}{640} s^2 - \frac{17}{29} s^4 - \frac{18}{5} s^6 + \left(\frac{y}{H} \right)^2 \left(-\frac{13}{6} s^2 - \frac{25}{16} s^4 + \frac{15}{2} s^6 \right) \right] + \\ & + \varepsilon^3 \left[\left(\frac{y}{H} \right)^4 \left(-\frac{3}{40} s^2 + \frac{9}{8} s^4 - \frac{27}{16} s^6 \right) \right], \end{aligned} \quad (5)$$

где $\varepsilon = \frac{A}{H}$; $s = \text{sech}(\gamma X/H)$; $q = \tanh(\gamma X/H)$; $\gamma = \sqrt{3\varepsilon/4} \left(1 - \frac{5}{8}\varepsilon + \frac{71}{128}\varepsilon^2 \right)$; $X = x - Ct$, x — абсцисса,

y — ордината в системе oxy ; $C = C_0 \sqrt{1 + \varepsilon - \frac{1}{20}\varepsilon^2 - \frac{3}{70}\varepsilon^3}$; $C_0 = \sqrt{gH}$; t — время.

Граничные условия на поверхности жидкости w (см. рис. 1) представляют собой совокупность вычисленных скоростей и давления в каждой сеточной ячейке на границе раздела сред *вода* – *воздух*. Профиль w уединенной волны (3) и u_x , u_y — компоненты скорости (4), (5) использовались для формирования начальных условий системы уравнений (1) путем задания в момент времени $t = 0$ значений указанных скоростей в сеточных ячейках, расположенных ниже профиля w . В остальной части расчетной области для исключения образования вихрей создавался горизонтальный поток воздуха с постоянной скоростью u_{air} . Указанные начальные условия применялись для получения результатов в конце первого временного шага вычислений. Далее эти результаты использовались в качестве начальных условий на втором шаге вычислений. Аналогичная процедура повторялась на протяжении всего процесса решения задачи.

Нарушение баланса нелинейных и дисперсионных процессов происходит при условии $\varepsilon > 0,688$ [19] и выражается в разрушении уединенной волны. Так как в соответствии с поставленной задачей уединенная волна до прихода в зону расположения препятствия не должна разрушаться, примем значение нелинейного параметра равным 0,6. В этом случае причиной разрушения уединенной волны будет являться увеличение параметра нелинейности свыше значений 0,688 за счет уменьшения глубины воды при проходе уединенной волны над препятствием.

Уединенная волна представляет собой предельное состояние одного периода кноидальной волны [6], когда её период, а соответственно и длина стремятся к бесконечности. Так, в публи-

кации [6, с. 1442] отмечается следующее: «Более точно можно говорить, что уединенная волна имеет длину волны λ не в смысле обычного пространственного периода, но в смысле расстояния, на протяжении которого поднятие водной поверхности составляет, например, свыше 3 % от своего максимального значения». В данной статье для повышения точности вычисления энергии уединенной волны указанная величина принята равной 0,3 %. Отметим, что величины кинетической энергии жидкости в уединенной волне, расположенной ниже и выше поверхности невозмущенной воды, соизмеримы. Таким образом, в качестве пространства интегрирования энергии уединенной волны следует рассматривать весь объем воды длиной λ и высотой от дна и до поверхности раздела *вода – воздух*.

Степень разрушающего действия различных препятствий на уединенную волну оценивалась с помощью двух величин: $\xi = (E_s - E_r) / E_s$ — показатель рассеяния препятствием энергии уединенной волны и $\zeta = A_r / A_s$ — показатель снижения её высоты, где E_s , A_s и E_r , A_r — соответственно полная энергия и высота уединенной волны в начальный момент времени ($t = 0$) и в конце вычислений в точке r (см. рис. 1).

Результаты

Численное моделирование проводилось в расчетной 2D-области длиной 7λ , высотой $4H$ и глубиной воды H , пространство которой разбито одинаковыми квадратными сеточными элементами со стороной 0,5 м. Плотность воды в расчетной области принята равной средней плотности поверхностных вод Мирового океана $1024,74 \text{ кг/м}^3$. В расчетной области (см. рис. 1, а) устанавливалось одиночное подводное препятствие прямоугольной формы, размеры которого выбирались из массивов значений длин $a = \lambda[0,04, 0,12, 0,2, 0,4, 0,8]$ и высот $h = H[0,5, 0,75, 0,9]$. Сочетание элементов указанных массивов определило пятнадцать вариантов численных моделей с одиночными препятствиями.

Препятствие в виде периодической последовательности общей длиной λ (см. рис. 1, б) формировалось из одиночных препятствий длиной a_i ($a_i = a$, $i = 1, \dots, n$; $d = a$) и высотой h , размеры которых выбирались из массивов значений $a = \lambda[0,04, 0,12, 0,2]$ и $h = H[0,5, 0,75, 0,9]$. Сочетание элементов указанных массивов определило девять вариантов численных моделей с препятствиями в виде периодической последовательности n одинаковых одиночных препятствий. Массив уединенных волн представлен двумя волнами с параметрами $A = 12 \text{ м}$, $H = 20 \text{ м}$, $\lambda = 250 \text{ м}$ и $A = 24 \text{ м}$, $H = 40 \text{ м}$, $\lambda = 500 \text{ м}$, которые удвоили число указанных выше вариантов численных моделей, в рамках каждой из которых выполнена оценка степени разрушения уединенной волны подводным препятствием. Для обеспечения устойчивости вычислений значение константы CFL критерия Куранта–Фридрихса–Леви поддерживалось равным 0,25 за счет переменного шага вычислений. В воздушной части расчетной области задавался ламинарный поток со скоростью $u_{\text{air}} = 2 \text{ м/с}$.

На рис. 2 представлен типичный пример временной последовательности диаграмм, иллюстрирующих процесс разрушения подводным препятствием и восстановления уединенной волны. В момент времени t_1 зафиксировано начальное положение уединенной волны. На диаграммах, соответствующих моментам времени t_2 и t_3 , отмечается увеличение крутизны фронта волны, что свидетельствует о возрастании параметра нелинейности, который в эти моменты составляет $\varepsilon^* = \frac{A}{H} \frac{1}{1 - h/H}$. Первый множитель определяет параметр нелинейности уединенной волны на акватории без подводных препятствий, второй — отображает корректирующее влияние подводного препятствия.

Следует подчеркнуть, что параметр ε^* характеризует нелинейный процесс лишь в течение короткого отрезка времени $[t_2, t_3]$, при этом процесс разрушения уединенной волны подводным препятствием развивался в течение отрезка времени $[t_2, t_5]$.

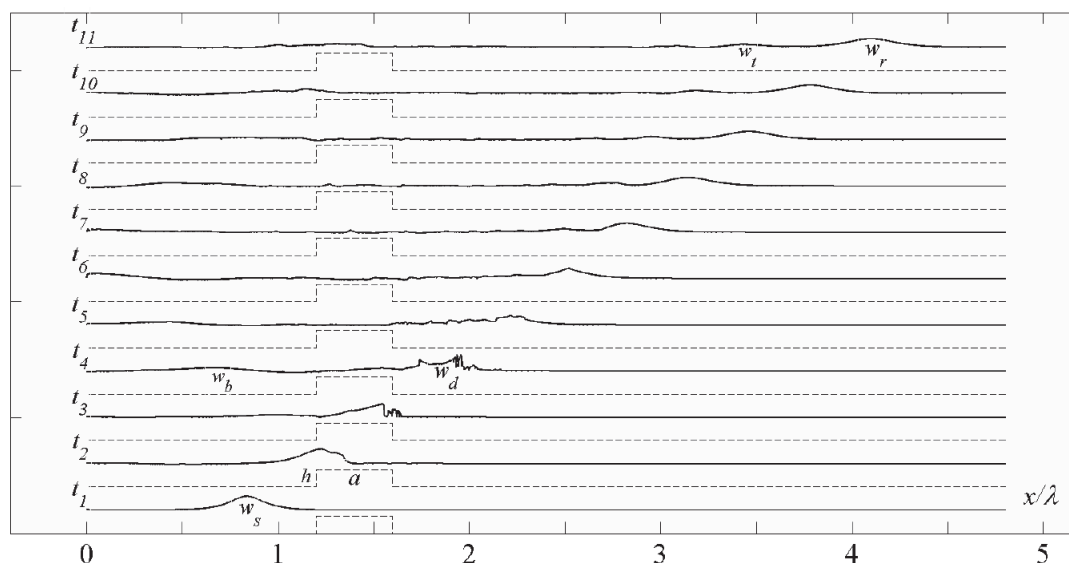


Рис. 2. Типичный пример временной последовательности диаграмм, иллюстрирующих процесс разрушения и восстановления уединенной волны:

$t_1, \dots, t_{11}$ — моменты времени регистрации диаграмм;
 h и a — соответственно высота и длина подводного препятствия;
 w_s — начальный профиль; w_b — профиль отраженной волны;
 w_d и w_r — соответственно профили разрушенной и восстановившейся волны;
 w_t — одна из волн, образовавшихся в шлейфе восстановившейся уединенной волны

Необходимо отметить существенное различие профилей волн w_s и w_d в моменты времени t_1 и t_4 как по форме, так и по высоте. Начиная с момента времени t_6 поверхность воды стала приобретать очертания одиночного возвышения, которое к моменту t_{11} приобрело типичную форму профиля w_r уединенной волны. Данный результат можно рассматривать как отдаленное следствие разрушения уединенной волны w_s подводным препятствием, выражающееся в восстановлении уединенной волны w_r меньшей высоты.

На рис. 3 показаны фрагменты диаграмм для моментов времени t_1 , t_4 и t_{11} (см. рис. 2), которые иллюстрируют структуру скорости жидкости, представленную на каждой диаграмме десятью изолиниями (в начальный момент, в моменты разрушения и восстановления уединенной волны соответственно). Структура изолиний скорости уединенной волны с начальным профилем w_s имеет типичный вид (см. рис. 3, а), соответствующий выражениям (4), (5), и характеризуется геометрической симметрией относительно условной вертикальной оси, проходящей через наивысшую точку профиля. При этом изолинии промежуточных значений скорости жидкости равномерно распределены между изолиниями, соответственно, максимального и минимального ($v_{\max}^s$ и $v_{\min}^s$) значений скорости. Здесь и далее $v_{\min}^j = 0, 1v_{\max}^j, j = [s, d, r]$ ($v_{\max}^j$ и $v_{\min}^j$ — изолинии соответственно максимального и минимального значений скорости жидкости, верхние индексы $j = [s, d, r]$ которых относят к соответствующим профилям уединенной волны). К моменту времени t_4 (см. рис. 2) произошло полное разрушение уединенной волны (профиль w_d), структура изолиний скорости жидкости приобрела хаотичный вид (см. рис. 3, б), характеризующийся нарушением геометрической симметрии распределения изолиний скорости между изолиниями максимального и минимального ($v_{\max}^d$ и $v_{\min}^d$) значений.

Следует отметить, что вследствие движения уединенной волны в тонком слое жидкости над подводным препятствием и произошедшего после этого её разрушения сформировался приповерхностный слой жидкости. В этом слое, который характеризуется как хаотичностью, так и высокой скоростью жидкости (см. рис. 3, б), сосредоточена вся энергия волны w_s (за исключением энергии отраженной волны w_b (см. рис. 2)), максимальное значение $v_{\max}^d$ которой отмечается в передней части профиля w_d разрушенной уединенной волны.

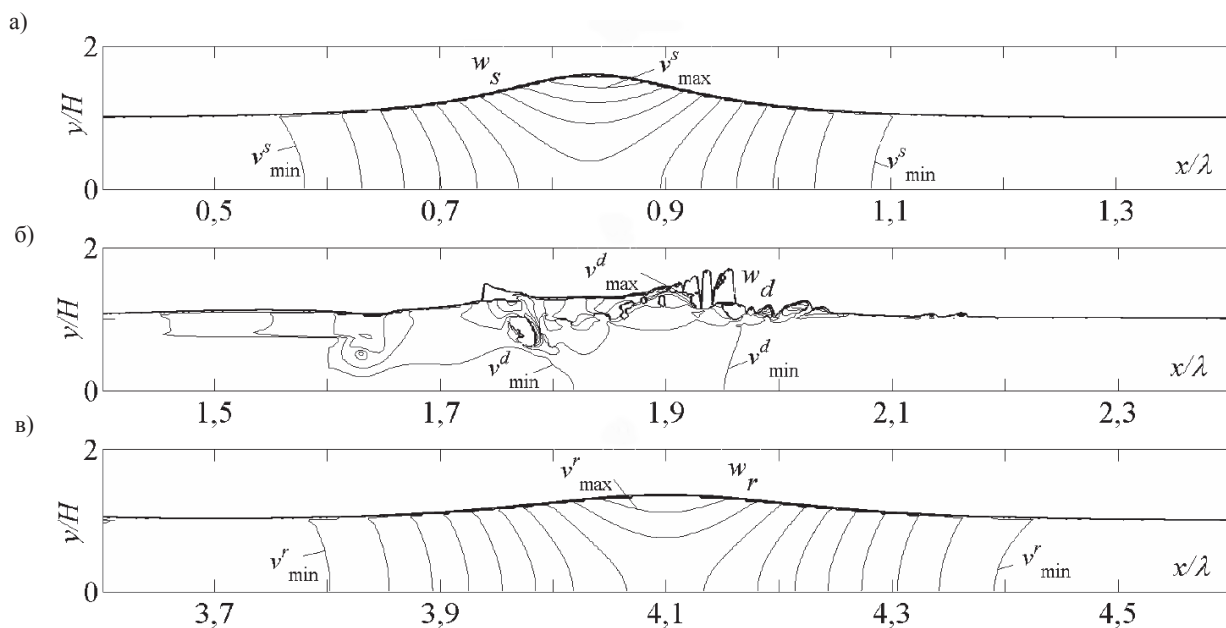


Рис. 3. Диаграммы профилей уединенной волны и структуры изолиний скорости жидкости — w_s , w_d и w_r и, соответственно, профили: начальной (а), разрушенной (б) и восстановившейся (в) уединенной волны

Движение указанной части профиля со скоростью $v_{\max}^d$ обусловило постепенное формирование к моменту времени t_{11} возвышения свободной поверхности жидкости в форме профиля w_r (см. рис. 3, в), позади которого движутся волны w_t малой высоты (см. рис. 2). Сформировавшееся возвышение свободной поверхности w_r является восстановившейся уединенной волной, качественные характеристики которой соответствуют уединенной волне с начальным профилем w_s (см. рис. 3, а): изолинии промежуточных значений скорости жидкости (см. рис. 3, в) имеют геометрически симметричную структуру и равномерно распределены между изолиниями максимального и минимального ($v_{\max}^r$ и $v_{\min}^r$) значений скорости. Таким образом, результатом отдаленных последствий разрушения уединенной волны подводным препятствием является её восстановление, а уменьшенная высота обусловлена рассеянием энергии в связи с частичным отражением уединенной волны от подводного препятствия и формированием шлейфа малых волн, движущихся вслед за восстановившейся уединенной волной.

Поскольку ранее было принято решение оценивать степень разрушающего действия на уединенную волну различных подводных препятствий с помощью двух показателей: $\xi = (E_s - E_r)/E_s$ — рассеяние препятствием энергии уединенной волны и $\zeta = A_r/A_s$ — снижение её высоты, где E_s , A_s и E_r , A_r — соответственно полная энергия и высота уединенной волны в начальный момент времени ($t = 0$) и в конце вычислений в точке r (см. рис. 2), были выполнены следующие расчеты.

Кинетическая энергия уединенной волны вычислена по формуле

$$E_k = \sum_{i=1}^K \frac{m_i u_i^2}{2},$$

где i — номер сеточной ячейки; $m_i = \rho b l^2$ и u_i — соответственно масса и скорость воды в ячейке; l — размер стороны квадратной ячейки; b — условная толщина сеточной ячейки, равная одному метру; K — число сеточных ячеек в пространстве уединенной волны длиной λ и высотой от дна до поверхности раздела вода-воздух.

Потенциальная энергия уединенной волны вычислена в соответствии с выражением

$$E_p = \sum_{i=1}^P g m_i (y_i - H),$$

где P — число сеточных ячеек в возвышении свободной поверхности уединенной волны; y_i — ординаты центров сеточных элементов, исчисляемых от уровня воды (H) в расчетной области до поверхности раздела *вода – воздух*.

Полные энергии E_s и E_r уединенной волны получены путем сложения кинетической и потенциальной энергий уединенных волн для профилей w_s и w_r соответственно.

Наилучшие показатели рассеяния энергии $\xi_3(\alpha_5) = 0,77$ и снижения высоты $\zeta_3(\alpha_5) = 0,43$ уединенной волны (рис. 4, а) получены для численной модели с одиночными подводными препятствиями высотой $h = 0,9H$ и длиной $a = 0,8\lambda$. Наихудшие показатели рассеяния энергии $\xi_1(\alpha_1) = 0,19$ и снижения высоты $\zeta_1(\alpha_1) = 0,98$ соответствуют $h = 0,5H$ и $a = 0,04\lambda$. Следует отметить, что увеличение длины $a_4 = 0,4\lambda$ вдвое (до значения $a_5 = 0,8\lambda$) улучшило рассмотренные показатели только на 11 %. Следовательно, высота $h = 0,9H$ и длина $a = 0,4\lambda$ являются предпочтительными для разрушения уединенной волны одиночным препятствием.

Из рис. 4, б следует, что наилучшие показатели рассеяния энергии $\xi_3(\alpha_2) = 0,93$ и снижения высоты $\zeta_3(\alpha_2) = 0,21$ уединенной волны получены для периодической последовательности длиной λ , сформированной из одиночных препятствий, высота и длина каждого из которых составляет $h = 0,9H$ и $a = 0,12\lambda$ соответственно. Наихудшие показатели рассеяния энергии $\xi_1(\alpha_1) = 0,61$ и снижения высоты $\zeta_1(\alpha_1) = 0,58$ получены для $h = 0,5H$ и $a = 0,04\lambda$. Дальнейшее увеличение длины $a_2 = 0,12\lambda$ одиночного подводного препятствия до значения $a_3 = 0,2\lambda$ ухудшает рассмотренные показатели. Следовательно, высота $h = 0,9H$ и длина $a = 0,12\lambda$ одиночного препятствия, используемого для построения препятствия в виде периодической последовательности длиной λ , является наилучшей для разрушения уединенной волны.

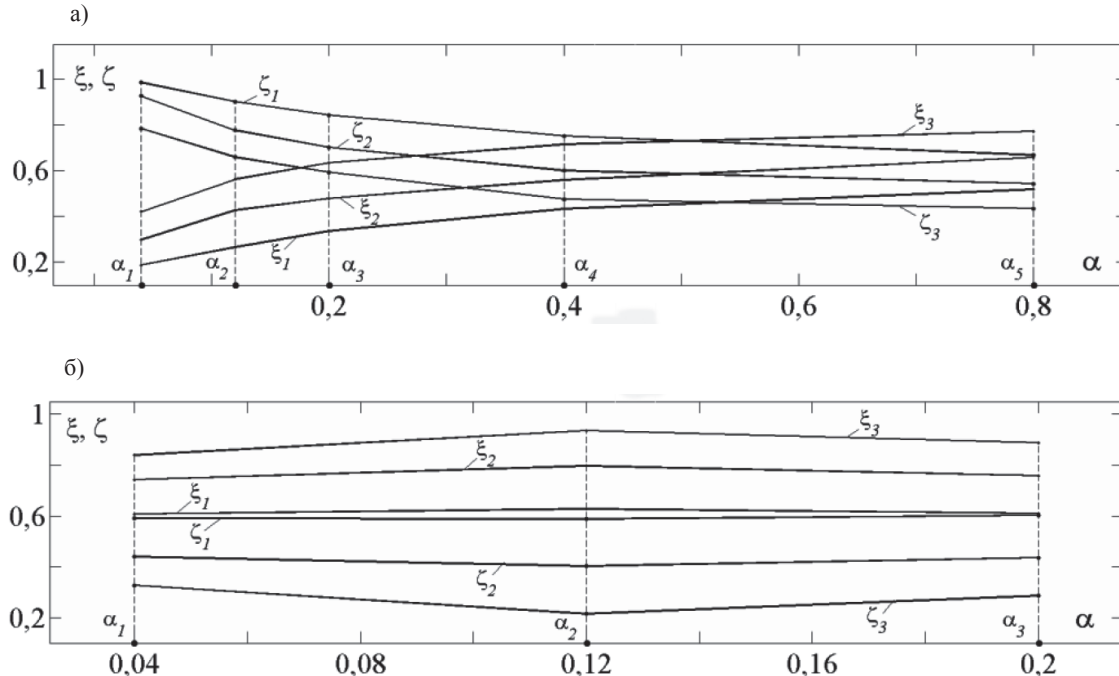


Рис. 4. Диаграммы показателей разрушения уединенной волны: а — одиночными препятствиями; б — периодическими последовательностями длиной λ , сформированными из одиночных препятствий.

На рис 4 показатели ξ — рассеяния препятствием энергии и ζ — снижения высоты уединенной волны, $\xi_1, \zeta_1; \xi_2, \zeta_2; \xi_3, \zeta_3$ вычислены в расчетных областях с высотами подводных препятствий $h_1 = 0,5H; h_2 = 0,75H; h_3 = 0,9H$ соответственно; $\alpha = a/\lambda$ — относительная длина подводных препятствий, значения которой $\alpha_1, \dots, \alpha_5$ составили массив [0,04, 0,12, 0,2, 0,4, 0,8].

Обсуждение

Полученные результаты позволяют сформировать систематизированное представление о разрушительных возможностях одиночных и периодических препятствий. Крускал и Забуски назвали уединенную волну солитоном [6], принимая во внимание, что распространяясь, солитон не изменяет формы и при «столкновении» с другим солитоном «проходит» через него, сохраняя свою прежнюю форму. В работе [7] показано, что уединенная волна, «сталкиваясь» с контуром (твердым телом), также не изменяет своей формы, т. е. ведет себя как солитон. Восстановление в данном случае уединенной волны после полного разрушения подводным препятствием можно рассматривать как расширение представлений об уникальном свойстве солитона сохранять свою прежнюю форму. Защитные сооружения в виде периодической последовательности одиночных препятствий являются наиболее эффективным средством разрушения уединенных волн. Полученные результаты в равной степени относятся к двум выбранным уединенным волнам с параметрами $A = 12$ м, $H = 20$ м, $\lambda = 250$ м и $A = 24$ м, $H = 40$ м, $\lambda = 500$ м в силу их геометрического подобия.

Заключение

1. Выполнено численное моделирование процесса разрушения уединенной волны одиночными подводными препятствиями различной длины и высоты, а также периодическими последовательностями, сформированными из указанных одиночных препятствий.

2. Вычислена временная последовательность профилей поверхности воды, отображающая процесс разрушения и восстановления уединенной волны на удалении свыше 3λ от подводного препятствия.

3. Установлено, что критерием восстановления уединенной волны после её разрушения подводным препятствием, является восстановление исходной структуры изолиний скорости жидкости.

4. Для создания защитных сооружений можно рекомендовать как одиночные подводные препятствия (высотой $0,9 H$ и длиной $a = 0,4\lambda$), так и периодические последовательности длиной λ , сформированные из одиночных препятствий (высотой $h = 0,9 H$ и длиной $a = 0,12\lambda$), которые обеспечивают максимальное снижение высоты уединенной волны, соответственно, до 43 % и 21 % от её начального значения.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Пелиновский Е. Н. «Фрики» — морские волны-убийцы / Е. Н. Пелиновский, А. В. Слюняев // Природа. — 2007. — № 3. — С. 14–23.
2. Nikol'kina I. Rogue waves in 2006 – 2010 / I. Nikol'kina, I. Didenkulova // Natural hazards and Earth system sciences. — 2011. — Vol. 11. — Pp. 2913–2924. DOI: 10.5194/nhess-11-2913-2011.
3. Шелковников Н. К. Солитонная версия формирования волн-убийц в океане / Н. К. Шелковников // Морской гидрофизический журнал. — 2012. — № 5. — С. 34–41.
4. 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.
5. Дорожко В. М. Оценка параметрической области опрокидывания контура морского судна на «волне-убийце» / В. М. Дорожко // Вестник Государственного университета морского и речного флота имени адмирала С. О. Макарова. — 2016. — № 2 (36). — С. 16–26. DOI: 10.21821/2309-5180-2016-8-2-16-26.
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. 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.

8. Dao M. H. Modeling of tsunami-like wave run-up, breaking and impact on a vertical wall by SPH method / M. H. Dao, H. Xu, E. S. Chan, and P. Tkalich // *Natural Hazards and Earth System Sciences*. — 2013. — Vol. 13. — Pp. 3457–3467. DOI: 10.5194/nhess-13-3457-2013.
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. Сергеев В. И. О способе разрушения цунами / В. И. Сергеев, Е. А. Сергеева // *Радиоэлектронная техника*. — 2015. — № 2 (8). — С. 277–286.
11. Esteban M. Stability of rubble mound breakwater against solitary waves / M. Esteban, I. Morikubo, T. Shibayama, R. Aranguiz-Muñoz, T. Mikami, T. D. Nguyen, K. Ohira, A. Ohtani // *Coastal Engineering Proceedings*. — 2012. — No. 33. — Pp. 9. DOI: 10.9753/icce.v33.structures.9.
12. Tsai C.-P. Simulation of the effect of breakwater on the propagation of solitary waves / C.-P. Tsai, Y.-C. Chen, C.-J. Chen, C. Lin // *Journal of Marine Science and Technology*. — 2016. — Vol. 24. — No. 4. — Pp. 780–789. DOI: 10.6119/JMST-016-0311-2.
13. Mansouri A. Interaction of Submerged Breakwater by a Solitary Wave Using WC-SPH Method / A. Mansouri, B. Aminnejad // *Modelling and Simulation in Engineering*. — 2014. — Vol. 2014. — No. 17. DOI: 10.1155/2014/524824.
14. Huang C.-J. Viscous flow fields induced by a breaking solitary wave over a shelf / C.-J. Huang, Y.-T. Lin, C.-Y. Lin // *Journal of Marine Science and Technology*. — 2015. — Vol. 23. — No. 6. — Pp. 855–863. DOI: 10.6119/JMST-015-0610-2.
15. 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.
16. Ferziger J. H. *Computational Methods for Fluid Dynamics* / J. H. Ferziger. — Berlin: Springer, 2002. — 431 p.
17. Farhadi A. Investigating the Third Order Solitary Wave Generation Accuracy using Incompressible Smoothed Particle Hydrodynamics / A. Farhadi // *International Journal of Engineering*. — 2016. — Vol. 29. — No. 3. — Pp. 426–435. DOI: 10.5829/idosi.ije.2016.29.03c.17.
18. Grimshaw R. The solitary wave in water of variable depth. Part 2 / R. Grimshaw // *Journal of Fluid Mechanics*. — 1971. — Vol. 46. — № 03. — Pp. 611–622. DOI: 10.1017/S0022112071000739.
19. Brun M. K. Convective wave breaking in the KdV equation / M. K. Brun, H. Kalisch // *Analysis and Mathematical Physics*. — 2017. — Pp. 1–19. DOI: 10.1007/s13324-017-0163-y.

REFERENCES

1. Pelinovsky, E. N., and A.V. Slunyaev. “«Freak Waves», or Sea Killer Waves.” *Nature* 3 (2007): 14–23.
2. Nikolkina, I., and I. Didenkulova. “Rogue waves in 2006–2010.” *Natural hazards and Earth system sciences* 11 (2011): 2913–2924. DOI: 10.5194/nhess-11-2913-2011.
3. Shelkownikov, N. K. “Solitonnyaya versiya formirovaniya voln-ubiits v okeane.” *Marine Hydrophysical Journal* 5 (2012): 34–41.
4. 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
5. Dorozhko, V. M. “Estimation of parametric range of capsizing of seagoing vessel contour in “rogue wave”.” *Vestnik Gosudarstvennogo universiteta morskogo i rechnogo flota imeni admirala S.O. Makarova* 2(36) (2016): 16–26. DOI: 10.21821/2309-5180-2016-8-2-16-26.
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. 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.
8. Dao, M. H., H. Xu, E. S. Chan, and P. Tkalich. “Modeling of tsunami-like wave run-up, breaking and impact on a vertical wall by SPH method.” *Natural Hazards and Earth System Sciences* 13 (2013): 3457–3467. DOI:10.5194/nhess-13-3457-2013.
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. Sergeev, V. I., and E. A. Sergeeva. "O sposobe razrusheniya cunami." *Radioelektronnaya tekhnika* 2(8) (2015): 277–286.
11. Esteban, Miguel, Izumi Morikubo, Tomoya Shibayama, Rafael Aranguiz-Muñoz, Takahito Mikami, Thao Danh Nguyen, Koichiro Ohira, and Akira Ohtani. "Stability of rubble mound breakwater against solitary waves." *Coastal Engineering Proceedings* 33 (2012): 9. DOI: 10.9753/icce.v33.structures.9.
12. Tsai, Ching-Piao, Ying-Chi Chen, Chun-Jen Chen, and Chang Lin. "Simulation of the effect of breakwater on the propagation of solitary waves." *Journal of Marine Science and Technology* 24.4 (2016): 780–789. DOI: 10.6119/JMST-016-0311-2.
13. Mansouri, Afshin, and Babak Aminnejad. "Interaction of Submerged Breakwater by a Solitary Wave Using WC-SPH Method." *Modelling and Simulation in Engineering* 2014.17 (2014). DOI: 10.1155/2014/524824.
14. Huang, Ching-Jer, Yen-Tsen Lin, and Chun-Yuan Lin. "Viscous flow fields induced by a breaking solitary wave over a shelf." *Journal of Marine Science and Technology* 23.6 (2015): 855–863. DOI: 10.6119/JMST-015-0610-2.
15. 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.
16. Ferziger, J. H. *Computational Methods for Fluid Dynamics*. Berlin: Springer, 2002.
17. Farhadi, A. "Investigating the Third Order Solitary Wave Generation Accuracy using Incompressible Smoothed Particle Hydrodynamics." *International Journal of Engineering* 29.3 (2016): 426–435. DOI: 10.5829/idosi.ije.2016.29.03c.17.
18. Grimshaw, R. "The solitary wave in water of variable depth. Part 2." *Journal of Fluid Mechanics* 46.03 (1971): 611–622. DOI: 10.1017/S0022112071000739.
19. Brun, Mats K, and Henrik Kalisch. "Convective wave breaking in the KdV equation" *Analysis and Mathematical Physics* (2017): 1–19. DOI: 10.1007/s13324-017-0163-y.

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

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

Дорожко Вениамин Мефодьевич —
кандидат физико-математических наук
Тихоокеанский океанологический институт
им. В. И. Ильичева ДВО РАН,
690041, Российская Федерация, г. Владивосток,
ул. Балтийская, 43
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
V.I.Ilichev Pacific Oceanological Institute, Far Eastern
Branch of the Russian Academy of Sciences
43 Baltijskaya Str., Vladivostok, 690041,
Russian Federation
e-mail: veniamin_dorozhko@mail.ru

Статья поступила в редакцию 12 мая 2017 г.
Received: May 12, 2017.

DOI: 10.21821/2309-5180-2017-9-3-481-488

CREATION OF A DECISION SUPPORT SYSTEM FOR THE INTEGRATED SECURITY OF TANKER-GAS CARRIERS

A. I. Epikhin

Admiral Ushakov Maritime University, Novorossiysk, Russian Federation

The article deals with the construction of a decision support system for the crew for the integrated security of tankers involved in the maritime transport of liquefied gases. In this case, it is proposed to use a two-level version of building a decision support system. At the first level - diagnostic - continuous monitoring and processing of the main parameters of each of the ship's technical means that affect the level of safety on the ship. These functions, depending on the types and models of the specific equipment, are realized either using the standard means of self-diagnosis of equipment, or with the use of additional technical solutions. At the second level — analytical — the received diagnostic information is processed in the intellectual analytical system, within which simulation simulations of current processes are performed to identify negative prospects for changing operating parameters and parallel verification of combinations of diagnostic parameters in accordance with analytical algorithms and the accumulated knowledge base allowing At an early stage to identify the development of adverse situations. The Decision Support System is designed to provide comprehensive security for tanker gas carriers, which allows the crew to promptly make a decision in the event of potentially dangerous situations on the tanker, due to a lack of operational knowledge and the crew's inability to handle extreme control. The built decision support system differs from the existing ones in that it allows to control a number of important diagnostic functions and analyze the change of technical parameters with the detection in the early stages of hidden defects and possible malfunctions of ship's technical means, as well as to predict and prevent potentially dangerous situations that may influence To reduce the safety of tanker-gas carriers. As a result of functioning of the built decision support system for the crew of the tanker-gas carrier, specific recommendations are developed and displayed that allow to avoid dangerous and emergency situations beforehand during the transition or during the performance of cargo operations.

Keywords: decision-making, ship technical means, emergency situation, safety, tanker-gas carrier, construction of the system.

For citation:

Epikhin, Alexey I. "Creation of a decision support system for the integrated security of tanker-gas carriers." *Vestnik Gosudarstvennogo universiteta morskogo i rechnogo flota imeni admiral S.O. Makarova* 9.3 (2017): 481–488. DOI: 10.21821/2309-5180-2017-9-3-481-488.

УДК 656.612

ПОСТРОЕНИЕ СИСТЕМЫ ПОДДЕРЖКИ ПРИНЯТИЯ РЕШЕНИЙ ДЛЯ КОМПЛЕКСНОГО ОБЕСПЕЧЕНИЯ БЕЗОПАСНОСТИ ТАНКЕРОВ-ГАЗОВОЗОВ

А. И. Епихин

ФГБОУ ВО «ГМУ имени адмирала Ф. Ф. Ушакова»,
Новороссийск, Российская Федерация

В статье рассмотрено построение системы поддержки принятия решений экипажем для комплексного обеспечения безопасности танкеров, задействованных в морских перевозках сжиженных газов. При этом предлагается использовать двухуровневый вариант построения системы поддержки принятия решений. На первом уровне — диагностическом — осуществляется непрерывный контроль и обработка основных параметров каждого из судовых технических средств, оказывающих влияние на уровень безопасности на судне. Данные функции, в зависимости от типов и моделей конкретного оборудования, реализуются либо с использованием штатных средств самодиагностики оборудования, либо с применением дополнительных технических решений. На втором уровне — аналитическом — осуществляется обработка полученной диагностической информации в интеллектуальной аналитической

системе, в рамках которой производится имитационное математическое моделирование текущих процессов с целью выявления негативных перспектив изменения рабочих параметров и параллельная проверка сочетаний диагностических параметров в соответствии с аналитическими алгоритмами и накопленной базой знаний, позволяющая на ранней стадии идентифицировать развитие неблагоприятных ситуаций. Система поддержки принятия решений предназначена для комплексного обеспечения безопасности танкеров-газовозов, которая позволяет экипажу оперативно принять решение в случае возникновения потенциально-опасных ситуаций на танкере, проявляющихся из-за недостатка оперативных знаний и неготовности экипажа к экстремальному управлению. Построенная система поддержки принятия решений отличается от существующих тем, что позволяет контролировать ряд важнейших диагностических функций и анализировать изменение технических параметров с выявлением на ранних стадиях скрытых дефектов и возможных неисправностей судовых технических средств, а также прогнозировать и предотвращать потенциально-опасные ситуации, которые могут оказать влияние на снижение безопасности танкеров-газовозов. В результате функционирования построенной системы поддержки принятия решений для экипажа танкера-газовоза вырабатываются и отображаются конкретные рекомендации, которые позволяют заблаговременно избежать опасных и аварийных ситуаций в процессе перехода или при выполнении грузовых операций.

Ключевые слова: принятие решения, судовое техническое средство, аварийная ситуация, безопасность, танкер-газовоз, построение системы.

Для цитирования:

Епихин А. И. Построение системы поддержки принятия решений для комплексного обеспечения безопасности танкеров-газовозов / А. И. Епихин // Вестник Государственного университета морского и речного флота имени адмирала С. О. Макарова. — 2017. — Т. 9. — № 3. — С. 481–488. DOI: 10.21821/2309-5180-2017-9-3-481-488.

Введение (Introduction)

В современных условиях проблема обеспечения безопасности системы управления судном связана со скоростью и правильностью принятия решений экипажем при восстановлении работоспособности судна в возникающих чрезвычайных ситуациях. Внедрение информационных технологий и систем поддержки принятия решений (СППР) при существующей автоматизации процессов управления судовыми техническими средствами способствует повышению и обеспечению безопасности. При этом компенсируется недостаток наличия оперативной информации во время поддержки принятия решений экипажем. Наибольшие проблемы при возникновении потенциально опасных ситуаций на танкерах связаны с недостаточной подготовкой (особенно в адаптационный период рейса) всех судовых специалистов, управленческой несогласованностью, недостатком оперативных знаний и неготовностью экипажа к экстремальному управлению [1].

Известные на сегодняшний день прототипы СППР для различных транспортных средств и систем позволяют эффективно решать различные частные задачи, связанные либо с организацией движения, либо с эксплуатацией конкретных технических единиц [2] – [7]. Как правило, СППР являются узкоспециализированными и предназначены для использования на строго определенных моделях и модификациях технических объектов, т. е. определенному танкеру-газовозу, танкеру-химовозу, сухогрузу и другим объектам свойственна индивидуальная СППР.

В научно-прикладной литературе практический интерес представляет исследование авторов работы [8], в котором был сформулирован термин «система информационной поддержки принятия решений». Авторы рассматривают такую информационную систему в качестве многоэтапного алгоритма, представляющего технологический цикл принятия конкретных решений по судовым техническим средствам (СТС). Однако они отмечают, что на момент исследования предпосылки к созданию таких систем еще не сложились, поскольку ни в научных кругах, ни у разработчиков программного обеспечения не существует единого понимания принципов построения, при этом за период времени, прошедший с момента появления понятия «СППР» до сегодняшнего дня, ситуация не претерпела коренных изменений.

Существующие СППР подразделяются на два функциональных класса [1] – [3]:

– системы, помогающие оптимизировать организационные и оперативные параметры (движение морских судов в стесненных условиях, предупреждение столкновений морских судов, движение морских судов в сложной ледовой обстановке и др.);

– системы, выполняющие диагностические функции (эксплуатационная безопасность, контроль режимов работы двигателей и др.).

Целью работы является построение универсальной СППР, предназначенной для использования на танкерах, специализирующихся на перевозке сжиженных газов во время принятия решений экипажем, вне зависимости от типа силовой установки, дедвейта, конструкции грузовой системы, районов плавания и других существенных особенностей судов с комплексным обеспечением безопасности.

Методы и материалы (Methods and Materials)

Современные СТС являются замкнутыми автономными системами, функционирующими под управлением собственных контроллеров в соответствии с заложенными производителем оборудования алгоритмами либо на основании алгоритмов, определяемых судоводителем. При этом следует отметить, что большинство таких СТС являются взаимосвязанными, ввиду чего во многих случаях необходимо обеспечивать одновременный сбор и анализ контролируемых параметров для нескольких систем, что в классическом их исполнении является затруднительным. Учитывая значительные потоки информации о параметрах различных СТС, для корректной интерпретации сведений, представляющих важность в контексте обеспечения безопасности, необходимо разработать алгоритмы автоматизированного отбора таких параметров в зависимости от навигационных или технологических условий в конкретные моменты времени [4], [9] – [11].

Современный уровень развития компьютерных технических и программных средств позволяет проводить непрерывный сбор практически неограниченного числа контролируемых параметров с последующей аналитической обработкой полученной информации в соответствии с алгоритмами любой степени сложности. При этом на сегодняшний день на практике отсутствуют программно-аппаратные средства, позволяющие реализовать централизованный сбор и обработку данных по всем судовым техническим средствам. По всей видимости, основной причиной этого является сравнительная простота эксплуатационной совокупности навигации использованием современных систем судовождения и судовых технологических систем для классических типов судов, преимущественно использующихся в мировой практике морских перевозок. При этом до последнего времени класс судов-газовозов являлся весьма малочисленным, и разработка специализированных технических и технологических решений для таких судов не представлялась экономически целесообразной.

Как отмечалось ранее, для судов, перевозящих сжиженные газы, характерны не только более высокий уровень технической сложности СТС, но и значительная степень их интеграции с основными судовыми системами, такими как пропульсивная и энергетическая установки. Поскольку технологические условия транспортировки сжиженных газов требуют значительно больших энергетических затрат на нужды СТС по сравнению с традиционно перевозимыми грузами, система контроля, диагностики и прогнозирования параметров для основных судовых систем танкеров-газовозов должна обладать возможностью работы с параметрами как для пропульсивных и энергетических, так и для грузовых систем и систем обеспечения безопасности совместно и одновременно. Представляется очевидным, что для интеграции сбора и анализа вышеперечисленной информации наиболее целесообразно выбрать готовую программно-аппаратную платформу, поскольку это позволит в значительной степени снизить финансовые затраты на внедрение [4], [11].

В настоящее время в мире используется ряд программных комплексов, предназначенных для контроля за технической эксплуатацией судов, характеризующихся различной степенью интеграции, автоматизации, а также степенью глубины контроля и количеством наблюдаемых параметров [4], [10]. Использование таких средств позволяет снизить трудоемкость эксплуатации СТС,

сократить количество задействованного персонала, а также улучшить планирование технического обслуживания, ремонта и снабжения судов расходными материалами и ЗИП. Помимо вышеперечисленных преимуществ, внедрение таких систем позволяет сократить время, затрачиваемое на техническое обслуживание и ремонт, вследствие чего сокращаются стоянки судов, финансовые затраты, а также достигается дополнительный экономический эффект, связанный с интенсификацией эксплуатации морского транспорта [10]. Для построения СППР используются программные комплексы компании Xantic: AMOS Express и AMOS Maintenance & Purchase. Данные программные комплексы позволяют автоматизировать выполнение следующих функций (программное обеспечение компании Xantic, 2002):

- имущественный контроль судового оборудования;
- подготовка спецификаций для ремонтных работ, переоборудования и доковых работ;
- планирование технического обслуживания и ремонта на основе календарного обслуживания, наработки, технического состояния или их комбинации;
- управление запасами;
- осуществление заказа и закупок запасных частей и расходных материалов;
- управление бюджетом судна;
- функции логистики при заказе запасных частей и расходных материалов;
- составление отчетности по текущим и архивным данным.

Использование данного программного комплекса позволяет осуществить оперативный контроль по ряду эксплуатационных параметров СТС, однако опыт его эксплуатации свидетельствует, в первую очередь, о повышении эффективности учета и снабжения, поскольку в программном комплексе отсутствуют алгоритмы сбора и обработки данных, позволяющие реализовать полноценный оперативный контроль и тем самым обеспечить повышение уровня безопасной эксплуатации судна. При этом следует отметить широкие возможности для планирования технического обслуживания и ремонта узлов и агрегатов, что, в некоторой мере, все же способствует повышению безопасности процесса технической эксплуатации как всего судна в целом, так и наиболее ответственных СТС в частности.

Результаты (Results)

Построение СППР для комплексного обеспечения безопасности танкеров-газовозов начинается с разработки алгоритма функционирования. Принцип алгоритма функционирования разрабатываемой СППР приведен на рисунке, где показаны основные СТС, однако состав контролируемых СТС может быть иным, поскольку на каждом танкере-газовозе используется разное оборудование и учитываются районы плавания.



Алгоритм функционирования системы поддержки принятия решений

Предлагаемая СППР предназначена для комплексного обеспечения безопасности танкеров - газовозов, при этом предусмотрено осуществление контроля и оптимизации как оперативных и организационных параметров, так и диагностических функций, с возможностью прогнозирования и предупреждения отказов СТС. Для построения СППР принята двухуровневая архитектура, поскольку обработка исходных данных предполагает отдельные методики для диагностических и организационных параметров.

На первом уровне осуществляется непрерывный контроль и обработка основных параметров каждого из СТС, оказывающих влияние на уровень безопасности на танкере-газовозе. Данные функции, в зависимости от типов и моделей оборудования танкера-газовоза, реализуются с использованием штатных средств самодиагностики оборудования или с применением дополнительных технических решений экипажем. Первым важным фактором на данном уровне является проведение мониторинга технических параметров оборудования танкера-газовоза, который позволяет значительно расширить функционал встроенных диагностических средств и существенно повысить вероятность раннего диагностирования скрытых дефектов или неисправностей. Вторым важным фактором является анализ взаимозависимых параметров различных СТС для выявления негативного влияния режимов функционирования одних групп оборудования на рабочие процессы в других системах.

На втором уровне осуществляется обработка полученной диагностической информации в интеллектуальной системе, в рамках которой производится имитационное моделирование текущих процессов с целью выявления негативных перспектив изменения рабочих параметров и параллельная проверка сочетаний диагностических параметров в соответствии с аналитическими алгоритмами и наполненной базой знаний, позволяющая на ранней стадии идентифицировать развитие неблагоприятных ситуаций.

На программном и аппаратном уровнях модули разрабатываемой СППР предполагается строить по принципу «черного ящика» (Black Box), в соответствии с которым для каждого из СТС используются стандартизированные входные и выходные параметры вне зависимости от функциональных характеристик и алгоритмов функционирования каждого из них. Выбор данной методики обусловлен необходимостью обеспечения универсальности разрабатываемой СППР, поскольку ее использование предполагается на танкерах-газовозах с различными типами энергетических установок, грузовых систем и прочих СТС. При использовании принципа «черного ящика» на стадии разработки СППР отсутствует необходимость использования конкретных математических моделей судового оборудования, а также появляется возможность для включения или исключения некоторых единиц оборудования, а также физической замены такого оборудования соответствующими программными модулями.

Программная часть проектируемой СППР представляет собой совокупность программных средств математического имитационного моделирования и интеллектуальной обработки информации, которая полностью реализуется в программном комплексе Lab View. Основной задачей данной части СППР является отслеживание, прогнозирование и предотвращение (точнее, выработка соответствующих рекомендаций экипажу) конкретных опасных и аварийных ситуаций, которые могут возникнуть в процессе эксплуатации танкера-газовоза в целом или отдельно взятого СТС.

Функционирование программной части СППР заключается в выявлении неблагоприятных условий, способствующих развитию опасных и аварийных ситуаций, и выработке соответствующих рекомендаций, направленных на принятие превентивных мер экипажем танкера-газовоза по их предотвращению. Для этого необходимо использовать ряд алгоритмов комплексного мониторинга взаимного функционирования функционально-взаимосвязанного оборудования. К важным аналитическим данным в таком контексте относятся комплексные показатели, характеризующиеся множеством разнородных факторов:

- величина запаса полезной мощности главной и вспомогательной энергетических установок;
- предполагаемые сбросы и набросы механических и электрических нагрузок;
- взаимные зависимости температурных режимов двигателя, груза и метеорологическая обстановка;
- режим движения судна, величина сопротивления движению, полезная нагрузка генераторных установок;
- параметры испарения груза, режим работы установок повторного сжижения, текущее и прогнозируемое потребление топлива основными и вспомогательными электроустановками;
- ледовая обстановка, метеопрогноз, параметры обледенения танкера, режим движения;
- прочие параметры, оказывающие влияние на безопасность эксплуатации танкера-газовоза в целом и СТС в частности, в зависимости от особенностей конструкции и районов эксплуатации.

В результате анализа этих параметров вырабатываются рекомендации для экипажа, которые представляют собой изменение маршрута, режимов работы силовых установок, превентивную активацию вспомогательных систем (система повторного сжижения груза, система антиобледенения и др.), а также возможность выполнения оперативного технического обслуживания СТС для повышения эксплуатационной надежности или восстановления работоспособности танкера-газовоза в целом.

В состав СППР входит база знаний, в которой на основе статистических данных накапливается информация о возможных неблагоприятных и опасных ситуациях, а также оптимальных методах их предотвращения или разрешения. Такая база знаний имеет прецедентный характер и направление по нахождению оптимальных оперативных решений в повторяющихся ситуациях.

Основные технические средства процедур сбора, накопления, передачи и централизации диагностических и функциональных параметров СППР представлены в виде пропорциональных аналоговых или цифровых электрических сигналов от соответствующих блоков, датчиков или измерительных преобразователей, пригодных для конвертирования в необходимый протокол передачи и сбора данных. В проектируемой СППР используется протокол Modbus RTU (описание протокола «Modbus RTU». Версия 1.0. ООО «Новая автоматика», 2016). Для данного протокола используется последовательный Master / Slave интерфейс, при котором каждому СТС танкера-газовоза выделяется отдельный концентратор с соответствующей адресацией.

В головном модуле сбора данных СППР производится последовательный опрос каждого концентратора судовой контрольно-диагностической системы, периодичность которого определяется количеством концентраторов и частотой контроллера шины Modbus. Для проектируемой СППР будет использована минимальная скорость 9600 бит/с, восьмиразрядные данные, таймаут запроса 0,01 с и одноярусная сеть — максимум 254 концентратора. При таких параметрах частота обновления информации по всем СТС составит 1 – 2 с, что в полной мере соответствует эксплуатационным требованиям, предъявляемым к таким СППР [1], [10].

В случае использования встроенных диагностических подсистем СТС танкера-газовоза в составе СППР в зависимости от типа используемых средств автоматизации необходимо обеспечить перевод соответствующих устройств в режим передачи информации с подключением необходимых конверторов протоколов либо использовать отдельные аналого-цифровые преобразователи для сигнальных линий с обеспечением соответствующей адресации и последующего подключения их к концентратору, предназначенному для рассматриваемой единицы оборудования. В зависимости от типа и модели каждого СТС, а также наличия возможностей удаленного управления при реализации системы должен быть предусмотрен нисходящий канал управления, позволяющий разрабатываемой СППР осуществлять корректирование режимов функционирования оборудования танкера-газовоза.

При реализации проектируемой СППР наибольшей сложностью характеризуются включение в систему модулей контроля навигационной обстановки и метеорологической информации, поскольку такие данные являются трудно формализуемыми. Для наиболее полного учета навигационной информации представляется целесообразным использовать возможности программного

комплекса Quastor или аналогов, которые позволяют осуществлять экспорт данных в проектируемую СППР в полностью автоматизированном режиме с использованием протокола обмена данными AIS. Соответственно в составе СППР предусматривается отдельный модуль импорта данных протокола AIS. Для получения метеоданных СППР от судовой метеорологической станции используются протоколы обмена данными. Для большинства судовых метеостанций характерным является экспорт оперативной информации посредством протокола RS-485, который, в свою очередь, может быть легко интегрирован в Modbus.

Обсуждение (Discussion)

Построенная СППР предназначена для комплексного обеспечения безопасности танкеров-газовозов, которая позволяет экипажу оперативно принять решение в случае возникновения потенциально-опасных ситуаций на танкере, проявляющихся из-за недостатка оперативных знаний и неготовности экипажа к экстремальному управлению. Построенная СППР отличается от существующих тем, что позволяет контролировать ряд важнейших диагностических функций и анализировать изменение технических параметров с выявлением на ранних стадиях скрытых дефектов и возможных неисправностей СТС, а также прогнозировать и предотвращать потенциально-опасные ситуации, которые могут оказать влияние на снижение безопасности танкеров-газовозов.

В результате функционирования построенной СППР для экипажа танкера-газовоза вырабатываются и отображаются конкретные рекомендации, которые позволяют заблаговременно избежать опасных и аварийных ситуаций в процессе перехода или при выполнении грузовых операций.

Заключение (Conclusion)

В статье проведено построение системы поддержки принятия решений экипажем для комплексного обеспечения безопасности танкеров, задействованных в морских перевозках сжиженных газов. При этом был использован двухуровневый вариант построения системы поддержки принятия решений. Данная система дает возможность осуществлять диагностические и аналитические функции, позволяющие на ранней стадии выявлять опасные и аварийные ситуации с формулированием соответствующих рекомендаций судоводителю по их предотвращению.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Голиков В. В. Системный подход к проблеме безопасного управления судном / В. В. Голиков // Судовождение. — 2009. — № 17. — С. 18–25.
2. Курейчик В. М. Особенности построения систем поддержки принятия решений // Известия ЮФУ. Технические науки / В. М. Курейчик. — 2012. — № 7 (132). — С. 92–98.
3. Цуканов М. А. Мультиагентная система поддержки принятия решений по оперативному планированию и технологической координации сложноструктурированных производственных систем / М. А. Цуканов, Л. М. Боева // Управление большими системами: сб. тр. — 2012. — № 39. — С. 254–263.
4. Бень А. П. Системы поддержки принятия решений судоводителя для планирования трансокеанских переходов / А. П. Бень, И. В. Паламарчук, Л. А. Пивоваров // Искусственный интеллект. — 2013. — № 4 (62). — С. 266–272.
5. Lingaitis L. P. Prediction methodology of durability of locomotives diesel engines / L. P. Lingaitis, S. Mjamlin, D. Baranovsky, V. Jastremskas // Eksploatacja i Niezawodnosc. — 2012. — Vol. 14. — Is. 2. — Pp. 154–159.
6. Lingaitis L. P. Experimental Investigations on Operational Reliability of Diesel Locomotives Engines / L. P. Lingaitis, S. Mjamlin, D. Baranovsky, V. Jastremskas // Eksploatacja i Niezawodnosc. — 2012. — Vol. 14. — Is. 1. — Pp. 6–11.
7. Барановский Д. Н. Определение остаточного ресурса трибосистем / Д. Н. Барановский // Проблемы трибологии. — 2009. — № 4 (54). — С. 127–129.

8. Вагущенко Л. Л. Бортовые автоматизированные системы контроля мореходности / Л. Л. Вагущенко, А. Л. Вагущенко, С. И. Заичко. — Одесса: ФЕНИКС, 2005. — 272 с.
9. Чкония В. А. Оценка достоверности представления базы данных судовому специалисту в интегрированной системе ходового мостика / В. А. Чкония, В. И. Меньшиков // Вестник Мурманского государственного технического университета. — 2003. — Т. 6. — № 1. — С. 81–86.
10. Епихин А. И. Программные и аппаратные методы сбора и обработки данных в системах поддержки принятия решений современных судов-газовозов / А. И. Епихин // Вестник Волжской государственной академии водного транспорта. — 2016. — № 46. — С. 189–198.
11. Епихин А. И. Моделирование динамических параметров судовых технических средств для построения систем поддержки принятия решений танкеров-газовозов / А. И. Епихин // Вестник Астраханского государственного технического университета. Серия: Морская техника и технология. — 2016. — № 2. — С. 7–14.

REFERENCES

1. Golikov, V. V. "Sistemnyi podkhod k probleme bezopasnogo upravleniya sudnom." *Sudovozhdenie* 17 (2009): 18–25.
2. Kureichik, Victor Michylovich. "Features of decision making support system design." *Izvestiya SFedU. Engineering sciences* 7(132) (2012): 92–98.
3. Tsoukanov, Michael, and Ludmila Boeva. "Multiagent system of decision support for operational control and technological coordination of distributed manufacture with complex structure." *Large-scale Systems Control* 39 (2012): 254–263.
4. Ben, A. P., I. V. Palamartshuk, and L. A. Pivovarov. "Decision Support System for Planning the Navigator's of Transoceanic Passage." *Iskusstvennyi intellekt* 4(62) (2013): 266–272.
5. Lingaitis, L. P., S. Mjamlin, D. Baranovsky, and V. Jastremskas. "Prediction methodology of durability of locomotives diesel engines." *Eksploatacja i Niezawodnosc* 14.2 (2012): 154–159.
6. Lingaitis, L. P., S. Mjamlin, D. Baranovsky, and V. Jastremskas. "Experimental Investigations on Operational Reliability of Diesel Locomotives Engines." *Eksploatacja i Niezawodnosc* 14.1 (2012): 6–11.
7. Baranovsky, D. M. "Definition of a residual resource of tribosystems." *Problems of Tribology* 4(54) (2009): 127–129.
8. Vagushchenko, L. L., A. L. Vagushchenko, and S. I. Zaichko. *Bortovye avtomatizirovannye sistemy kontrolya morekhodnosti*. Odessa: FENIKS, 2005.
9. Chkoniya, V. A., and V. I. Men'shikov. "Otsenka dostovernosti predstavleniya bazy dannykh sudovomu spetsialistu v integrirovannoi sisteme khodovogo mostika." *Vestnik Murmanskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta* 6.1 (2003): 81–86.
10. Epikhin, A. I. "The algorithms of data collecting and processing in decision support systems for gas-carrying vessels." *Vestnik Volzhskoi gosudarstvennoi akademii vodnogo transporta* 46 (2016): 189–198.
11. Epikhin, Alexey Ivanovich. "Modeling of the dynamical parameters of marine hardware for decision support systems creation of gas-carrying vessels." *Vestnik of Astrakhan State Technical University. Series: Marine Engineering and Technologies* 2 (2016): 7–14.

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРЕ

Епихин Алексей Иванович —
кандидат технических наук, доцент
ФГБОУ ВО «ГМУ имени адмирала Ф.Ф. Ушакова»
353918, Российская Федерация, г. Новороссийск,
пр. Ленина, 93
e-mail: bsmbeton@mail.ru

INFORMATION ABOUT THE AUTHOR

Epikhin, Alexey I. —
PhD, associate professor
Admiral Ushakov Maritime University
93 Prospect Lenina, Novorossiysk, 353918,
Russian Federation
e-mail: bsmbeton@mail.ru

Статья поступила в редакцию 15 мая 2017 г.
Received: May 15, 2017.

DOI: 10.21821/2309-5180-2017-9-3-489-498

METHODS OF FORECASTING AND AVOIDING RESONANCE WITH THE USE OF PIE CHARTS

A. V. Terenchuk

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

The article is aimed at improving the safety of navigation with the help of proposed by author of pie charts. Currently, the vast majority of shipwrecks occurs in a storm. Such a major naval disaster, like the death of the platform "Kolskaya", which killed 57 people, the disappearance of the trawler "Amethyst" and the ship "captain Uskov" with the crew and many other accidents occurred in storm conditions. All this suggests that currently, the issues of safety of storm navigation and preservation of seaworthiness in rough seas is extremely important.

The article discusses the use of special pie charts to determine the danger of the storm on the ship. Pie charts is calculated in advance to determine the resonance and other dangerous storm conditions that may occur to the vessel or cargo of the ship to the rolling, pitching and heaving. The article provides examples of how to avoid using data from charts for the solution of navigation problems that can arise when the divergence of vessels in narrow waters.

Practical implementation of the results of the present work on the LNG carrier «Al Takhira» shows that with the use of pie charts gives an opportunity to increase the number of problems solved by the navigator to ensure the safety of the vessel in storm conditions, it is possible to solve the problems of avoiding resonance of rolling, pitching and vertical motion simultaneously with the solving problems with the navigation hazards.

The proposed methods use pie charts can be used to improve existing navigational devices of the vessel. Proposed in this article approach can be used to automate the decision of tasks of safety of storm navigation of all vessels.

Keywords: pie chart, solving navigation tasks, prevention of the resonance, storm.

For citation:

Terenchuk, Alexander V. "Methods of forecasting and avoiding resonance with the use of pie charts." *Vestnik Gosudarstvennogo universiteta morskogo i rechnogo flota imeni admirala S.O. Makarova* 9.3 (2017): 489–498. DOI: 10.21821/2309-5180-2017-9-3-489-498.

УДК 656.61

МЕТОДЫ ПРОГНОЗА И ИЗБЕЖАНИЯ РЕЗОНАНСА С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ КРУГОВЫХ ДИАГРАММ

А. В. Теренчук

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

Статья направлена на повышение безопасности движения судов с использованием предложенных автором круговых диаграмм. В настоящее время абсолютное большинство аварий судов происходит в условиях штормового плавания. Такие крупные морские катастрофы, как гибель платформы «Кольская», в результате которой погибли 57 человек, исчезновение со всем экипажем траулера «Аметист» и сухогруза «Капитан Усков», а также многие другие аварии произошли в условиях штормового плавания. Все это свидетельствует о том, что в настоящий момент вопросы безопасности штормового плавания и сохранения мореходных качеств в условиях шторма чрезвычайно актуальны.

В статье рассматривается использование специальных круговых диаграмм для определения опасностей шторма для судна. Данные диаграммы заранее рассчитываются для определения резонанса и других опасных условий штормового плавания, которые могут возникать для судна или груза судна при бортовой, килевой и вертикальной качке. В статье приводятся примеры, позволяющие избежать аварий с использованием данных диаграмм, с одновременным решением навигационных задач, которые могут возникать при расхождении судов в узкостях.

Практическое внедрение результатов настоящей работы на газозове «Al Takhira» показывает, что с использованием круговых диаграмм появляется возможность увеличить количество задач, решая-

емых судоводителем для обеспечения безопасности судна в условиях штормового плавания, появляется возможность решения задач во избежание резонанса по бортовой, а также килевой и вертикальной качке одновременно с решением задач расхождения с навигационными опасностями и / или встречными судами. Предлагаемые в статье методы использования круговых диаграмм могут быть также использованы для совершенствования существующих навигационных приборов судна. Предложенный в данной статье подход может быть использован при автоматизации решения задач безопасности штормового плавания всех судов.

Ключевые слова: круговые диаграммы, решение навигационных задач, предотвращение резонанса, шторм.

Для цитирования:

Теренчук А. В. Методы прогноза и избежания резонанса с использованием круговых диаграмм / А. В. Теренчук // Вестник Государственного университета морского и речного флота имени адмирала С. О. Макарова. — 2017. — Т. 9. — № 3. — С. 489–498. DOI: 10.21821/2309-5180-2017-9-3-489-498.

Введение (Introduction)

Задача обеспечения безопасности в условиях шторма всегда была одной из наиболее важных для мирового судоходства. По данным международной морской организации ИМО более 70 % всех аварий судов, приведших к их гибели, произошли в условиях штормового моря. С самого раннего развития судоходства и теории судна как науки лучшие специалисты посвящали свои труды вопросам обеспечения безопасности судна в условиях взволнованного моря.

В настоящее время абсолютное большинство аварий судов происходит в условиях штормового плавания. Такие крупные морские катастрофы, как гибель платформы «Кольская», в результате которой погибли 57 человек, исчезновение со всем экипажем траулера «Аметист» и сухогруза «Капитан Усков», а также многие другие аварии произошли в условиях штормового плавания. Все это свидетельствует о том, что в настоящее время вопросы безопасности штормового плавания и сохранения мореходных качеств в условиях шторма чрезвычайно актуальны [1], [2], [3] – [5]. Особую опасность для судна представляет развитие штормовых явлений в условиях узкостей, при наличии встречных и попутных судов. Вопросы обеспечения безопасности судов в узкостях проанализированы в работах [6] – [9]. Однако вопросы штормового плавания в них не рассматривались.

В Советском Союзе вопросам безопасности штормового плавания судов уделялось значительное внимание. Были разработаны специальные штормовые диаграммы Ю. В. Ремеза, Д. В. Кондрикова, В. Б. Липиса, а также рекомендации по плаванию судов в условиях шторма: РОБПС-84, РД 31.00.57.1-88 («Выбор безопасных скоростей и курсовых углов при штормовом плавании судна на попутном волнении») и др. К сожалению, большинство из указанных рекомендаций либо не были использованы на мировом флоте, либо остались на уровне российских национальных требований. Кроме того, данные диаграммы не были предназначены для решения навигационных задач и не могли включаться в навигационные приборы судна.

Современное судоходство, подпадающее под международные требования, сформулированные в Конвенции по охране человеческой жизни на море (СОЛАС-74), носит международный характер и определяется требованиями ИМО. На современных судах появились и стали обязательными для применения новые виды навигационной техники, такие как ЭКНИС, САРП, АИС и др. В этих навигационных приборах совмещается решение многих видов задач, связанных с прогнозированием и обеспечением безопасности перехода судна. Однако решение многих задач обеспечения безопасности штормового плавания при прогнозировании перехода судна и расхождении со штормом совместно с решением навигационных задач до сих пор остается на прежнем уровне.

Методы и материалы (Methods and Materials)

Ранее автором предлагалось использовать в целях обеспечения безопасности штормового плавания специально рассчитанные круговые диаграммы, которые могут быть использованы в различных условиях плавания [10] – [12]. В настоящей статье предлагаются практические методы применения предложенных круговых диаграмм во избежание резонанса по бортовой, килевой и вертикальной качке.

Метод прогноза и избегания резонанса по бортовой качке при помощи круговых диаграмм. Применение данного метода может быть разделено на следующие этапы. 1-й этап — с использованием предварительной прокладки (Passage Plan) с учетом предстоящего прогноза погоды определяется опасность возникновения бортовой качки судна в условия штормовой погоды на предстоящем переходе судна смотри [10] – [12]. 2-й этап — с использованием прогноза погоды на переход судна определяется прогнозируемая высота волнения предстоящего шторма. 3-й этап — для данной высоты волны и предполагаемой скорости движения судна рассчитывается круговая диаграмма для данного судна и предстоящего шторма в соответствии с материалами публикаций [10] – [12]. 4-й этап — с учетом предстоящего курса судна и направления волнения определяется курсовой угол волны предстоящего шторма. 5-й этап — с использованием рассчитанной круговой диаграммы определяется, попадает ли данный курсовой угол волнения (КУВ) в опасную зону на круговой диаграмме (рис. 1). В случае попадания КУВ в опасную зону с использованием круговой диаграммы определяется необходимое изменение курса судна для «выхода» КУВ из зоны резонанса, как это показано на рис. 2.

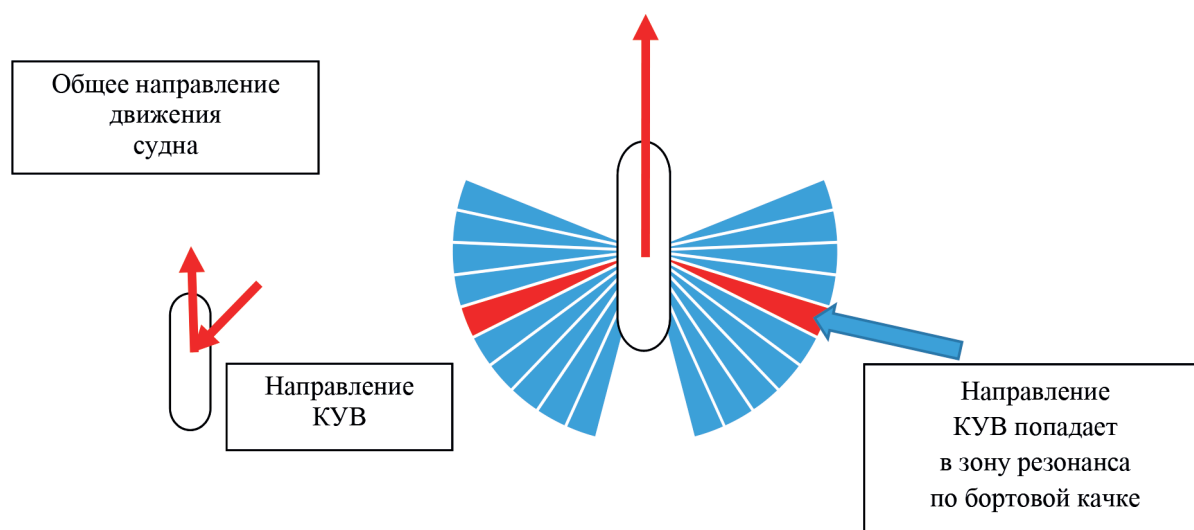


Рис. 1. Круговая диаграмма резонансных зон по бортовой качке судна при данной скорости судна

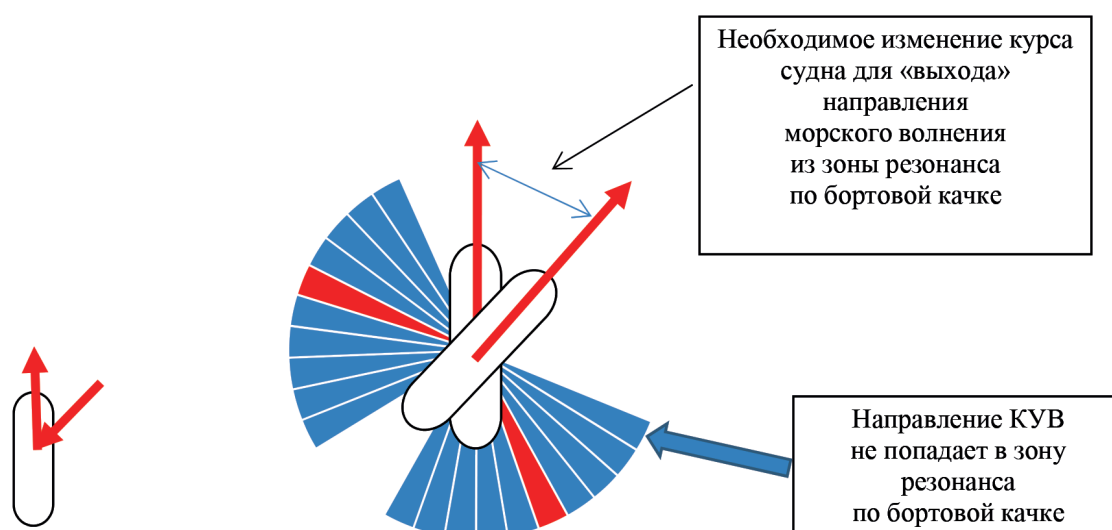


Рис. 2. Изменение курса с использованием круговой диаграммы резонансных зон по бортовой качке судна для «выхода» из зоны резонанса

С использованием результатов, полученных с помощью круговой диаграммы, судоводитель выбирает необходимое изменение курса с учетом конкретной навигационной обстановки.

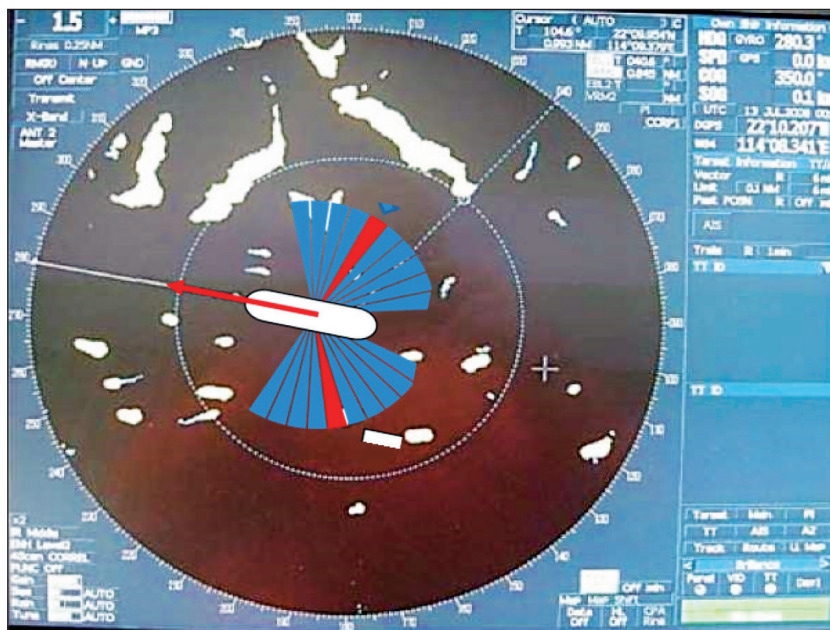


Рис. 3. Решение задачи изменения курса с использованием круговой диаграммы резонансных зон по бортовой качке судна при помощи кальки с круговой диаграммой, наложенной на экран РЛС

Пример использования круговой диаграммы резонансных зон по бортовой качке и РЛС приведен на рис. 3. Для решения задачи расхождения с опасностями судоводителем учитываются данные рассчитанной круговой диаграммы в виде прозрачной кальки, наложенной на центр экрана РЛС. Курсовой угол волнения определяется также визуально по характерным отметкам на экране РЛС. Этот способ был применен и внедрен на судне-газовозе «Al Takhira».

В случае, если навигационная обстановка и / или окружающие суда позволяют изменить курс для выхода судна из опасной зоны в соответствии с решением по круговой диаграмме, рассматривается вариант расхождения со штормом в соответствии с рекомендациями [10] – [12] и рис. 2 и 3. С включением данного метода в состав аппаратуры ЭКНИС, РЛС, САРАП и других перспективных навигационных приборов данная задача может решаться в автоматическом режиме.

Метод прогноза и избежания резонанса по килевой качке при помощи круговых диаграмм. Применение данного метода также может быть разделено на следующие этапы. 1-й этап — с использованием предварительной прокладки (Passage Plan) с учетом предстоящего прогноза погоды определяется опасность возникновения килевой качки судна в условиях штормовой погоды на предстоящем переходе судна. 2-й этап — с использованием прогноза погоды на переход судна определяется прогнозируемая высота волнения предстоящего шторма. 3-й этап — для данной высоты волны и предполагаемой скорости движения судна рассчитывается круговая диаграмма для данного судна и предстоящего шторма в соответствии с материалами [10] – [12]. 4-й этап — с учетом предстоящего курса судна и направления волнения определяется КУВ предстоящего шторма. 5-й этап — с использованием рассчитанной круговой диаграммы определяется, попадает ли данный КУВ в опасную зону на круговой диаграмме (рис. 4). В случае попадания его в опасную зону с использованием круговой диаграммы определяется необходимое изменение курса судна для «выхода» КУВ из опасной зоны, как это показано на рис. 5.

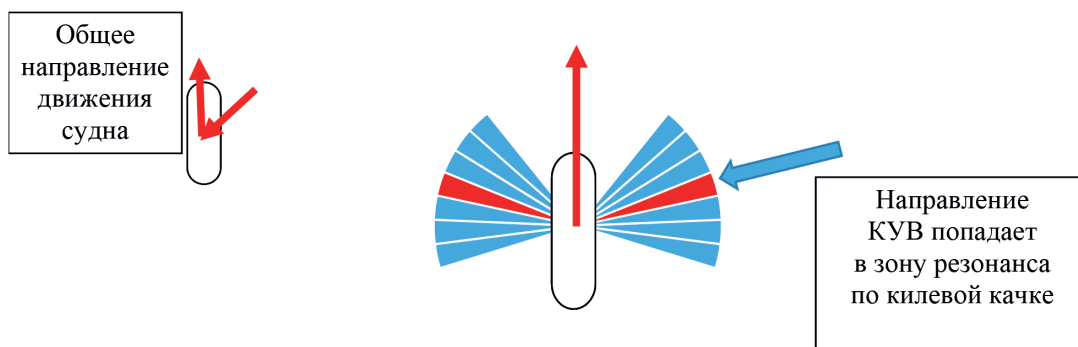


Рис. 4. Круговая диаграмма резонансных зон по килевой качке судна при данной скорости судна

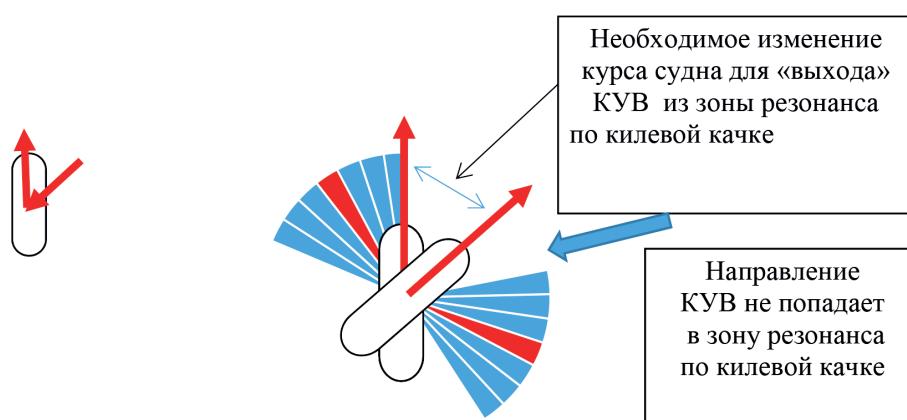


Рис. 5. Изменение курса с использованием круговой диаграммы резонансных зон по килевой качке судна

С использованием результатов, полученных с помощью круговой диаграммы, судоводитель выбирает необходимое изменение курса с учетом конкретной навигационной обстановки. Пример использования круговой диаграммы резонансных зон по килевой качке и РЛС приведен на рис. 6.



Рис. 6. Решение задачи изменения курса с использованием круговой диаграммы резонансных зон по килевой качке судна при помощи кальки с круговой диаграммой, наложенной на экран РЛС

Для решения задачи расхождения с опасностями учитываются данные заранее рассчитанной круговой диаграммы в виде прозрачной кальки, наложенной на центр экрана РЛС. КУВ определяется также визуально по характерным отметкам на экране РЛС. Этот способ был применен и внедрен на судне-газовозе «Al Takhira».

В случае, если навигационная обстановка и / или отсутствие опасного сближения с другими судами позволяют изменить курс для выхода судна из опасной зоны в соответствии с решением по круговой диаграмме, рассматривается вариант расхождения со штормом в соответствии с рекомендациями, приведенными в публикациях [10] – [12] и на рис. 5 и 6. С включением рассмотренного метода в состав аппаратуры ЭКНИС и других перспективных навигационных приборов данная задача может решаться в автоматическом режиме.

Метод прогноза и избегания резонанса по вертикальной качке при помощи круговых диаграмм. Применение данного метода может быть также разделено на следующие этапы. 1-й этап — с использованием предварительной прокладки (Passage Plan), с учетом предстоящего прогноза погоды, определяется опасность возникновения вертикальной качки судна в условиях штормовой погоды на предстоящем переходе судна. 2-й этап — с использованием прогноза погоды на переход судна определяется прогнозируемая высота волнения предстоящего шторма. 3-й этап — для данной высоты волны и предполагаемой скорости движения судна рассчитывается круговая диаграмма для данного судна и предстоящего шторма в соответствии с материалами [10] – [12]. 4-й этап — с учетом предстоящего курса судна и направления волнения определяется курсовой угол волны предстоящего шторма [10] – [12]. 5-й этап — с использованием рассчитанной круговой диаграммы определяется, попадает ли данный курсовой угол волнения в опасную зону на круговой диаграмме (рис. 7). В случае попадания курсового угла волнения в опасную зону с использованием круговой диаграммы определяется необходимое изменение курса судна для «выхода» курсового угла волнения из опасной зоны, как это показано на рис. 8.

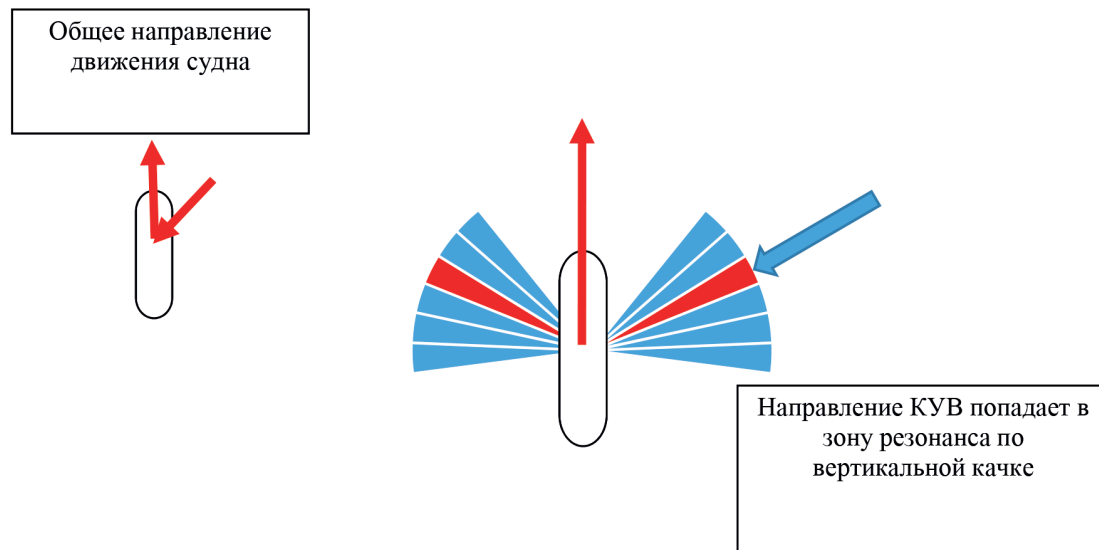


Рис. 7. Круговая диаграмма резонансных зон по вертикальной качке судна при данной скорости судна

С использованием результатов, полученных с помощью круговой диаграммы, судоводитель выбирает необходимое изменение курса с учетом конкретной навигационной обстановки.

Пример использования круговой диаграммы резонансных зон по вертикальной качке и РЛС приведен на рис. 9. Для решения задачи расхождения с опасностями учитываются данные рассчитанной круговой диаграммы в виде прозрачной кальки, наложенной на центр экрана РЛС. КУВ определяется визуально и по характерным отметкам на экране РЛС. Этот способ был применен и внедрен на судне-газовозе «Al Takhira».

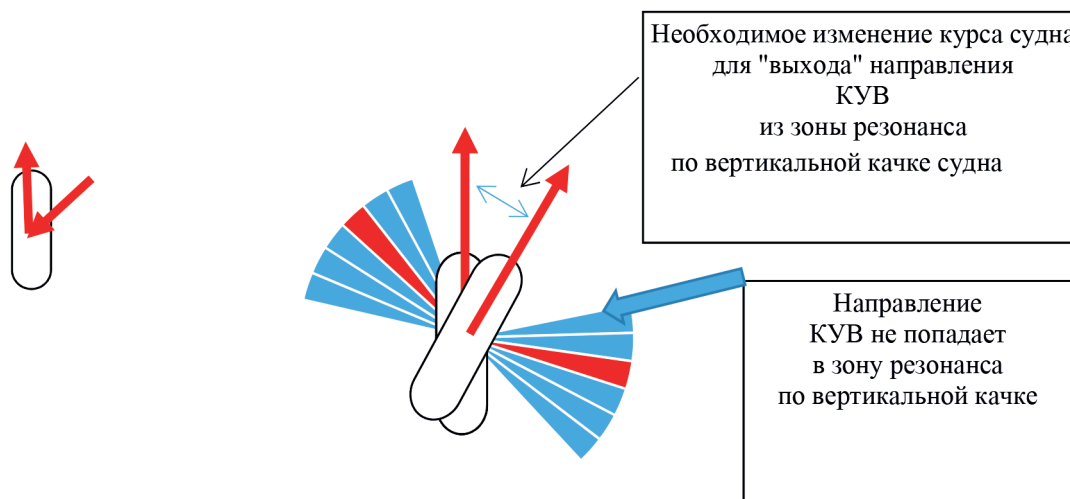


Рис. 8. Изменение курса с использованием круговой диаграммы резонансных зон по вертикальной качке судна

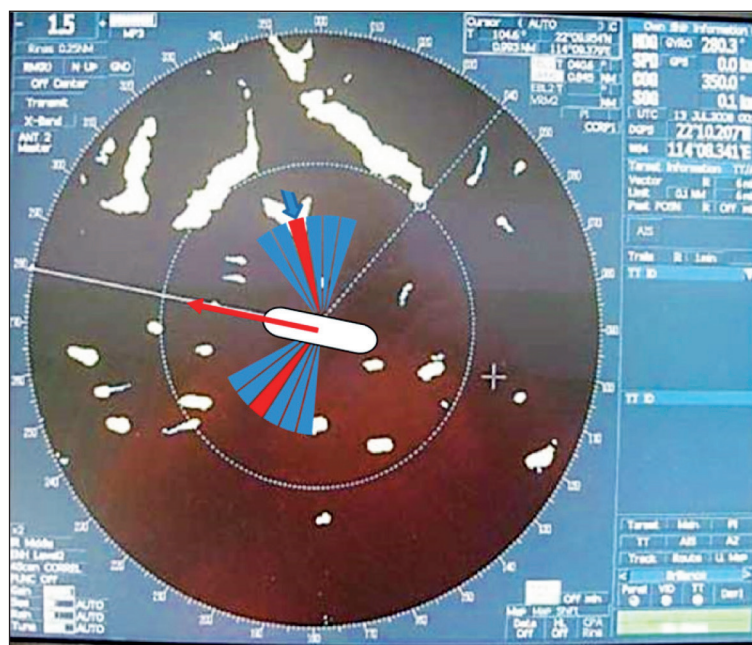


Рис. 9. Решение задачи изменения курса с использованием круговой диаграммы резонансных зон по вертикальной качке судна при помощи кальки с круговой диаграммой, наложенной на экран РЛС

В случае, если навигационная обстановка и / или отсутствие опасных для сближения встречных и попутных судов позволяют изменить курс для выхода судна из опасной зоны, в соответствии с решением по круговой диаграмме рассматривается вариант расхождения со штормом в соответствии с данными, приведенными на рис. 7 – 9. С включением данного метода в состав аппаратуры ЭКНИС, РЛС, САРП и других перспективных навигационных приборов данная задача может решаться в автоматическом режиме.

В соответствии с вышеуказанным подходом были получены и другие методы прогноза и предотвращения опасных условий штормового плавания на попутном волнении, а также методы обеспечения безопасности палубного груза при плавании в условиях шторма с использованием круговых диаграмм, рассчитываемых в соответствии с [10] – [12].

Результаты (Results)

Как показал анализ результатов практического внедрения методов прогноза и предотвращения опасных условий штормового плавания с использованием круговых диаграмм на судне-газовозе «Al Takhira», повышение экономической эффективности за счет практического внедрения результатов диссертации на современных судах может быть достигнуто за счет следующих факторов. В настоящее время до 70 % аварий, связанных с гибелью судов, происходит в штормовых условиях. По имеющимся оценкам, до 50 % аварий в шторм связаны с опасностями штормового плавания, на снижение и избежание которых направлена данная работа (попадание в резонанс по бортовой, килевой, вертикальной качке и др.). Как показывают результаты внедрения круговых диаграмм в работу танкера-газовоза «Al Thakhira», применение предложенных круговых диаграмм и других методов избежания опасностей штормового плавания позволяет снизить или избежать большое количество этих аварий (по оценке автора, на 80 %). Это даст возможность предотвратить гибель десятков, а, возможно, и сотен людей, сохранить десятки судов, которые ежегодно гибнут в шторм, а также сэкономить значительные средства для судоходных компаний и других организаций морской индустрии.

Другие количественные показатели эффективности использования круговых диаграмм на основе анализа результатов практического внедрения методов прогноза и избежания опасных условий штормового плавания с использованием круговых диаграмм на судне-газовозе «Al Thakhira» позволяют сделать следующие выводы.

1. С использованием круговых диаграмм появляется возможность увеличить количество задач, решаемых судоводителем для обеспечения безопасности судна в условиях штормового плавания, предоставляется возможность решения задач избежания резонанса по бортовой, килевой, вертикальной качке одновременно с решением задач расхождения с навигационными опасностями и / или встречными судами.
2. Снижается время принятия решения (до 2 мин) о выборе безопасного маневра по расхождению с навигационными опасностями, встречными судами с учетом опасностей штормового плавания.
3. Снижается возможность попадания судна в резонанс по бортовой, килевой и вертикальной качке. В течение времени использования и внедрения круговых диаграмм на газовозе «Al Takhira» не было ни одного случая попадания в условия резонанса по бортовой, килевой и вертикальной качке.
4. Снижается возможность потери палубного груза за счет методик, предложенных в настоящей статье. В течение времени использования для внедрения круговых диаграмм на газовозе «Al Takhira» не было ни одного случая потери палубного груза (элементов судового оборудования и судового снабжения, расположенных на палубе) в условиях резонанса по бортовой, килевой и вертикальной качке.

Выводы

1. С использованием круговых диаграмм появляется возможность увеличения количества задач, решаемых судоводителем для обеспечения безопасности судна в условиях штормового плавания, а также возможность решения задач, позволяющих избежать резонанса по бортовой, килевой и вертикальной качке одновременно с решением задач расхождения с навигационными опасностями и / или встречными судами, в том числе в узкостях.
2. При использовании круговых диаграмм снижается время принятия решения о выборе безопасного маневра по расхождению с навигационными опасностями, встречными судами с учетом опасностей штормового плавания.
3. С включением данного метода в состав аппаратуры ЭКНИС и других перспективных навигационных приборов данная задача может решаться в автоматическом режиме.
4. На основании материалов настоящей статьи может быть сделан также вывод о том, что использование круговых диаграмм по различным видам качки является перспективным направле-

нием развития современной навигационной аппаратуры и может уже в настоящее время использоваться на всех судах.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *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.
2. *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.
3. *Некрасов С. Н.* Вычисление гарантированного курса расхождения при опасности сближения вплотную / С. Н. Некрасов, Д. В. Трененков, К. И. Ефимов // Вестник Государственного университета морского и речного флота имени адмирала С. О. Макарова. — 2015. — № 1 (29). — С. 1–15.
4. *Kato H.* Approximate methods of calculating the period of roll of ships / H. Kato // Journal of Zosen Kiokai. — 1956. — Vol. 1956. — No. 89. — Pp. 59–64. DOI: 10.2534/jjasnaoe1952.1956.89_59.
5. *Newman J. N.* The exciting forces on a moving body in waves / J. N. Newman // Journal of Ship Research. — 1965. — Vol. 9. — No. 3. — Pp. 190–199.
6. *Некрасов С. Н.* Макрокогнитивное моделирование процессов судовождения / С. Н. Некрасов, И. В. Капустин, М. С. Старов // Вестник Государственного университета морского и речного флота имени адмирала С. О. Макарова. — 2013. — № 1 (20). — С. 82–85.
7. *Кондратьев С. И.* Полифакторный анализ процесса предупреждения столкновений судов / С. И. Кондратьев, А. Л. Боран-Кешишьян // Вестник Государственного университета морского и речного флота имени адмирала С. О. Макарова. — 2013. — № 2 (21). — С. 7–13.
8. *Некрасов С. Н.* Определение навигационных рисков при имитационном моделировании управления судном при проходе узкости / С. Н. Некрасов, К. И. Ефимов, Д. В. Трененков // Вестник Государственного университета морского и речного флота имени адмирала С. О. Макарова. — 2014. — № 1 (23). — С. 34–36.
9. *Бурмака И. А.* Управление группой судов в ситуации опасного сближения / И. А. Бурмака, А. Ю. Булаков // Вестник Государственного университета морского и речного флота имени адмирала С. О. Макарова. — 2014. — № 6 (28). — С. 1–13.
10. *Ершов А. А.* Совершенствование методов обеспечения безопасности штормового плавания судов / А. А. Ершов, А. В. Теренчук // Вестник Астраханского государственного технического университета. Серия: Морская техника и технология. — 2015. — № 3. — С. 7–13.
11. *Ершов А. А.* Безопасность штормового плавания судна / А. А. Ершов, А. В. Теренчук // Научно-технический вестник Поволжья. — 2015. — № 3. — С. 129–131.
12. *Ершов А. А.* Способы автоматизации штормового плавания судна / А. А. Ершов, А. В. Теренчук // Научно-технический вестник Поволжья. — 2015. — № 4. — С. 62–64.

REFERENCES

1. Ershov, A. A. *Ot «Titanika» do «Costa Concordia» neispolzovannye vozmozhnosti dlja spa-senija: monografija*. Saarbrücken, Deutschland: LAP LAMBERT Academic Publishing, 2013.
2. Ershov, A. A., and V. I. Nikolskij. *Nekotorye avarii i katastrofy otechestvennyh i inostrannyh sudov: monografija*. SPb.: GUMRF im. adm. S. O. Makarova, 2013.
3. Nekrasov, S. N., D. V. Trenenkov, and K. I. Efimov. “Calculation of the guaranteed passing course at the danger of the close-quarters situation.” *Vestnik Gosudarstvennogo universiteta morskogo i rechnogo flota imeni admirala S.O. Makarova* 1(29) (2015): 1–15.
4. Kato, Hiroshi. “Approximate methods of calculating the period of roll of ships.” *Journal of Zosen Kiokai* 1956.89 (1956): 59–64. DOI: 10.2534/jjasnaoe1952.1956.89_59.
5. Newman, J. N. “The exciting forces on a moving body in waves.” *Journal of Ship Research* 9.3 (1965): 190–199.
6. Nekrasov, S. N., I. V. Kapustin, and M. S. Starov. “Macro cognitive modeling of navigational processes.” *Vestnik Gosudarstvennogo universiteta morskogo i rechnogo flota imeni admirala S.O. Makarova* 1(20) (2013): 82–85.

7. Kondrat'ev, S. I., and A. L. Boran-Keshish'yan. "Multifactorial analysis of ships collision prevention process." *Vestnik Gosudarstvennogo universiteta morskogo i rechnogo flota imeni admiral S.O. Makarova* 2(21) (2013): 7–13.
8. Nekrasov, S. N., K. I. Efimov, and D. V. Trenenkov. "Navigational risks calculation when modeling of sailing through the narrows." *Vestnik Gosudarstvennogo universiteta morskogo i rechnogo flota imeni admiral S.O. Makarova* 1(23) (2014): 34–36.
9. Burmaka, I. A., and A. Yu. Bulgakov. "Management of the group of vessel in the situation of dangerous approach." *Vestnik Gosudarstvennogo universiteta morskogo i rechnogo flota imeni admiral S.O. Makarova* 6(28) (2014): 1–13.
10. Ershov, Andrey Aleksandrovich, and Alexander Vladimirovich Terenchuk. "Improvement of the methods of ensuring safety of storm navigation of the ships." *Vestnik of Astrakhan State Technical University. Series: Marine Engineering and Technologies* 3 (2015): 7–13.
11. Ershov, A. A., and A. V. Terenchuk. "Safety of storm navigation of the vessels." *Scientific and Technical Volga region Bulletin* 3 (2015): 129–131.
12. Ershov, A. A., and A. V. Terenchuk. "Ways to automate storm navigation of the vessel." *Scientific and Technical Volga region Bulletin* 4 (2015): 62–64.

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРЕ

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

INFORMATION ABOUT THE AUTHOR

Terenchuk, Alexander V. — Postgraduate
Supervisor:
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

Статья поступила в редакцию 15 мая 2017 г.
Received: May 15, 2017.

DOI: 10.21821/2309-5180-2017-9-3-499-505

ADVANCES IN METHOD OF LOADING PACKAGED GOODS ON VESSEL'S DECK

T. E. Malikova, N. M. Anosov, A. Yu. Strelkov

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

The paper covers the issues of safe sea transportation of packaged goods on vessel's deck. A focal point of «technological operations in port when doing loading and discharge» in the supply chain of goods (sawn timber) has been scrutinized. Some drawbacks in carrying out these technological operations, affecting the ship's operational safety have been revealed. One of the said drawbacks is liability to the package structural model destruction, i.e. destruction of its rectangular section when the tightness of band-type ties is not sufficient for retaining the desired geometrical shape. In this situation when lifting on ship's deck there's a possibility of sawn timber shifting inside the package and consequent irregularity of the rectangular shape of the latter. When doing cargo work in ports it isn't uncommon to have two unconsolidated packages loaded simultaneously, which can also cause sawn timber shifting within each of the unit loads. A package rectangular shape irregularity affects the density of stowage of goods in the deck stow. While working out a method for goods fixing inside a package a research has been done using theoretical models of shifting goods featuring discontinuous cribbing and cribbing-free structures. As an outcome a new method for securing the goods in packages preventing deformation of the package rectangular section when handled in port has been proposed. The proposed securing design would make it possible to form larger unit loads made of two packages thus solving the problem of packages' shifting relative to each other when carrying out slinging and lifting goods on deck operations, and reducing the time consumed by cargo operations in port, and eliminating a considerable amount of hard physical labor when forming a deck stow.

Keywords: technology, packaged goods, shifting control, operational safety, sea transportation.

For citation:

Malikova, Tatiana E., Nikolay M. Anosov, and Alexei Yu. Strelkov. "Advances in method of loading packaged goods on vessel's deck." *Vestnik Gosudarstvennogo universiteta morskogo i rechnogo flota imeni admirala S.O. Makarova* 9.3 (2017): 499–505. DOI: 10.21821/2309-5180-2017-9-3-499-505.

УДК 656.073:656.61

СОВЕРШЕНСТВОВАНИЕ СПОСОБА ПОГРУЗКИ ПАКЕТИРОВАННЫХ ГРУЗОВ НА ПАЛУБУ СУДНА

Т. Е. Маликова, Н. М. Аносов, А. Ю. Стрелков

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

Работа посвящена вопросам безопасной транспортировки пакетированных грузов на палубе судна. Рассмотрено фокусное звено «технологические операции в порту при погрузо-разгрузочных работах» в цепи поставки товаров (пиломатериалов). Выявлены недостатки при выполнении данных технологических операций, оказывающие влияние на технологическую безопасность судна. Одним из недостатков является склонность к разрушению структурной модели пакета, т. е. его прямоугольного сечения, когда степень натяжения ленточных обвязок недостаточна для сохранения требуемой геометрической формы. В этом случае при подъеме на палубу судна возможно смещение пиломатериала внутри пакета и, соответственно, нарушение прямоугольного сечения последнего. При грузовых работах в порту часто осуществляется погрузка на судно сразу двух незакрепленных между собой пакетов, что также может вызвать смещение пиломатериала внутри каждой из грузовых единиц. Нарушение прямоугольной формы пакета влияет на плотность укладки груза в палубном караване. При разработке способа фиксации груза в пакете исследования выполнялись с применением теоретических моделей смещающихся грузов с дискретной распорной и безраспорной структурой. В результате был предложен новый способ фиксации груза в пакетах, предотвращающий деформацию прямоугольного сечения пакета при выполнении грузовых работ в порту.

Предлагаемая схема крепления позволяет формировать укрупненные грузовые единицы из двух пакетов, что решает проблему смещения пакетов относительно друг друга при выполнении операций застропки и подъема на палубу груза, сокращает время проведения грузовых операций в порту, исключает значительный объем физического труда при формировании палубного каравана.

Ключевые слова: технология, пакетированные грузы, регулирование смещаемости, эксплуатационная безопасность, морские перевозки.

Для цитирования:

Маликова Т. Е. Совершенствование способа погрузки пакетированных грузов на палубу судна / Т. Е. Маликова, Н. М. Аносов, А. Ю. Стрелков // Вестник Государственного университета морского и речного флота имени адмирала С. О. Макарова. — 2017. — Т. 9. — № 3. — С. 499–505. DOI: 10.21821/2309-5180-2017-9-3-499-505.

Введение (Introduction)

Размещение и крепление груза, склонного к смещению на палубе судна, требует особого внимания как в отношении способа крепления, так и в отношении используемого для этого оборудования. Большинство известных способов фиксации грузов имеют ряд недостатков, таких как надежность и трудоемкость крепления, значительное увеличение времени погрузки судна в порту, необходимость проверки креплений во время рейса и особенно в штормовых условиях плавания [1]. Таким образом, вопросы обеспечения технологической безопасности судов [2] – [4], перевозящих смещающиеся грузы, постоянно находятся в поле зрения специалистов, разрабатывающих новые технологии [5] – [7] и средства [8] крепления грузов.

В качестве объекта исследования в статье рассматриваются пакетированные грузы (пиломатериалы), перевозимые на палубе судна. Выбор данного рода груза, склонного к смещению, объясняется тем, что на долю России приходится более трети всего мирового экспорта леса и около половины из общего объема доставляется до потребителей морским и речным транспортом [9], [10]. Наиболее выгодно продавать товары лесопромышленного комплекса глубокой переработки в виде пакетных поставок, повышающих производительность труда и снижающих транспортные расходы в цепи поставки товаров.

Основными торговыми партнерами приморских лесопромышленников являются страны Азиатско-Тихоокеанского региона: Китай, Республика Корея и Япония. При этом Китай занимает лидирующее положение на данном сегменте рынка. Как основной внешнеэкономический партнер России в структуре экспортно-импортных торговых операций эта страна готова покупать древесину любого сорта и в больших количествах. Данное обстоятельство объясняется ростом китайской экономики и малыми объемами собственных природных ресурсов, доступных для использования.

С введением в 2009 г. высоких ставок таможенных пошлин и количественных ограничений на вывоз необработанной древесины изменилась товарная структура экспорта последней. Данный вид товара экспортировать стало невыгодно и потоки необработанной древесины, доставляемые морским транспортом в Китай, резко сократились, а объемы поставок пиломатериалов в пакетах резко возросли. При этом лишь малая часть грузопотока перевозится в контейнерах (около 10 % от всего объема), основная масса перевозится как палубный груз.

Одной из проблем перевозки пакетированных грузов является склонность к разрушению структурной модели пакета, т. е. его прямоугольного сечения, уже на этапе погрузки на палубу судна. Нарушение прямоугольной формы влияет на плотность укладки пакетов в палубном караване и, как следствие, приводит к неконтролируемому сбросу груза в море при качке судна на волнении, что подтверждается анализом аварийных ситуаций с судами, перевозящими лесные палубные грузы [11].

Следует отметить, что при грузовых работах часто осуществляется застропка и подъем на палубу одновременно сразу двух незакрепленных между собой пакетов, что также может вызвать смещение пиломатериала внутри каждой из грузовых единиц.

Методы и материалы (Methods and Materials)

Процесс разрушения структурной модели пакета можно описать с помощью теоретической модели смещающихся грузов с дискретной распорной структурой, представленной в статье [12]. В ходе исследования различных дискретных структур с использованием математического моделирования [13], [14] было установлено, что при произвольных внешних воздействиях свойством сохранять прямоугольное сечение при укладке груза обладает в большей степени теоретическая модель с дискретной безраспорной структурой [15].

Отличие безраспорной дискретной структуры от распорной состоит в том, что распределение усилий в массиве груза от элемента к элементу происходит через плоскостные контакты, при этом внутри массива груза не возникает распора, за счет которого происходит раздвигание элементов нижележащего ряда и внедрение элементов верхнего ряда в нижерасположенный ряд. Таким образом, для решения данной проблемы необходимо заменить структуру груза внутри пакета, обладающую распорными свойствами, на структуру со свойствами дискретной безраспорной среды, т. е. выполнить укладку пиломатериала внутри пакета так, чтобы внутри массива не возникало распора. Добиться желаемого результата можно с помощью специальных фиксирующих башмаков, которые располагаются по четырем углам каждого из сформированных пакетов. Роль башмаков состоит в формировании и фиксации пакетов с использованием крепежных лент, что исключает смещение пиломатериалов внутри пакета при погрузке на судно.

Кроме того, предлагаемые крепежные устройства могут быть использованы для создания из двух отдельных пакетов укрупненных грузовых единиц (блок-пакетов), что решает проблему смещения пакетов относительно друг друга при выполнении операций застропки и подъема на палубу груза. Перспективность использования блок-пакетов при доставке грузов обоснована в статье [16, с. 3], следующим образом: «...транспортная составляющая в цене товаров лесопромышленного комплекса достигает 55 %, что отрицательно сказывается на рентабельности экспорта. Пакетные и блок-пакетные поставки товаров лесопромышленного комплекса являются эффективным путем повышения производительности труда и снижения транспортных расходов». В результате проведенного исследования авторы делают вывод о необходимости возрождения блок-пакетных технологий в лесопромышленном комплексе. Исходя из этого возникает необходимость в разработке новых способов крепления палубного каравана с учетом применения укрупненных грузовых единиц (блок-пакетов) в транспортных поставках.

Техническое решение (Technical Solution)

Предлагается формировать блок-пакеты с использованием фиксирующих башмаков (рис. 1, а) и сдвоенных фиксирующих башмаков (рис. 1, б), а также крепежных лент, следующим образом.

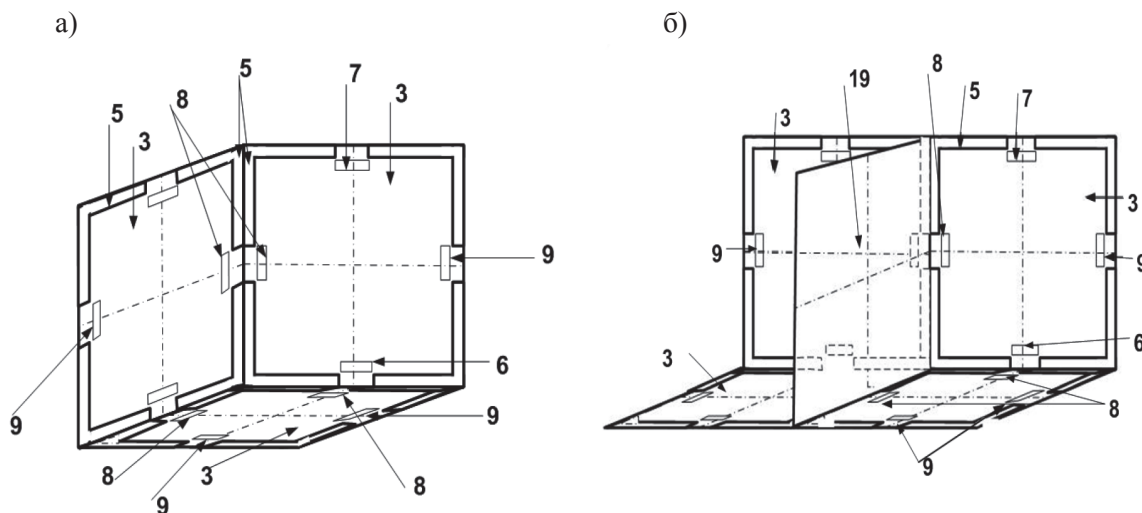


Рис. 1. Фиксирующие башмаки: а — одинарный; б — сдвоенный

На отдельной площадке устанавливают два пакета на сепарационный материал вплотную друг к другу (рис. 2). Стороны прилегания двух пакетов фиксируют внизу с обоих внутренних углов сдвоенными фиксирующими башмаками 18 так, чтобы внутренние углы пакетов вплотную прилегали к их стенкам 19 и 3. Снаружи по нижним наружным углам обоих пакетов устанавливаются одинарные фиксирующие башмаки 2 так, чтобы они также плотно прилегали к углам пакета.

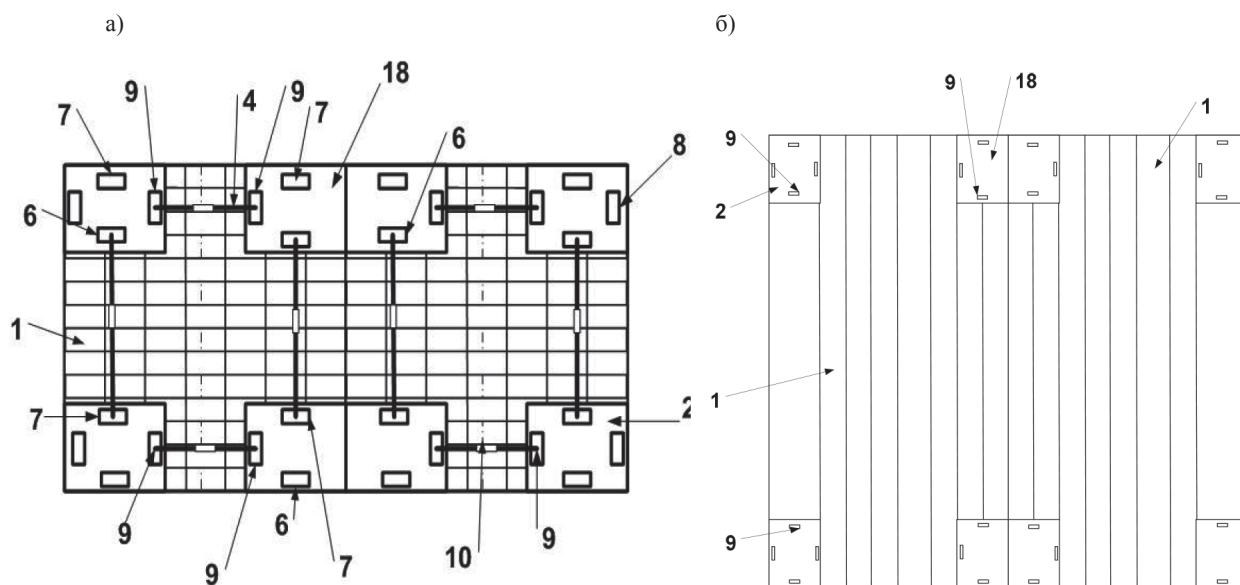


Рис. 2. Формирование блок-пакета из двух отдельных пакетов:
а — вид по ширине; б — вид по длине

В каждое внешнее сквозное крепежное окно 9 вертикальных стенок 3 каждого из двух противолежащих друг другу соседних нижних башмаков, соответственно, 2, 18 и 2, горизонтально заводят крепежную ленту 4 по ширине пакета (см. обе схемы рис. 2), которую также горизонтально заводят по длине пакета во внешние окна 9 вертикальных стенок 3 противолежащих друг другу нижних башмаков 2. Каждую крепежную ленту 4 скрепляют зажимом 10 втугую. Далее по верхним углам пакетов аналогично устанавливают фиксирующие башмаки 2 и сдвоенные фиксирующие башмаки 18 так, чтобы башмаки 2 и стенки 3 и 19 башмаков 18 плотно прилегали к углам пакета. Затем в каждое внешнее сквозное окно 9 вертикальных стенок 3 каждого из двух верхних противолежащих друг другу соседних башмаков, соответственно, 2, 18 и 2, горизонтально заводят крепежную ленту 4 по ширине пакета. При этом каждую крепежную ленту 4 обтягивают втугую и скрепляют зажимом 10 спецустройством. После этого (см. рис. 2, а) крепежную ленту 4 вертикально заводят в нижнее окно 6 каждого верхнего башмака, соответственно 2 и 18, и в верхнее окно 7 каждого соседнего с ним нижнего башмака, соответственно 2 и 18. Каждую крепежную ленту 4 обтягивают втугую и скрепляют зажимом 10 спецустройством. На этом формирование блок-пакета из двух отдельных пакетов заканчивают.

По завершению формирования каждого блок-пакета его грузят на транспортное средство и приступают к формированию на площадке следующего. Из образованных предварительно таким методом блок-пакетов формируют штабель на палубе судна. Способ формирования и крепления на палубе судна штабеля из блок-пакетов, сформированных по предложенному способу, изложен в [17].

Заключение (Conclusion)

В предложенном способе формирования и фиксации пакетированного груза с прямоугольным сечением используется новый подход к решению задачи регулирования смещаемости штабеля пиломатериалов на палубе судна. Предлагаемая схема крепления благодаря совокупности обтягивающих средств и фиксирующих башмаков обеспечивает надежное и безопасное крепление массива груза внутри пакета, позволяет формировать укрупненные грузовые единицы и тем самым сокращать время проведения грузовых операций в порту, исключая значительный объем нелегкого физического труда при обслуживании средств крепления в рейсе.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Маликова Т. Е. Аварийность морского флота и анализ внешних факторов, повлекших за собой аварии со смещением грузов / Т. Е. Маликова // Научные проблемы транспорта Сибири и Дальнего Востока. — 2014. — № 1-2. — С. 162–165.
2. Маликова Т. Е. Применение теории катастроф для классификации сценариев потери остойчивости судна при смещении груза / Т. Е. Маликова // Вестник Государственного университета морского и речного флота имени адмирала С. О. Макарова. — 2014. — № 3 (25). — С. 15 – 19.
3. Блехман И. И. К проблеме аварий судов со смешивающимися грузами / И. И. Блехман, И. В. Демидов, Ю. А. Семенов // Сборник трудов III Международной школы-конференции молодых ученых «Нелинейная динамика машин» School. — NDM 2016. — М.: ИМАШ РАН, 2016. — С. 28–34.
4. Маликова Т. Е. Исследование системы обеспечения технологической безопасности морских судов методами теории катастроф / Т. Е. Маликова, М. А. Москаленко // Научные проблемы транспорта Сибири и Дальнего Востока. — 2014. — № 3. — С. 94–97.
5. Маликова Т. Е. Повышение эффективности морской перевозки труб большого диаметра на палубе судна / Т. Е. Маликова, М. А. Москаленко // Вестник Государственного университета морского и речного флота имени адмирала С. О. Макарова. — 2014. — № 2 (24). — С. 100–105.
6. Маликова Т. Е. Технология обеспечения сохранной и безопасной перевозки штабеля пиломатериалов на палубе судна / Т. Е. Маликова, Н. М. Аносов // Научные проблемы транспорта Сибири и Дальнего Востока. — 2015. — № 2. — С. 117–120.
7. Овчинников М. М. Совершенствование технологии погрузки пиломатериалов в лесных портах России / М. М. Овчинников, В. В. Лёвошкин // Известия Санкт-Петербургской лесотехнической академии. — 2006. — № 177. — С. 30–35.
8. Бухарицин П. И. Устройство для предотвращения смещения грузов в трюме и сохранения плавучести судна / П. И. Бухарицин, Л. Г. Беззубиков // Современные наукоемкие технологии. — 2014. — № 3. — С. 179–180.
9. Казначеева Н. И. Повышения качества перевозок леса в судах / Н. И. Казначеева, Д. В. Акинин, В. А. Борисов, С. Б. Васильев // Sciences of Europe. — 2016. — № 5. — 2 (5). — С. 63–66.
10. Лернер В. К. Прогнозирование российских грузопотоков в направлении морских портов / В. К. Лернер, К. А. Сипаро // Бюллетень транспортной информации. — 2014. — № 1 (223). — С. 11–16.
11. Маликова Т. Е. Причинно-следственный анализ аварийности судов, перевозящих пакетированные грузы / Т. Е. Маликова, Н. М. Аносов, А. И. Филиппова // Научные проблемы транспорта Сибири и Дальнего Востока. — 2015. — № 4. — С. 86–89.
12. Маликова Т. Е. Теоретическая модель смещающихся грузов с дискретной распорной структурой / Т. Е. Маликова, А. С. Шпак // Научные проблемы транспорта Сибири и Дальнего Востока. — 2013. — № 1. — С. 142–145.
13. Маликова Т. Е. Использование теории графов при разработке математических моделей систем «смещающийся груз – спецустройство» / Т. Е. Маликова // Научные проблемы транспорта Сибири и Дальнего Востока. — 2012. — № 2. — С. 39–42.
14. Аносов Н. М. Математическая модель исследования динамики системы: «судно – укрупненная грузовая единица — штабель пиломатериала» / Н. М. Аносов, Т. Е. Маликова // Морской вестник. — 2012. — № 3. — С. 97–98.

15. Маликова Т. Е. Теоретическая модель смещающихся грузов с дискретной безраспорной структурой / Т. Е. Маликова // Научные проблемы транспорта Сибири и Дальнего Востока. — 2013. — № 2. — С. 138–140.

16. Гагарский Э. А. Возродить прогрессивные пакетные и блок — пакетные технологии доставки лесопроизводства / Э. А. Гагарский, С. А. Кириченко, А. И. Забоев // Бюллетень транспортной информации. — 2014. — № 9 (231). — С. 3–10.

17. Маликова Т. Е. Обеспечение безопасности морской перевозки груза на основе совершенствования технологии укладки и крепления штабеля / Т. Е. Маликова, Н. М. Аносов // Научные проблемы транспорта Сибири и Дальнего Востока. — 2015. — № 3. — С. 105–108.

REFERENCES

1. Malikova, T. E. "Shipping accident rate and analysis of external factors causing accidents involving cargo shifting." *Scientific problems of transportation in Siberia and the Far East* 1 — 2 (2014): 162–165.

2. Malikova, T. E. "Applying catastrophe theory to classification of scenarios of ship stability loss due to cargo shifting." *Vestnik Gosudarstvennogo universiteta morskogo i rechnogo flota imeni admirala S.O. Makarova* 3(25) (2014): 15–19.

3. Blehman, I. I., I. V. Demidov, and Ju. A. Semenov. "K probleme avarij sudov so smeshhajushimisja грузами." *Sbornik trudov III Mezhdunarodnoj Shkoly — konferencii mo — lodyh uchenyh "Nelinejnaja dinamika mashin" School — NDM 2016*. M.: IMASh RAN, 2016: 28–34.

4. Malikova, T. E., and M. A. Moskalenko. "Catastrophe theory application to the study of the system of ensuring sea — going vessels' technological safety." *Scientific problems of transportation in Siberia and the Far East* 3 (2014): 94–97.

5. Malikova, T. E., and M. A. Moskalenko. "Increasing the efficiency of deck large diameter tubes carriage by sea transport." *Vestnik Gosudarstvennogo universiteta morskogo i rechnogo flota imeni admirala S.O. Makarova* 2(24) (2014): 100–105.

6. Malikova, T. E., and N. M. Anosov. "Technology for securing safe carriage of sawn timber in stacks on ship's deck." *Scientific problems of transportation in Siberia and the Far East* 2 (2015): 117–120.

7. Ovchinnikov, M. M., and V. V. Levoshkin. "Perfection of saw — timbers loading technology in wood ports of Russia." *Izvestiya Sankt — Peterburgskoi lesotekhnicheskoi akademii* 177 (2006): 30–35.

8. Buharicin, P. I., and L. G. Bezzubikov. "Ustrojstvo dlja predotvrashhenija smeshhenija грузов v trjume i sohraneniya plavuchesti sudna." *Modern high technologies* 3 (2014): 179–180.

9. Kaznacheeva, N. I., D. V. Akinin, V. A. Borisov, and S. B. Vasiliev. "Quality improvement of timber transportation in the courts." *Sciences of Europe* 5 — 2(5) (2016): 63–66.

10. Lerner, V. K., and K. A. Siparo. "Prognostics of Russian freight traffic in direction of sea ports." *the Bulletin of Transport Information* 1(223) (2014): 0011–0016.

11. Malikova, T. E., N. M. Anosov, and A. I. Filippova. "Causal analysis of accident rate ships carrying palletized goods." *Scientific problems of transportation in Siberia and the Far East* 4 (2015): 86–89.

12. Malikova, T. E., and A. S. Shpak. "Theoretical model of shifting cargo with discrete tommying structure." *Scientific problems of transportation in Siberia and the Far East* 1 (2013): 142–145.

13. Malikova, T. E. "Using the theory of graphs in developing mathematical models of the systems «shifting cargoes — special equipment»." *Scientific problems of transportation in Siberia and the Far East* 2 (2012): 39–42.

14. Anosov, N. M., and T. E. Malikova. "Matematicheskaja model' issledovaniya dinamiki sistemy: «sudno — ukрупnennaja грузовaja edinica — shtabel' pilomateriala»." *Morskoy vestnik* 3 (2012): 97–98.

15. Malikova, T. E. "Theoretical model of shifting cargoes with discontinuous cribbing — free structure." *Scientific problems of transportation in Siberia and the Far East* 2 (2013): 138–140.

16. Gagarsky, E. A., S. A. Kirichenko, and A. I. Zabojev. "To revive the progressive package and block — package technologies of delivery of forest production." *the Bulletin of Transport Information* 9(231) (2014): 3–10.

17. Malikova, T. E., and N. M. Anosov. "Securing safe carriage of goods by sea based on advances in stack stowage and securing technology." *Scientific problems of transportation in Siberia and the Far East* 3 (2015): 105–108.

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

Маликова Татьяна Егоровна —

доктор технических наук, доцент
Морской государственный университет
имени адмирала Г. И. Невельского
690003, Российская Федерация, г. Владивосток,
ул. Верхнепортовая, 50а
e-mail: TanMalik@mail.ru

Аносов Николай Михайлович —

кандидат технических наук, доцент
Морской государственный университет
имени адмирала Г. И. Невельского
690003, Российская Федерация, г. Владивосток,
ул. Верхнепортовая, 50а
e-mail: Anosov@msun.ru

Стрелков Алексей Юрьевич —

доцент
Морской государственный университет
имени адмирала Г. И. Невельского
690003, Российская Федерация, г. Владивосток,
ул. Верхнепортовая, д.50а
e-mail: Strelkov@msun.ru

INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Malikova, Tatiana E. —

Dr. of Technical Sciences, associate professor
Maritime State University named
after Admiral G.I. Nevelskoi
50a Verkhneportovaya Str., Vladivostok, 690003,
Russian Federation
e-mail: TanMalik@mail.ru

Anosov, Nikolay M. —

PhD
Maritime State University named
after Admiral G.I. Nevelskoi
50a Verkhneportovaya Str., Vladivostok, 690003,
Russian Federation
e-mail: Anosov@msun.ru

Strelkov, Alexei Yu. —

Associate professor
Maritime State University named
after Admiral G.I. Nevelskoi
50a Verkhneportovaya Str., Vladivostok, 690003,
Russian Federation
e-mail: Strelkov@msun.ru

Статья поступила в редакцию 27 марта 2017 г.

Received: March 27, 2017.

FORMS AND EFFECTIVENESS OF IMO IN SEAMEN FATIGUE MITIGATION

N. N. Grigoriev, D. B. Sigaev

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

Number of accidents on merchant marine continues to remain at rather high level, despite the measures undertaken from outside as International Maritime Organization (IMO), and from Administrations. The general level of accident rate on merchant marine tends to decrease. At the same time, according to the statistics of Marine Accident Investigation Branches of Great Britain, the most part of accidents at the sea is caused by influence of a human factor generally and fatigue of seamen, in particular.

The International Maritime Organization of IMO has gone for revision of rules and guidelines concerning fatigue mitigation, recognizing that the problem of seafarer's fatigue of seamen demands more comprehensive approach and the effective decision.

Updating and refreshing of the above publications, undoubtedly, will bring certain dividends. However, in our opinion, there are certain omissions in IMO approach to this problem. The person is considered only as one of the elements of the system, which ensure safety at the sea. At the same time complexity of this element, his psychophysiological features, parameters of professionally important qualities, mental conditions of the worker, the motives and interests moving behavior, etc. isn't considered. These shortcomings can be compensated by use of the tool of a professiogram of sea professions during recruitment in the shipping companies, admission in maritime educational institutions, and also monitoring of their educational process.

Combined use of the IMO tools and professiogram as the mechanism focused on vocational guidance of prospective student of maritime educational institutions and also on high-quality recruitment of marine specialist, involved in management decisions may give a significant boost in improving the efficiency of navigation, professional development of seamen, and also increase in safety of navigation.

Keywords: fatigue, fatigue mitigation, human factor, merchant marine, safety of navigation, personnel training, professiogram.

For citation:

Grigoriev, Nikolay N., and Dmitrii B. Sigaev. "Forms and effectiveness of imo in seamen fatigue mitigation." *Vestnik Gosudarstvennogo universiteta morskogo i rechnogo flota imeni admirala S.O. Makarova* 9.3 (2017): 506–515. DOI: 10.21821/2309-5180-2017-9-3-506-515.

УДК 551.577.53:574.23:347.796

ФОРМЫ И ЭФФЕКТИВНОСТЬ МЕЖДУНАРОДНОЙ МОРСКОЙ ОРГАНИЗАЦИИ ПРИ БОРЬБЕ С УСТАЛОСТЬЮ МОРЯКОВ

Н. Н. Григорьев, Д. Б. Сигаев

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

Аварийность на морском флоте продолжает оставаться на достаточно высоком уровне, несмотря на меры, предпринимаемые как со стороны Международной морской организации (ИМО), так и со стороны морских Администраций портов. Общий уровень аварийности на морском флоте имеет тенденцию к снижению. Вместе с тем, согласно статистике Департамента по расследованию морских аварий Великобритании, большая часть аварий на море обусловлена влиянием человеческого фактора в общем и усталостью моряков, в частности.

ИМО пошла на пересмотр правил и руководств по смягчению последствий усталости моряков, признавая при этом, что данная проблема на торговом флоте требует более всестороннего подхода и эффективного решения.

Обновление и приведение на уровень современности этих руководств и рекомендаций, несомненно, принесут определенные дивиденды. Однако, на наш взгляд, в подходе ИМО к этой проблеме имеются

определенные упущения. Человек рассматривается лишь как один из элементов механизма обеспечения безопасности на море. При этом не учтена сложность этого элемента, его психофизиологические особенности, параметры профессионально важных качеств, психических состояний работника, мотивы и интересы, движущие их поведением и т. д. Эти недостатки могут быть компенсированы применением инструмента профессиограммы морских профессий при подборе кадров судоходными компаниями, приеме абитуриентов морских учебных заведений, а также мониторинге их обучения.

Совместное с использованием инструментов ИМО и профессиограммы как механизма, ориентированного на профессиональную ориентацию абитуриентов морских учебных заведений, а также качественный подбор морских специалистов, задействованных в принятии управленческих решений, может дать значительный толчок в повышении эффективности судоходства, профессионального развития моряков, а также повышении безопасности судоходства.

Ключевые слова: усталость, смягчение последствий усталости, человеческий фактор, торговый флот, безопасность мореплавания, подготовка кадров, профессиограмма.

Для цитирования:

Григорьев Н. Н. Формы и эффективность международной морской организации (ИМО) при борьбе с усталостью моряков / Н. Н. Григорьев, Д. Б. Сигаев // Вестник Государственного университета морского и речного флота имени адмирала С. О. Макарова. — 2017. — Т. 9. — № 3. — С. 506–515. DOI: 10.21821/2309-5180-2017-9-3-506-515.

Введение (Introduction)

Аварийность на морском флоте продолжает оставаться на достаточно высоком уровне, несмотря на меры, предпринимаемые как со стороны Международной морской организации (ИМО), так и со стороны Администраций, приверженных высоким стандартам безопасности мореплавания. В соответствии с данными Бюро по безопасности транспорта Канады (Canadian National Transportation Safety Board (NTSB)), общий уровень аварийности на морском флоте имеет тенденцию к снижению (рис. 1), аналогичную тенденцию имеет аварийность морского флота в целом. Вместе с тем большая часть аварий, связанных с морским судоходством обусловлена влиянием человеческого фактора [1], что подтверждается статистикой МАИБ (Marine Accident Investigation Branch) — Департамента по расследованию морских аварий Великобритании.

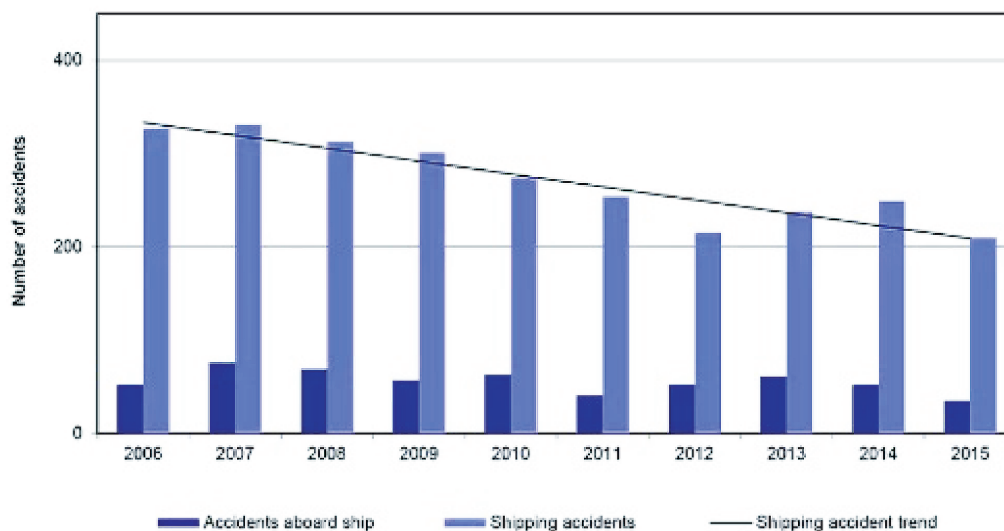


Рис. 1. Аварийность на морском флоте 2006 – 2015 гг. в водах Канады

По имеющимся на сегодняшний день данным, по крайней мере, 15 % судов могут быть определены как *субстандартные*, т. е. не отвечающие стандартам безопасности мореплавания (возможно, что этот процент даже выше). Анализ проблемы показывает, что мировое сообщество имеет все предпосылки для управления безопасностью и развития культуры безопасности в морской индустрии. Среди причин, способствующих усилению ответственности за подготовку судового

персонала и безопасное укомплектование судов экипажами, следование требованиям Кодекса ПДНВ-95. К сожалению, эти стандарты не соблюдаются должным образом. В настоящее время превалирует культура уступчивости, а не культура безопасности. Результатом победы *культуры уступчивости* над *культурой безопасности* является прежде всего нарушение совпадения целей. Работник — это средство достижения цели для компании, а компания, в свою очередь, — средство достижения цели для моряка. Правила современного судоходства диктуются, в первую очередь, установкой на достижение максимальной прибыли, при этом, как отмечалось ранее, человек является средством достижения цели для компании, причем цели самого моряка, его профессиональные качества и амбиции игнорируются. Интенсивность нагрузок повышается, что связано с продолжительностью контрактов, сокращением численности экипажей и увеличением объема отчетности. Совокупность всех этих факторов приводит к появлению и последующему накоплению усталости [2], [3].

Согласно данным ИМО, к основным причинам, снижающим популярность морской профессии, относятся: продолжительность контрактов — 67,6 %; большой объем бумажной работы — 34,1 %; усталость — 22,3 %. Столь убедительное признание самих моряков дает основания для самого пристального внимания к данной проблеме, ведь усталость является следствием продолжительности рейсов и перегруженности бумажной работой [4]. Более того, согласно данным Национальное бюро по безопасности на транспорте США (US NTSB — US National Transportation Safety Board), именно усталость как наиболее весомая составляющая человеческого фактора определяется в качестве основной причины большинства аварий и происшествий с судами.

В настоящее время технические средства, используемые на современных судах, имеют высокий уровень надежности, средства гидрометеорологического обеспечения дают точную и полную информацию, однако человек в этой цепи надежных элементов все так же несовершенен. Поэтому наиболее эффективным рычагом для повышения безопасности мореплавания и снижения рисков является минимизация аварий и происшествий на море по причине человеческого фактора в целом и по причине усталости в частности [5]. С этой связи были поставлены следующие цели и задачи:

- изучить природу понятия человеческого фактора, усталости, их взаимосвязь;
- рассмотреть статистические данные по влиянию человеческого фактора и усталости на аварийность на морском флоте;
- проанализировать методы и формы воздействия ИМО по борьбе с усталостью моряков;
- показать актуальность применения профессиограммы морских профессий для снижения усталости моряков, задействованных в принятии управленческих решений.

С целью составления полной картины научно-исследовательской деятельности, проводимой в отношении влияния усталости и человеческого фактора на безопасность судоходства, по данной тематике был выполнен тщательный подбор и анализ отечественных и зарубежных публикаций, индексируемых в международных библиографических и реферативных базах. Выполнена подборка международных документов, регламентирующих меры по борьбе с усталостью на судах морского флота.

Методы и материалы (Methods and Materials)

Успех или неудача рассматриваемой проблемы напрямую зависят от полноты и ясности термина «человеческий фактор». Прежде всего, следует обратить внимание на одно важное обстоятельство, а именно: за термином закрепилось восприятие того, что неумолимо ведет к негативным последствиям. Прогресс возможен только благодаря человеческому фактору. «Человеческий фактор» — это двухполярный мир. Мир, в котором аварийность является неизбежностью, — это плата за прогресс. И задача состоит не в том, как заявляют некоторые чиновники, чтобы свести аварийность по причине человеческого фактора к нулю, что на практике неосуществимо в принципе, а в том, чтобы эту категорию аварийности минимизировать.

Термин «человеческий фактор» свидетельствует о том, что изучение данной проблемы следует начинать именно с человека. Однако вопреки логике проблемы аварийности решаются административными мерами — усилением контроля. Так, например, до событий с «Булгарией» в Северо-Западном регионе насчитывалось 29 организаций, контролирующих деятельность пассажирского флота, а после катастрофы появилась новая — 30-я организация. Более того, отмечается, что увеличение числа проверок приводит к созданию коррупционного пресса со стороны контролирующих организаций, который сами заслуживают более пристального внимания. Об этом заявил президент Ассоциации владельцев пассажирских судов Петербурга Е. Зубарев вскоре после крушения.

В целом, под *человеческим фактором* понимается интегральная характеристика человека (или коллектива) как субъекта профессиональной и трудовой деятельности. Человеческий фактор включает в себя параметры профессионально важных качеств, психических состояний работника (адаптации, утомления, интерференции навыков, конечного порыва, фрустрации, напряжённости и проч.), движущих сил поведения (мотивов, интересов, отношений и др.), социально-ролевых функций (формальных и неформальных, предусмотренных штатным положением и обусловленных личностными свойствами субъекта деятельности или особенностями конкретной ситуации).

Для морского флота особо следует выделить факторы, связанные с особенностями менталитета смешанных экипажей. Проблема усталости на морском флоте уже в течение продолжительного времени вызывает беспокойство международных и национальных организаций, заинтересованных в максимальном снижении рисков на море, а в последние годы приобрела характер эпидемии [6], [7]. Повышение интенсивности судоходства связано с непрерывным ростом количества судов, увеличением объемов и характером перевозимых грузов, скоростей, сокращением стояночного времени судов в портах [8], [9]. Все эти факторы повышают нагрузку на экипажи судов [10], [11], выявляя особенности тех его членов, которые непосредственно задействованы в несении вахты и напрямую связаны с принятием управленческих решений [12], [13]. Несмотря на очевидность угрозы безопасности мореплавания, продолжительность контрактов моряков не становится более гуманной, численный состав экипажа зачастую находится на минимально допустимом законодательной базой уровне, что в совокупности привело к выходу проблемы усталости на морском флоте на совершенно новый глобальный уровень [14], [15].

Необходимо отметить, что во многих передовых морских державах данная тема обсуждается достаточно давно. Например, старший инспектор Бюро по расследованию морских аварий Великобритании (МАИБ), Стив Клинич на собрании членов совета профсоюза комсостава Nautilus International заявил о готовности возобновить кампанию по пересмотру минимально допустимых требований касательно укомплектования экипажей судов каботажного плавания с целью смягчения проблемы усталости моряков. Он заявил, что режим работы вахтенных шесть через шесть (такой режим работы является характерным для штурманского состава небольших судов, работающих в Европейском регионе) опасен в такой степени, что способен превращать суда в «управляемые боевые ракеты» [16]. Как отмечалось ранее, по словам специалистов агентства МАИБ, усталость в настоящий момент остается основной причиной большей части аварий на морском флоте. Поддерживая мнение о необходимости предметного решения данной проблемы, Национальное бюро по безопасности на транспорте США — NTSB поставило приоритетной целью на 2016 г. повышение безопасности морского судоходства главным образом за счет сокращения количества аварий и происшествий, вызванных усталостью моряков.

Основными направлениями работы ИМО на сегодняшний день остаются борьба с дискриминационными действиями в международном торговом судоходстве, а также принятие и усовершенствование нормативно-правовой базы касательно обеспечения мореплавания и защиты морской среды [17]. Основным документом, нормирующим режим труда и отдыха моряков, является Международная конвенция о подготовке и дипломировании моряков и несении вахты (ПДНВ 78/95) — далее Конвенция. Что касается практического применения Конвенции и кон-

троля за соблюдением ее требований на судах, то здесь проверка соответствия работы судна и экипажа всем международным и местным нормам и правилам осуществляется портовыми властями государств портов захода, а также так называемыми «третьими лицами». Однако следует обратить внимание на тот факт, что выявление реальной ситуации относительно соблюдения режима работы и отдыха экипажем является задачей практически трудно осуществимой. Обнаружение нарушения требований, касающихся соблюдения режима труда и отдыха экипажем, является одним из серьезнейших замечаний, которые могут возникнуть в ходе проверки судов инспекторами. В этой связи вся документация на судах, связанная с данным вопросом, ведется с особой тщательностью. При этом зачастую на практике моряки сталкиваются с ситуациями, когда соблюдение данных требований просто невозможно. Среди них можно выделить следующие: короткие переходы между портами; проходы каналов и шлюзов, включая множество швартовок; несколько последовательно запланированных грузовых операций судно-судно [18]. Наступает момент, когда коммерческие аспекты торгового судоходства лицом к лицу сталкиваются с вопросами безопасности мореплавания [19]. К сожалению, реальность такова, что в погоне за прибылью чаще приоритеты расставлены не в пользу безопасности. В таких случаях документация «подгоняется» под шаблон требований и не отражает реальную ситуацию на борту судна. В связи с этим возникает резонный вопрос: *«на чьи интересы в конечном итоге оказалась ориентирована нормативно-правовая система, действующая в настоящее время в секторе морского торгового судоходства, — судовладельцев или моряков?»*

В течение продолжительного периода времени вопросу усталости на морском флоте не уделялось должного внимания со стороны законодательных органов, а именно Международной морской организации. Однако в начале 2016 г. всеобщая обеспокоенность проблемой усталости моряков все же вызвала ответную реакцию со стороны ИМО. Являясь международным регулятором деятельности судоходной отрасли, Международная морская организация, реагируя на давление со стороны многих участников отрасли, выступила с инициативой, призванной решить проблему усталости членов экипажей морских судов. С этой целью члены ИМО приняли решение пересмотреть старые руководства касательно борьбы с усталостью на судах морского флота (Guidance on Fatigue Mitigation and Management) [20], которые в течение длительного периода времени считались во всех отношениях устаревшими и совершенно неподходящими для эффективного решения рассматриваемой проблемы. Возглавить проект по пересмотру руководств по смягчению негативных последствий усталости членов экипажа морских судов решила Австралия. Изначально завершение разработки новых правил было запланировано на конец 2016 г., однако по состоянию дел на февраль 2017 г. было принято решение продолжить работу в этом направлении из-за недостаточного количества времени [21].

Все члены ИМО, которые призвали и призывают к изменению старых правил и руководств, единогласно настаивают на том, чтобы новые документы были изложены в максимально простой и понятной форме, а не в привычной — официальной и сложной для понимания манере. Текст правил должен быть предельно простым еще и потому, что для многих моряков английский язык не является родным. Более того, в новой версии руководств следует акцентировать внимание на том, что усталость может являться, вопреки мнению большинства, не только следствием несоблюдения моряками предписанного режима труда и отдыха, но и быть вызвана многими другими причинами, имеющими отношение ко всем аспектам судоходства [22], [23]. Той же позиции придерживается Международная палата судоходства, представляющая интересы судовладельцев. Международная палата судоходства представила на рассмотрение Подкомитета ИМО по человеческому фактору, подготовке моряков и несению вахты (далее НТВ) документ, где главной идеей является мысль о том, что новые правила, по мнению судовладельцев, должны *«обеспечивать комплексный, всесторонний подход к проблеме усталости моряков, а также устанавливать ответственность и обязанности для всех участников судоходства в отношении мер по сокращению усталости моряков»*. Кроме того, Международная палата судоходства призывает непременно отметить в новых правилах тот факт, что усталость моряков может быть вызвана целым рядом фак-

торов, однако нельзя с точностью утверждать, что какой-либо из них оказывает большее влияние, а какой-либо — меньшее [24] – [26].

Участники отрасли также выражают обеспокоенность тем, что в связи с нехваткой квалифицированных кадров на флоте проблема усталости моряков может еще более усугубиться вследствие недостаточной укомплектованности экипажей судов, так как моряки в этом случае будут вынуждены столкнуться с еще более высокой рабочей нагрузкой [27].

Существуют и другие вопросы, в частности, к уровню и качеству подготовки моряков. С целью повышения эффективности работы, сокращения уровня усталости и повышения безопасности в судоходном секторе в целом необходимо уделять больше внимания качеству и объему подготовки моряков с целью получения возможности укомплектовать флот квалифицированными экипажами в необходимом для этого количестве, тем самым сократив число аварий и происшествий на море. В целом необходимо отметить, что сам факт, свидетельствующий о том, что ИМО согласилась на пересмотр вышеупомянутых правил и руководств, свидетельствует о том, что организация признает, что проблема усталости моряков на торговом флоте требует более всестороннего подхода и эффективного решения. Одним из таких эффективных решений может стать использование профессиограммы морских профессий в общем, а также профессиограммы судоводителя в частности.

Профессиограмма — это документ, который составляется на основе анализа содержания профессиональной деятельности и включает в себя общую характеристику профессии и требования, которые эта профессия предъявляет к человеку. При этом чем большее количество признаков учитывается при описании профессии, чем больше они относятся к психологическим и внутренним качествам человека, тем успешнее может быть сделан выбор данной профессии на основе выполненного описания. Таким образом, профессиограмма составляется на основе анализа содержания профессиональной деятельности и включает в себя общую характеристику профессии и требования, которые профессия предъявляет к человеку [28]. Схематично профессиограмма может быть представлена в виде рис. 2. Так, при выборе наиболее подходящего варианта кандидату следует прежде всего ориентироваться на профессии, связанные со следующими психологическими характеристиками: способ мышления, тип личности, предпочитаемый способ взаимодействия с людьми.

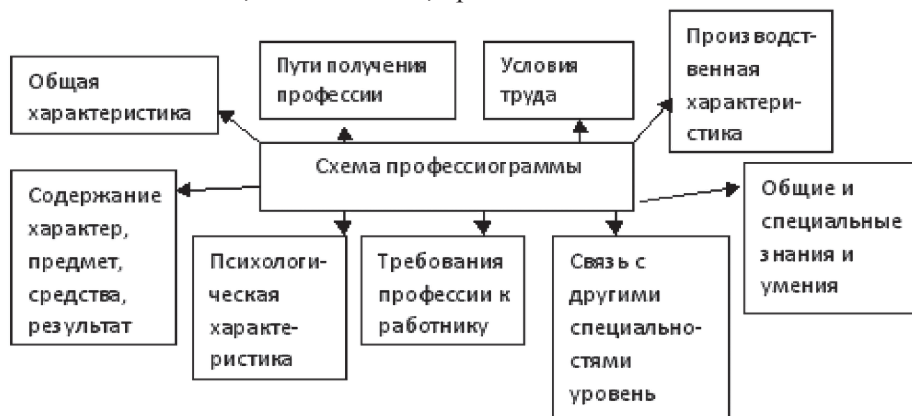


Рис. 2. Структурная схема профессиограммы

Обсуждение (Discussion)

Международная морская организация, в составе которой ведет свою работу Подкомитет по человеческому фактору (НТФ), на сегодняшний день предпринимает действия по пересмотру руководств по борьбе с усталостью моряков. Обновление и приведение на уровень современности этих руководств и рекомендаций, несомненно, дадут положительные результаты. Однако, на наш взгляд, в подходе ИМО к этой проблеме имеются определенные упущения, в частности, состоящие в том, что человек рассматривается лишь как один из элементов механизма, обеспечивающего безопасность на море. При этом не учтена сложность этого «элемента», его психофизиологические особенности, параметры профессионально важных качеств, психических состояний работника,

мотивы и интересы, движущие его поведением и др. Решением этого вопроса может стать применение профессиограммы морских профессий.

Следует отметить, что профессиограммы уже в течение достаточно продолжительного периода времени успешно используются во многих отраслях берегового сегмента, в частности для проведения профессионального отбора на должности, напрямую связанные с принятием управленческих решений, оказывающих влияние на безопасность окружающей среды, технологических процессов и задействованного в работе персонала. Тем не менее, в настоящее время профессиограмма не нашла применение в сфере морского торгового судоходства. Более того, подобных документов для морских профессий в настоящее время вообще не существует, несмотря на наличие схожих по концепции исследований — подбора наиболее подходящего типа судна для вахтенного офицера, исходя из его индивидуальных особенностей [29]. Поэтому в процессе научно-исследовательской работы нами была поставлена задача разработать профессиограмму судоводителя. В перспективе такой документ может и, по нашему мнению, должен найти применение в процессе профессионального отбора при поступлении абитуриентов на специальность «Судовождение» [30].

Использование профессиограммы судоводителя в системе профессиональной ориентации и отбора может дать значительный толчок в повышении эффективности судовождения, профессионального развития моряков, а также повышении безопасности судоходства. Необходимо также отметить, что при создании профессиограммы всегда приходится сталкиваться со сложностью такого рода, что данная работа находится на «стыке» двух областей: психологии и изучаемой специальности. Однако при четком разграничении зон ответственности невозможно получить качественный и надежный результат, который может быть достигнут только при тесном и плодотворном сотрудничестве специалистов изучаемой области и специалистов-психологов.

Заключение (Conclusion)

Понятия человеческого фактора и усталости очень тесно связаны между собой, особенно четко это прослеживается в отчетах об авариях на судах морского флота. Этот тезис подтверждается всеми ведущими национальными бюро по расследованию морских аварий и безопасности морского транспорта (US NTSB, Canadian NTSB, MAIB), по данным которых основной причиной аварий на море продолжает оставаться усталость моряков как составная часть человеческого фактора.

Международная морская организация ИМО использует систему нормативно-правовой документации для борьбы с усталостью на флоте, что, безусловно, необходимо и обязательно к исполнению, однако эти методы имеют недостатки. Эти недостатки могут быть компенсированы применением профессиограммы морских профессий при подборе кадров, приеме абитуриентов морских учебных заведений, а также последующем их обучении.

Исходя из опыта использования профессиограмм в других отраслях, предлагаемый подход позволит извлечь преимущества как потенциальным работникам, так и их работодателям. При этом работник сможет изучить все описательные характеристики специальности, ее историю, преимущества и недостатки применительно к его индивидуальным ощущениям, а главное, оценить и сопоставить уровни качеств и свойств, предъявляемых профессией к специалисту, с его индивидуальными качествами, и, следовательно, сопоставить все «за» и «против». Работодатель, в свою очередь, применяя профессиограмму судоводителя при отборе кадров, получит огромное подспорье для принятия на должность высокопрофессиональных, соответствующих должностным требованиям, кадров.

Более того, использование профессиограммы при наборе абитуриентов в морские вузы, а также осуществление последующего мониторинга результатов на протяжении всего периода обучения позволят повысить эффективность обучения будущих курсантов и их профессиональную заинтересованность. Такой шаг также даст возможность качественно вести борьбу с усталостью путем повышения квалификации кадров, постепенно отказываясь от огромного количества бумаг, предназначенных для специалистов другого уровня образования, а также лучшего понимания полученной ими профессии, и, в свою очередь, позволит отрасли сделать значительный шаг вперед в повышении безопасности мореплавания и снижении рисков.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Ugurlu O.* Analysis of grounding accidents caused by human error / O. Ugurlu, U. Yildirim, E. Basar // Journal of Marine Science and Technology. — 2015. — Vol. 23. — Is. 5. — Pp. 748–760. DOI: 10.6119/JMST-015-0615-1.
2. Nautical institute Fatigue: IMO guidance // Seaways. — 2006. — № 3. — Pp. 7–9.
3. *Dinges D. F.* An overview of sleepiness and accidents / D. F. Dinges // Journal of Sleep Research. — 1995. — Vol. 4. — Is. s2. — Pp. 4–14. DOI: 10.1111/j.1365-2869.1995.tb00220.x.
4. *Allen P.* A cross-vessel survey of seafarers examining factors associated with fatigue / P. Allen, A. Burke, N. Ellis // Contemporary Ergonomics. — 2003. — Pp. 125–130.
5. *Akhtar M. J.* Common patterns in aggregated accident analysis charts from human fatigue-related groundings and collisions at sea / M.J. Akhtar, I.B. Utne // Maritime Policy & Management. — 2015. — Vol. 42. — Is. 2. — Pp. 186–206. DOI: 10.1080/03088839.2014.926032.
6. *Григорьев Н. Н.* Восприятие информации как фактор безопасности мореплавания / Н. Н. Григорьев, А. П. Двинин, М. М. Наконечный // Морской флот. — 2015. — № 4. — С. 36–40.
7. *Lutzhof M.* Fatigue at Sea in Swedish Shipping-A Field Study / M. Lutzhof, A. Dahlgren, A. Kircher, B. Thorslund, M. Gillberg // American Journal of Industrial Medicine. — 2010. — Vol. 53. — Is. 7. — Pp. 733–740. DOI: 10.1002/ajim.20814.
8. Project Martha final report. — Warsaw, 2017. — 32 p.
9. *Allen P.* The prevention and management of seafarers' fatigue: a review / P. Allen, E. Wadsworth, A. Smith // International Maritime Health. — 2007. — Vol. 58. — No. 1-4. — Pp. 167–177.
10. *Salyga J.* Factors Influencing Psychoemotional Strain and Fatigue, and Relationship of These Factors With Health Complaints at Sea Among Lithuanian Seafarers / J. Salyga, M. Kusleikaite // Medicina (Kaunas). — 2011. — Vol. 47. — Is. 12. — Pp. 675–681.
11. *Allen P.* Seafarers' fatigue: a review of the recent literature / P. Allen, E. Wadsworth, A. Smith // International Maritime Health. — 2008. — Vol. 59. — No. 1-4. — Pp. 81–92.
12. *Simkuva H.* Optimization of work and rest hours for navigation officers on the ship / H. Simkuva, A. Purins, S. Mihailova, I.J. Mihailovs // 5th International Interdisciplinary Scientific Conference on Society, Health, Welfare. — EDP Sciences, 2016. — Vol. 30. DOI: 10.1051/shsconf/20163000004.
13. Project HORIZON — Final Report Findings Southampton [Электронный ресурс]. — Режим доступа: <http://www.warsashacademy.co.uk/about/resources/final-horizon-report-final-as-printed.pdf> (дата обращения — 03.03.2015).
14. *Сигаев Д. Б.* Усталость и меры по ее контролю / Д. Б. Сигаев, Н. Н. Григорьев // Материалы VII Межвузовской научно-практической конференции «Современные тенденции и перспективы развития водного транспорта России». — СПб., 2016. — С. 19–23.
15. *Jepsen J. R.* Seafarer fatigue: a review of risk factors, consequences for seafarers' health and safety and options for mitigation / J. R. Jepsen, Z. Zhao, Wessel M. A. van Leeuwen // International Maritime Health. — 2015. — Vol. 66. — No. 2. — Pp. 106–117. DOI: 10.5603/IMH.2015.0024.
16. *Dohrmann S. B.* Determinants of seafarers' fatigue: a systematic review and quality assessment / S. B. Dohrmann, A. Leppin // International Archives of Occupational and Environmental Health. — 2017. — Vol. 90. — Is. 1. — Pp. 13–37. DOI: 10.1007/s00420-016-1174-y.
17. MSC-MEPC.2/Circ.12/Rev.1 Revised guidelines for formal safety assessment (FSA) for use in the IMO rule-making process. — London, 2015. — 70 p.
18. *Bal E.* Prioritization of the causal factors of fatigue in seafarers and measurement of fatigue with the application of the Lactate Test / E. Bal, O. Arslan, L. Tavacioglu // Safety Science. — 2015. — Vol. 72. — Pp. 46–54. DOI: 10.1016/j.ssci.2014.08.003.
19. *Григорьев Н.Н.* Правила МППСС-72: Неопределенность в принятии решения / Н.Н. Григорьев, М.М. Наконечный // Морской флот. — 2016. — № 5. — С. 32–36.
20. MSC/Circ.1014 Guidance on Fatigue Mitigation and Management. — London, 2001. — 105 p.
21. Report to the Maritime Safety Committee – HTW 3/19. — London, 2016. — 107 p.
22. *Sargent C.* A review of the physiological and psychological health and wellbeing of naval service personnel and the modalities used for monitoring / C. Sargent, C. Gebruers, J. O'Mahony // Military Medical Research. — 2017. — Vol. 4. — Is. 1. — Pp. 28. DOI: 10.1186/s40779-016-0112-3
23. *Akerstedt T.* Sleep loss and fatigue in shift work and shift work disorder / T. Akerstedt, K. P. Wright // Sleep medicine clinics. — 2009. — Vol. 4. — Is. 2. — Pp. 257–271. DOI: 10.1016/j.jsmc.2009.03.001.

24. Oldenburg M. Systematic review of maritime field studies about stress and strain in seafaring / M. Oldenburg, B. Hogan, H.-J. Jensen // *International Archives of Occupational and Environmental Health*. — 2013. — Vol. 86. — Is. 1. — Pp. 1–15. DOI: 10.1007/s00420-012-0801-5.
25. Sunde E. Noise and sleep on board vessels in the Royal Norwegian Navy / E. Sunde, M. Bratveit, S. Pallesen, B. E. Moen // *Noise & Health*. — 2016. — Vol. 18. — Is. 81. — Pp. 85–92. DOI: 10.4103/1463-1741.178481.
26. Åkerstedt T. Mental fatigue, work and sleep / T. Åkerstedt, A. Knutsson, P. Westerholm, T. Theorell, L. Alfredsson, G. Kecklund // *Journal of Psychosomatic Research*. — 2004. — Vol. 57. — Is. 5. — Pp. 427–433. DOI: 10.1016/j.jpsychores.2003.12.001.
27. Wadsworth E.J. Fatigue and health in a seafaring population / E. J. K. Wadsworth, P. H. Allen, R. L. McNamara, A. P. Smith // *Occupational medicine*. — 2008. — Vol. 58. — Is. 3. — Pp. 198–204. DOI: 10.1093/occmed/kqn008.
28. Романова Е. С. 99 популярных профессий. Психологический анализ и профессиограммы. — 2-е изд. / Е. С. Романова. — СПб.: Питер, 2003. — 464 с.
29. Ugurlu O. Application of Fuzzy Extended AHP methodology for selection of ideal ship for oceangoing watchkeeping officers / O. Ugurlu // *International Journal of Industrial Ergonomics*. — 2015. — Vol. 47. — Pp. 132–140. DOI: 10.1016/j.ergon.2015.01.013.
30. Кирикова З. З. Профессиограмма как инструмент формирования и уточнения компетенций работника / З. З. Кирикова // *Высшее образование сегодня*. — 2009. — № 5. — С. 30–33.

REFERENCES

1. Ugurlu, Özkan, Umut Yıldırım, and Ersan Başar. “Analysis of grounding accidents caused by human error.” *Journal of Marine Science and Technology* 23.5 (2015): 748–760. DOI: 10.6119/JMST-015-0615-1.
2. “Nautical institute Fatigue: IMO guidance.” *Seaways* 3 (2006): 7–9.
3. Dinges, David F. “An overview of sleepiness and accidents.” *Journal of sleep research* 4.s2 (1995): 4–14. DOI: 10.1111/j.1365-2869.1995.tb00220.x.
4. Allen, Paul, Ailbhe Burke, and Neil Ellis. “A cross-vessel survey of seafarers examining factors associated with fatigue.” *Contemporary Ergonomics* (2003): 125–130.
5. Akhtar, Muhammad Juned, and Ingrid Bouwer Utne. “Common patterns in aggregated accident analysis charts from human fatigue-related groundings and collisions at sea.” *Maritime Policy & Management* 42.2 (2015): 186–206. DOI: 10.1080/03088839.2014.926032.
6. Grigor’ev, N. N., A. P. Dvinin, and M. M. Nakonechnyi. “Vospriyatie informatsii kak faktor bezopasnosti moreplavaniya.” *Morskoi flot* 4 (2015): 36–40.
7. Lützhöft, Margareta, A. Dahlgren, A. Kircher, B. Thorslund, and M. Gillberg. “Fatigue at sea in Swedish shipping—a field study.” *American journal of industrial medicine* 53.7 (2010): 733–740. DOI: 10.1002/ajim.20814.
8. *Project Martha final report*. Warsaw, 2017.
9. Allen, Paul, Emma Wadsworth, and Andy Smith. “The prevention and management of seafarers’ fatigue: a review.” *Int Marit Health* 58.1-4 (2007): 167–177.
10. Salyga, Jonas, and Marijona Kusleikaite. “Factors influencing psychoemotional strain and fatigue, and relationship of these factors with health complaints at sea among Lithuanian seafarers.” *Medicina (Kaunas)* 47.12 (2011): 675–681.
11. Allen, Paul, Emma Wadsworth, and Andy Smith. “Seafarers’ fatigue: a review of the recent literature.” *Int Marit Health* 59.1-4 (2008): 81–92.
12. Simkuva, H., A. Purins, S. Mihailova, and I. J. Mihailovs. “Optimization of work and rest hours for navigation officers on the ship.” *5th International Interdisciplinary Scientific Conference on Society, Health, Welfare*. Vol. 30. EDP Sciences, 2016. DOI: 10.1051/shsconf/20163000004.
13. Project HORIZON — Final Report Findings Southampton. Web. 3 March 2015 <<http://www.warsashacademy.co.uk/about/resources/final-horizon-report-final-as-printed.pdf>>.
14. Sigaev, D. B., and N. N. Grigor’ev. “Uсталost’ i mery po ee kontrolyu.” *Materialy VII Mezhvuzovskoi NPK «Sovremennye tendentsii i perspektivy razvitiya vodnogo transporta Rossii»*. SPb., 2016: 19–23.
15. Jepsen, Jørgen Riis, Zhiwei Zhao, and Wessel M.A. van Leeuwen. “Seafarer fatigue: a review of risk factors, consequences for seafarers’ health and safety and options for mitigation.” *International Maritime Health* 66.2 (2015): 106–117. DOI: 10.5603/IMH.2015.0024.

16. Dohrmann, Solveig Boeggild, and Anja Leppin. "Determinants of seafarers' fatigue: a systematic review and quality assessment." *International Archives of Occupational and Environmental Health* 90.1 (2017): 13–37. DOI: 10.1007/s00420-016-1174-y.
17. MSC-MEPC.2/Circ.12/Rev.1 Revised guidelines for formal safety assessment (FSA) for use in the IMO rule-making process. London, 2015.
18. Bal, Elif, Ozcan Arslan, and Leyla Tavacioglu. "Prioritization of the causal factors of fatigue in seafarers and measurement of fatigue with the application of the Lactate Test." *Safety science* 72 (2015): 46–54.
19. Grigor'ev, N. N., and M. M. Nakonechnyi. "Pravila MPPSS-72: Neopredelennost' v prinyatii resheniya." *Morskoi flot* 5 (2016): 32–36.
20. MSC/Circ.1014 Guidance on Fatigue Mitigation and Management. London, 2001.
21. Report to the Maritime Safety Committee - HTW 3/19. London, 2016.
22. Sargent, Cliodhna, Cormac Gebruers, and Jim O'Mahony. "A review of the physiological and psychological health and wellbeing of naval service personnel and the modalities used for monitoring." *Military Medical Research* 4.1 (2017): 28. DOI: 10.1186/s40779-016-0112-3.
23. Åkerstedt, Torbjörn, and Kenneth P. Wright. "Sleep loss and fatigue in shift work and shift work disorder." *Sleep medicine clinics* 4.2 (2009): 257–271. DOI: 10.1016/j.jsmc.2009.03.001.
24. Oldenburg, M., B. Hogan, and H-J. Jensen. "Systematic review of maritime field studies about stress and strain in seafaring." *International archives of occupational and environmental health* 86.1 (2013): 1–15. DOI: 10.1007/s00420-012-0801-5.
25. Sunde, Erlend, Magne Bratveit, Stale Pallesen, and Bente Elisabeth Moen. "Noise and sleep on board vessels in the Royal Norwegian Navy." *Noise & health* 18.81 (2016): 85–92. DOI: 10.4103/1463-1741.178481.
26. Åkerstedt, Torbjörn, A. Knutsson, P. Westerholm, T. Theorell, L. Alfredsson, and G. Kecklund. "Mental fatigue, work and sleep." *Journal of psychosomatic research* 57.5 (2004): 427–433. DOI: 10.1016/j.jpsychores.2003.12.001.
27. Wadsworth, Emma J. K., Paul H. Allen, Rachel L. McNamara, and Andrew P. Smith. "Fatigue and health in a seafaring population." *Occupational medicine* 58.3 (2008): 198–204. DOI: 10.1093/occmed/kqn008.
28. Romanova, E. S. 99 populyarnykh professii. Psikhologicheskii analiz i professiogrammy. 2-d ed. SPb.: Piter, 2003.
29. Uğurlu, Özkan. "Application of Fuzzy Extended AHP methodology for selection of ideal ship for oceangoing watchkeeping officers." *International Journal of Industrial Ergonomics* 47 (2015): 132–140. DOI: 10.1016/j.ergon.2015.01.013.
30. Kirikova, Z. Z. "Prof essiogram as an instrument of worker's adequacy forming and adjustment." *Higher Education Today* 5 (2009): 30–33.

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

Григорьев Николай Николаевич —
кандидат технических наук, профессор
ФГБОУ ВО «ГУМРФ имени
адмирала С.О. Макарова»
198035, Российская Федерация, Санкт-Петербург,
ул. Двинская, 5/7
e-mail: n.grigoriev-1948@mail.ru, kaf_tsn@gumrf.ru
Сигаев Дмитрий Борисович — аспирант
Научный руководитель:
Григорьев Николай Николаевич
ФГБОУ ВО «ГУМРФ имени
адмирала С.О. Макарова»
198035, Российская Федерация, Санкт-Петербург,
ул. Двинская, 5/7
e-mail: sigaevdmitrii@gmail.com

INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Grigoriev, Nikolay N. —
PhD, professor
Admiral Makarov State University of Maritime
and Inland Shipping
5/7 Dvinskaya Str., St. Petersburg 198035,
Russian Federation
e-mail: n.grigoriev-1948@mail.ru
Sigaev, Dmitrii B. — Postgraduate
Supervisor:
Grigoriev, Nikolay N.
Admiral Makarov State University of Maritime
and Inland Shipping
5/7 Dvinskaya Str., St. Petersburg 198035,
Russian Federation
e-mail: sigaevdmitrii@gmail.com

Статья поступила в редакцию 11 апреля 2017 г.
Received: April 11, 2017.

THE RATIONALE FOR THE USE OF THE COGNITIVE APPROACH TO THE MARITIME SHIPPING MANAGEMENT

V. A. Prokofev

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

Cognitive approach, is a natural one in the management of Maritime shipping and implicitly used since ancient times. At the present stage it acquires new content. The rapid growth of tonnage and number of vessels in all countries engaged in Maritime shipping, led to the cybernetization of the shipping business. Shipping companies use the automated control systems of transport processes. Computers brought in to solve the problems of planning and operational control of the ship's operating. Computer cybernetics is the phenomenon of mass order and necessary condition for the existence of the shipping business. The question arose about the development of the optimal management decisions in a multi-tiered information management system. In these conditions, has become an urgent the problem of creating the cognitive structure of distributed knowledge, which would allow combining professional human expertise and intellectual capabilities of modern computers.

In this paper we present an application of cognitive schema for solving problems of optimal planning and operational control of the fleet of the shipping company. Such problems often arise in the operational practices of the fleet — transportation of various cargo between the different ports are sufficiently numerous. Their peculiarity consists in the heterogeneous fleet of multiple motion patterns, which may not have crossing points. The aim is to establish the required number of ships of each type and fixing them in defined in the course of solving the traffic pattern.

There is a mathematical model formulated in the paper, describing this task in the generalized form. It is a new modification of the “constellation” model with two types of variables — integer and continuous. The solution must ensure the maximum efficiency of Marine transportation. The developed method of solutions of the original optimization model is based on the cognitive approach. The analysis of the mathematical foundations of the algorithm the solution of this and similar models it is concluded that cognitive technologies are a fruitful and promising for use in shipping business ERP.

Keywords: Maritime shipping, Enterprise Resource Planning, cognitive technology.

For citation:

Prokofev, Vadim A. “The rationale for the use of the cognitive approach to the maritime shipping management.” *Vestnik Gosudarstvennogo universiteta morskogo i rechnogo flota imeni admirala S.O. Makarova* 9.3 (2017): 516–523. DOI: 10.21821/2309-5180-2017-9-3-516-523.

УДК 656.61(005)

ОБОСНОВАНИЕ ПРИМЕНЕНИЯ КОГНИТИВНОГО ПОДХОДА К УПРАВЛЕНИЮ МОРСКИМ СУДОХОДСТВОМ

В. А. Прокофьев

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

Когнитивный подход является естественным в управлении морским судоходством и в неявном виде используется с древнейших времен. На современном этапе он приобретает новое содержание. Бурный рост тоннажа и количества судов во всех странах, осуществляющих морские перевозки, вызвал к жизни кибернетизацию судоходного бизнеса. В судоходных компаниях появились автоматизированные системы управления производственными процессами. Компьютеры привлечены к решению задач планирования и оперативного регулирования работы судов. Кибернетизация управления стала явлением массового порядка, необходимым условием существования судоходного бизнеса. В порядке ее развития возник вопрос о выработке оптимальных управленческих решений в многоуровневой информационно-управляющей системе. Одним из путей решения этого вопроса является организация системы управления бизнесом в виде

когнитивной структуры распределенного знания, которая позволила бы объединить профессиональные знания специалистов и интеллектуальные возможности современных компьютеров.

В данной статье предлагается применение когнитивной схемы для решения задач оптимального планирования и оперативного регулирования работы флота судоходной компании. Такая задача как перевозка разных грузов между разными достаточно многочисленными портами, часто возникает в эксплуатационной практике. Её особенность состоит в работе разнотипного флота на нескольких схемах движения, которые могут не иметь пунктов пересечения. Целью в данном случае является установление необходимого количества судов каждого типа и закрепление их за определенными в ходе решения схемами движения.

Сформулирована математическая модель, в обобщенном виде описывающая эту задачу. Она представляет собой новую модификацию «расстановочной» модели с двумя типами переменных — целочисленными и непрерывными. Решение должно обеспечить максимальную эффективность процесса морской перевозки. Разработан способ решения оригинальной оптимизационной модели на основе когнитивного подхода. В результате анализа математической основы алгоритма решения этой и подобных моделей делается вывод о том, что когнитивные технологии являются плодотворными и перспективными для использования в автоматизированных системах ведения судоходного бизнеса.

Ключевые слова: морское судоходство, автоматизированная система управления, когнитивная технология.

Для цитирования:

Прокофьев В. А. Обоснование применения когнитивного подхода к управлению морским судоходством / В. А. Прокофьев // Вестник Государственного университета морского и речного флота имени адмирала С. О. Макарова. — 2017. — Т. 9. — № 3. — С. 516–523. DOI: 10.21821/2309-5180-2017-9-3-516-523.

Введение

Морское судоходство имеет в своей основе международное разделение мирового производства и осуществление морской торговли. Можно утверждать, что именно международная торговля явилась причиной возникновения, существования и развития морского флота. При этом древнему капитану (*кибернетосу*), очевидно, приходилось одновременно быть и судоводителем, и командиром судна, и штурманом, и экономистом своего «торгового предприятия», и непосредственно торговцем. Поэтому он должен был обладать знаниями о конструкции судна и приемах управления им, навигации, астрономии, способах работы с командой, уметь вести расчеты расходов и доходов, владеть условиями заключения торговых сделок и др. В дальнейшем, по мере развития судоходства, добавлялись сведения и из других отраслей знаний, включая правовые и административные вопросы.

Во многих практических ситуациях сведения из различных наук и умений дополняют друг друга, обеспечивая *синергический эффект* при решении практических задач эксплуатации торгового судна. Т. е. капитан, управляя одновременно навигационной и коммерческой работой торгового судна, во многих случаях использует *когнитивные технологии*, базирующиеся на интеллектуальных способностях человека, использующих его воображение и ассоциативное мышление [1]. В еще большей степени эти технологии в неявной форме проявляются в работе современных специалистов по управлению коммерческой работой судов.

Развитие средств автоматизации добавило к функциям управленца решение многочисленных административно-хозяйственных задач пароходств, превратившихся в крупные производственные предприятия с разветвленной структурой [2]. В кибернетическую [3] схему управления судоходной компанией входят средства для решения множества сопутствующих основному бизнесу задач, связанных с фрахтованием, финансовыми функциями, логистикой, маркетингом и другими процессами, формируя [4] в комплексе автоматизированную систему ведения бизнеса (АСВБ). Кибернетические методы управления вместе с техническими, коммуникационными и сервисными средствами получения оперативной информации создали предпосылки для возникновения гибридной когнитивной среды, включающей элементы искусственного интеллекта в сочетании с естественным разумом управляющего персонала, имеющего специальную подготовку. Корпоративная информационная система судоходного предприятия, имеющая структуру подоб-

ного рода, описана в работах [5] – [7]. В наши дни становится трендом построение и использование автоматизированных систем управления судоходством с последующим применением нового уровня когнитивных технологий в виде взаимодействия машинного и естественного интеллекта. Один из аспектов реализации такого взаимодействия описан в данной работе.

Общая структура системы автоматизации судоходного менеджмента

При выборе организационной структуры АСВБ следует исходить из того, что ключевой задачей судоходного предприятия на рынке является контроль целостной ситуации в своей сфере бизнеса. Следствием такого подхода должен быть отказ от модульной архитектуры информационной системы при корпоративном решении задач управления предприятием. Это означает доминирование системного подхода к ее созданию, т. е. перенос внимания с частей на целое, — руководитель проекта должен обеспечить целостность АСВБ. Необходимо, чтобы архитектура системы управления предприятием (предлагающая вычислительную среду для обеспечения управленческих решений) обладала синергетическим свойством. Модульная архитектура с межмодульными протоколами взаимодействия не может обеспечить синергизма системы именно из-за определенных межмодульных протоколов (плохо строятся динамические деревья решений в корпоративной сети [8]).

Поскольку АСВБ судоходного предприятия должна быть ориентирована на задачи, которые решаются корпоративным образом, нужна классификация решаемых задач и, соответственно, метаданных, данных и т. д. В кибернетической схеме управления флотом [2] данные находятся на разных уровнях. На *первом (низовом) уровне* источники данных — управляемые суда (флот), на *втором* — телекоммуникационная подсистема, собирающая данные с первого уровня. Она использует ресурсы сетей связи различного назначения, в том числе систему спутниковой связи и навигации. *Третий уровень* — это информационная подсистема АСВБ, включающая в себя серверы, базы данных и программное обеспечение АИСС, *четвертый* — сеть компьютеров, решающих задачи взаимодействия всех уровней и реализующих прикладные процессы, т. е. непосредственно расчет управляющих воздействий. В работе [9] структура, состоящая из информационных уровней с перечисленными выше функциями и техническими средствами, определяется как когнитивная система.

Когнитивные технологии имитируют мыслительную деятельность человека. Они, как правило, основаны на моделях с нечеткой логикой (Fuzzy logic) и на нейронных сетях (Neural networks). Цели, преследуемые при создании когнитивных систем, могут быть представлены следующими примерами: получение новых знаний, принятие решений в сложных ситуациях и интеллектуальная обработка данных. В человеко-машинных системах с использованием телекоммуникационных сетей [10], [11] могут использоваться когнитивные технологии, позволяющие радикально улучшить показатели эффективности процессов обмена информацией. Это обеспечивается конвергенцией информационных и телекоммуникационных систем, предоставляющих широкий спектр новых услуг [12]. В таких системах совокупное знание отнюдь не сводится к суммарному знанию людей, не меньшую роль при этом играет и структура их взаимодействий. Как правило, компания своими силами или в кооперации с разработчиком типовой АСВБ разрабатывает алгоритм и программные средства, позволяющие рационально сочетать естественный интеллект операторов с искусственным интеллектом стандартных оптимизационных пакетов машинных программ. Построенная на этих принципах АСВБ на всех уровнях управления открыта к применению когнитивных подходов.

Включение в кибернетическую систему математических моделей оптимизации управленческих решений повышает эффективность управления в целом, в то же время требуя взаимной адаптации естественного и искусственного интеллекта. Взаимная адаптация (*коадаптика*) акцентирует внимание на изменениях, которые претерпевают объекты, становясь компонентами системы, а также на закономерностях трансформации их структур в новой системе. Эти вопросы решаются в рамках создания систем с гибридным интеллектом [13]. Примером использования коадаптики

в кибернетической схеме управления судоходством является внедрение отдельными компаниями в свои АСВБ машинных программ оптимизации планов и расчетов. Это касается прежде всего стабильно работающих крупных судоходных компаний, использующих для управления бизнесом системы с когнитивной структурой: SHIPNET (<http://www.shipnet.no/Liner-Management/>), F-MIS (<http://www.maritime-suppliers.com/>), DANAOS (<http://web2.danaos.gr/maritime-software-solutions/>). В этом же ряду находится и менее известная компания BESTIKON LLC (<http://www.bestikon.ee/ru/bestikon-wms-ship-owner-solution/>). Кибернетические системы этих компаний относятся к высшему уровню иерархии и построены по принципу ERM/P-системы, которые обеспечивают планирование и управление всеми ресурсами предприятия. Однако средства оптимизации управленческих решений в указанных выше и других системах морского бизнеса применяются не к управлению производственной деятельностью, а к сопутствующим задачам, таким как техническое управление работой судов, техобслуживание и ремонт судов, фрахтование, управление инвестициями и др.

Применение экономико-математических методов для оптимального планирования непосредственно коммерческой работы судов встречается редко и ограничивается использованием стандартных программ линейного программирования без коадаптации с профессиональным опытом оператора. Чтобы перейти к выработке действительно оптимальных планов, ответственное лицо, принимающее решения, должно располагать профессиональным набором образов и моделей прогнозируемой обстановки, включающих представление о решаемой задаче, о возможных последствиях действий, а также знания о запасах ресурсов для выработки управляющих воздействий. В этих условиях потребуются создание и решение нетривиальных оптимизационных моделей. Чаще всего управленцы, даже обладающие способностями к выполнению таких работ творческого характера, не имеют возможности адекватно сформулировать и решить многоуровневую математическую модель в условиях оперативной обстановки. Для обеспечения работы кибернетической системы на этом уровне потребуются применение в ее работе схемы гибридного интеллекта, обеспечивающего адаптацию естественных, искусственных и комбинированных систем на основе общих законов их функционирования, т. е., в конечном счете, использование когнитивных технологий.

В настоящей работе показано, как с помощью когнитивной технологии можно расширить оптимизационные возможности оператора морских перевозок без существенного повышения сложности его деятельности.

Когнитивный алгоритм оптимизации решений

Для функционирования АСВБ, включающей в себя средства оптимизации управляющих решений, важно то, что в ней когнитивная структура позволяет в системе распределенного знания объединить профессиональные знания специалистов и информационные средства машинных баз данных. Одним из примеров организации когнитивного алгоритма в АСВБ является разработка и внедрение серии оригинальных математических моделей, предназначенных для решения оптимизационных задач, часто встречающихся в практике планирования и оперативного регулирования работы флота судоходной компании. В монографии [2] описано несколько таких моделей. Среди них модель оптимизации перевозок грузов разнотипными судами на нескольких схемах движения при отсутствии единого базового порта [2, п. 7.3.2]. Условия этой задачи в эксплуатационной практике работы в рамках долгосрочного контракта осложняются тем, что схемы движения судов могут не иметь пунктов пересечения. Целью задачи является установление необходимого количества судов каждого типа и закрепление их за определенными в ходе решения схемами движения. Полученное решение должно обеспечить максимальную эффективность процесса морской перевозки.

Для достижения этой цели с соблюдением всех перечисленных в задании условий разработана нестандартная математическая модель¹ расстановочного вида с двумя типами переменных —

¹ Автор математической модели и алгоритма ее решения канд. техн. наук, доц. Т. А. Вепринская.

целочисленными и непрерывными. Целевая функция Z представляет собой суммарную прибыль от реализации всех перевозок и записывается в форме

$$Z = \sum_i \sum_j \sum_k \Pi_{ijk} x_{ijk} - \sum_i \sum_j \sum_k f_{ijk} y_{ijk} \rightarrow \max, \quad (1)$$

где Π_{ijk} — прибыль за рейс от перевозки k -го груза i -м типом судна по схеме j ; x_{ijk} — целочисленная переменная: количество рейсов i -го судна по j -й схеме с k -м грузом; y_{ijk} — непрерывная переменная: количество недозавезенного k -го груза i -м типом судна по схеме j ; f_{ijk} — прибыль от перевозки одной тонны k -го груза i -м типом судна по схеме j .

В модель включены шесть видов ограничений (по бюджету времени эксплуатации судов, по заданным количествам перевозимого груза, а также ограничения, связанные с условиями и возможностями перевозки грузов, в том числе с возможностью перевозить по любой схеме количество груза, не строго равное заданному объему, вплоть до полного ее расформирования). Правильная запись системы ограничений требует немалых математических навыков.

Особенность решения этой модели основана на допущении о заранее организованных схемах движения. Однако даже при таком упрощении первоначальной постановки задачи модель имеет достаточно большую размерность, что вызывает существенные неудобства при ее решении. Вопрос о построении схем движения тоннажа решается отдельно, так как включение этого аспекта задачи в модель привело бы к непомерному увеличению размерности (количество переменных равно $2ijk$) и столь же большому росту объема и продолжительности подготовительной работы. К тому же с увеличением количества переменных увеличивается и чувствительность решения к изменению внешних факторов, т. е. исходных данных, что нарушает устойчивость оптимального плана.

Когнитивный алгоритм решения модифицированной расстановочной модели обеспечивает согласованную оптимизацию двух задач: построение оптимальных схем движения тоннажа и оптимизацию расстановки флота и выполняется в два этапа.

1-й этап оптимизации — построение схем движения тоннажа — основан на решении транспортной задачи, где ресурсами выступает свободный тоннаж, потребностями — его недостаток, а показателем эффективности — расстояния между портами. Критерием эффективности выбирается $\min$ суммарных балластных пробегов.

В общем виде математическая модель транспортной задачи в этой постановке записывается следующим образом:

$$\left. \begin{aligned} \forall_i = 1, \dots, m : \sum_{j=1}^n x_{ij} &= a_i; \\ \forall_j = 1, \dots, n : \sum_{i=1}^m x_{ij} &= b_j; \\ Z = \sum_{i=1}^m \sum_{j=1}^n l_{ij} x_{ij} &\rightarrow \min, \end{aligned} \right\} \quad (2)$$

где a_i — ресурс i -го порта; b_j — потребность j -го порта; l_{ij} — расстояние между портами.

Параметр управления x_{ij} — количество тоннажа в балласте, следующего из i -го порта с избытком тоннажа в j -й порт с недостатком тоннажа.

Модель транспортной задачи решается машинным методом с помощью пакета оптимизационных программ. На основе полученного оптимального решения составляется оптимальный план освоения тоннаже-потоков с учетом балластных переходов и переходов в грузу.

2-й этап оптимизации — расстановка флота — состоит в закреплении выбранных судов-представителей за конкретными схемами движения с позиции избранного критерия оптимальности. В качестве критерия оптимальности принимается максимум прибыли по сумме всех рейсов. Этот критерий, учитывая особенности различных типов судов, позволяет сопоставить по эффек-

тивности варианты их использования на различных схемах. Задача формулируется в терминах линейного программирования.

В общем виде математическая модель расстановочной задачи записывается следующим образом:

$$\left. \begin{aligned} \forall_i = 1, \dots, m: \sum_{j=1}^n t_{ij} x_{ij} &\leq T_i; \\ \forall_j = 1, \dots, n: \sum_{i=1}^m P_{ij} x_{ij} &= Q_j; \\ Z = \sum_{i=1}^m \sum_{j=1}^n \Pi_{ij} x_{ij} &\rightarrow \max, \end{aligned} \right\}; \quad (3)$$

где t_{ij} — время кругового рейса;

T_i — бюджет времени i -го типа судна;

P_{ij} — загрузка i -го судна по j -й схеме;

Q_j — количество груза, которое должно быть перевезено по j -й схеме (всё количество груза по каждой схеме);

Π_{ij} — прибыль от работы i -го судна на j -й схеме;

x_{ij} — количество рейсов i -го типа судна при работе на j -й схеме.

Машинное решение этой модели с помощью оптимизационной программы LPX выдает дробные значения оптимального набора параметра управления x_{ij} — количества рейсов. Для получения целочисленных значений оптимального плана следует воспользоваться алгоритмом округления с учетом обязательного выполнения ограничений модели [2].

Применение алгоритма ручного округления значений $\{x_{ij}\}^{\text{opt}}$ позволяет помимо ограничений модели (3) использовать дополнительно возможности переброски груза с одной схемы на другую и с одного судна на другое для наиболее полной загрузки судов в каждом рейсе. Более того, в ходе процедуры округления неэффективные по эксплуатационным показателям схемы и суда могут быть исключены из плана, увеличивая тем самым оптимальное значение целевой функции (поскольку при этом в неявном виде в модель (3) добавляются оптимизирующие ограничения). В этом проявляется сущность когнитивного подхода: к формальному машинному процессу решения подключается работа естественного интеллекта специалиста, использующего свой практический опыт и профессиональные знания.

Когнитивная технология освобождает оператора от необходимости наличия у него специальной математической подготовки и требует лишь профессиональных знаний на инженерном уровне и опыта работы в компьютерной среде управления.

Системы управления судоходством по своей природе являются многоуровневыми, имеющими сложную иерархическую структуру. В такой структуре на первый план выдвигаются вопросы координации и согласования решений на различных уровнях. В условиях межуровневого согласования оптимизационная модель [14] представляется следующим образом:

$$\left. \begin{aligned} Z(x_1, \dots, x_n) &\rightarrow \text{extr}; \\ g_i(x_1, \dots, x_n) &\leq b, \quad \forall i = 1, \dots, m; \\ x_j &\in X_j, \quad \forall j = 1, \dots, n. \end{aligned} \right\} \quad (4)$$

Здесь $x = (x_1, \dots, x_n)$ описывает состояние системы в целом, а вектор x_j состояние его j -й подсистемы; $Z(x)$ — целевая функция системы; $g_i(x)$ — функция затрат ресурсов системы; X_j — локальное множество допустимых решений j -й подсистемы.

Модели типа (4) называют *моделями блочного типа*. В соответствии с принципами координации система механизмов межуровневого согласования определяется набором $\Sigma = \langle Z_0, \{Z_j\}, \pi \rangle$, где Z_0 — целевая функция центра; Z_j — локальные целевые функции подсистем A_j ; π — механиз-

мы согласования плановых решений. Эти механизмы могут быть реализованы по когнитивным технологиям.

Выводы

1. В представленной работе описаны лишь математическая модель и алгоритм когнитивной технологии решения одной из оптимизационных задач управления судоходством. Работоспособность этого алгоритма подтверждена решением многочисленных контрольных примеров, специально подобранных в рамках освоения перевозок грузов различных грузопотоков при отсутствии единого базового порта. Результаты тестирования позволяют рекомендовать предложенную методику для использования судоходными компаниями в работе систем автоматизации судоходства при решении именно этого рода задач, часто встречающихся в практике планирования и оперативного регулирования работы флота.

2. В целом представленная технология когнитивной оптимизации может быть применена и для более широкого круга задач, при более общих допущениях относительно схем движения тоннажа. В этом случае потребуются введение дополнительных ограничений в модель с целевой функцией типа (1), что потребует организации дополнительных исследований и разработок с участием профессиональных математиков.

3. Разработка и внедрение в работу АСВБ серии подобного рода коадаптированных оптимизационных моделей, в том числе многоуровневых, для типовых управленческих ситуаций приведет к превращению этих кибернетических систем в структуры с гибридным интеллектом.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Кипень Н. А. Экономика знаний промышленного предприятия: когнитивный аспект: Монография / Н. А. Кипень, В. П. Дудяшева. — М.: ИНФРА-М, 2014. — 118 с.
2. Прокофьев В. А. Управление работой морского флота / В. А. Прокофьев, Т. А. Вепринская. — Изд. 2-е, доп. — СПб.: Изд-во ГМА им. адм. С. О. Макарова, 2010. — 239 с.
3. Винер Н. Кибернетика, или управление и связь в животном и машине. 1948 – 1961 / Н. Винер. — 2-е изд. — М.: Наука; Гл. ред. изд. для зарубежных стран, 1983. — 344 с.
4. Прокофьев В. А. Интегрированные информационные системы управления судоходством / В. А. Прокофьев, Е. А. Перфильев // Опыт и пути решения научных проблем водного транспорта Сибири и Дальнего Востока: сб. научн. тр. — Новосибирск: Сибир. гос. ун-в. водн. трансп., 2016. — С. 158–164.
5. Адрианов А. А. Совершенствование принципов организации корпоративной информационной системы ро-ро линии / А. А. Адрианов // Эксплуатация морского транспорта. — 2011. — № 1. — С. 23–27.
6. Прокофьев В. А. Динамическая реализация транспортного логистического взаимодействия / В. А. Прокофьев // Труды Научно-технической конференции профессорско-преподавательского состава и курсантов ГМА им. адм. С. О. Макарова. — СПб.: Изд-во ГМА им. адм. С. О. Макарова, 2008. — С. 33–35.
7. Ипатов О. С. Архитектура распределенного комплекса мониторинга и управления движением судов по Северному морскому пути / О. С. Ипатов, А. А. Кобяков, А. М. Федоров, К. В. Лапшин // Известия ЮФУ. Технические науки. — 2015. — № 10 (171). — С. 106–117.
8. О'Лири Д. ERP системы. Современное планирование и управление ресурсами предприятия / Д. О'Лири. — М.: ООО «Вершина», 2004. — 272 с.
9. Комашинский В. И. Когнитивные системы и телекоммуникационные сети / В. И. Комашинский, Н. А. Соколов // Вестник связи. — 2011. — № 10. — С. 4–8.
10. Nair T. R. G. Transformation of networks through cognitive approaches / T. R. G. Nair, Abhijith, K. Sooda // Journal of Research & Industry. — 2009. — Vol. 1. — Is. 1. — Pp. 1–6.
11. Hamalainen S. LTE self-organising networks (SON): network management automation for operational efficiency / S. Hamalainen, H. Sanneck, C. Sartori. — John Wiley&Sons, Ltd, 2012. — 428 p.
12. Прокофьев В. Кибернетизация управления морским судоходным бизнесом / В. Прокофьев. — Изд. LAP LAMBERT Academic Publishing, 2016. — 79 с.
13. Венда В. Ф. О законе взаимной адаптации человека и машины / В. Ф. Венда // Вестник Академии Наук СССР. — 1985. — № 1. — С. 39–49.

14. Воевудский Е. Н. Экономико-математические методы и модели в управлении морским транспортом / Е. Н. Воевудский, Н. А. Коневцева, Г. С. Махуренко [и др.]. — М.: Транспорт, 1988. — 384 с.

REFERENCES

1. Kipen', N. A., and V. P. Dudyasheva. *Ekonomika znaniy promyshlennogo predpriyatiya: kognitivnyi aspekt: Monografiya*. M.: INFRA-M, 2014.
2. Prokof'ev, V. A., T. A. Veprinskaya. *Upravlenie rabotoi morskogo flota*. 2-d edition. SPb.: Izd-vo GMA, 2010.
3. Viner, N. *Kibernetika, ili upravlenie i svyaz' v zhivotnom i mashine. 1948-1961*. 2-d edition. M.: Nauka; Glavnaya redaktsiya izdaniy dlya zarubezhnykh stran, 1983.
4. Prokof'ev, V. A., and E. A. Perfil'ev. "Integrirovannye informatsionnye sistemy upravleniya sudokhodstvom." *Opyt i puti resheniya nauchnykh problem vodnogo transporta Sibiri i Dal'nego Vostoka: sb. nauchn. tr. Novosibirsk: sibir. gos. univ. vodn. transp.*, 2016: 158–164.
5. Adrianov, A. A. "Sovershenstvovanie printsiptov organizatsii korporativnoi informatsionnoi sistemy ro-ro linii." *Ekspluatatsiya morskogo transporta* 1 (2011): 23–27.
6. Prokof'ev, V. A. "Dinamicheskaya realizatsiya transportnogo logisticheskogo vzaimodeystviya." *Trudy Nauchno-tekhnicheskoi konferentsii PPS i kursantov GMA im. adm. S.O. Makarova*. SPb.: Izd-vo GMA, 2008: 33–35.
7. Ipatov, Oleg Sergeevich, Aleksandr Alekseevich Kobayakov, Aleksandr Mikhailovich Fedorov, and Kirill Vladimirovich Lapshin. "Distributed architecture of complex monitoring and traffic management along the northern sea route." *Izvestiya SFedU. Engineering sciences* 10(171) (2015): 106–117.
8. O'Liri, D. *ERP sistemy. Sovremennoe planirovanie i upravlenie resursami predpriyatiya*. M.: ООО «Vershina», 2004.
9. Komashinskii, V. I., and N. A. Sokolov. "Kognitivnye sistemy i telekommunikatsionnye seti." *Vestnik svyazi* 10 (2011): 4–8.
10. Nair, T. R. Gopalakrishnan, Abhijith, and Kavitha Sooda. "Transformation of networks through cognitive approaches." *Journal of Research & Industry* 1.1 (2009): 1–6.
11. Hämäläinen, Seppo, Henning Sanneck, and Cinzia Sartori. *LTE self-organising networks (SON): network management automation for operational efficiency*. John Wiley & Sons, 2012.
12. Prokof'ev, V. *Kibernetizatsiya upravleniya morskim sudokhodnym biznesom*. Izd. LAP LAMBERT Academic Publishing, 2016.
13. Venda, V. F. "O zakone vzaimnoi adaptatsii cheloveka i mashiny." *Vestnik Akademii Nauk SSSR* 1 (1985): 39–49.
14. Voevudskii, E. N., N. A. Konevtseva, G. S. Makhurenko, et al. *Ekonomiko-matematicheskie metody i modeli v upravlenii morskim transportom*. M.: Transport, 1988.

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРЕ

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

INFORMATION ABOUT THE AUTHOR

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

Статья поступила в редакцию 26 января 2017 г.

Received: January 26, 2017.

ВОДНЫЕ ПУТИ СООБЩЕНИЯ И ГИДРОГРАФИЯ

DOI: 10.21821/2309-5180-2017-9-3-524-536

STUDY OF OPTIONS FOR TOP HEAD OF DESIGNED GATEWAY OF BAGAEVSK WATERWORKS

A. M. Gapeev, G. G. Ryabov, T. Ju. Nychik

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

A research result of technical and operational parameters of variants of the top head constructions for the designed water low-pressure complex navigation gateway of the Bagaevsk's hydroelectric is present. The article considers such variants of the water-filling system of the chambers as both through short bypass galleries, filling from under the lowered segmented gates with curvilinear skin, through water galleries with a chamber of extinction under the threshold, from beneath the valve console gates, from under the flat lifting and lowering gates.

For each of the considered variants, a scheme for the upper head of the navigation lock, including filling elements, extinguishing devices, main and repair doors, as well as contours of reinforced concrete structures, has been developed. A comparative analysis of the considered options in accordance with the filling time, the average energy of the flow entering the lock chamber, the number of gates, the volume of concrete and the length of the upper head is presented.

The comparative analysis has shown that the upper heads with lower and cantilevered gates have a better flow capacity, whereas the heads with the gallery filling systems are considered to be the most metal-intensive ones, and they have the maximum length as well as the volume of concrete. The smallest head size has the option of filling through the wedges in the flat sliding gates, but it uses simple elements for extinguishing the energy of the flow.

It is noted that the final version of the upper head of the projected navigation lock of the Bagaevsk's hydroelectric complex should be accepted based on the results of laboratory hydrological studies that will allow assessing the quality of the filling system under the terms of parking conditions in a large-tonnage vessel and substantiate rational sluicing regimes for different groups of ships.

Keywords: navigation lock, water system of lock, filling system, an upper head, extinguishing elements, short circuitous galleries, flat sliding gates, slide valves, segment gates, gate valve, flat lifting and lowering the gate.

For citation:

Gapeev, Anatolii M., Georgii G. Ryabov, and Tatyana Yu. Nychik. "Study of options for top head of designed gateway of Bagaevsk waterworks." *Vestnik Gosudarstvennogo universiteta morskogo i rechnogo flota imeni admirala S.O. Makarova* 9.3 (2017): 524–536. DOI: 10.21821/2309-5180-2017-9-3-524-536.

УДК (626.4:626.421.4)001.2

ИССЛЕДОВАНИЕ ВАРИАНТОВ ВЕРХНЕЙ ГОЛОВЫ ПРОЕКТИРУЕМОГО ШЛЮЗА БАГАЕВСКОГО ГИДРОУЗЛА

А. М. Гапеев, Г. Г. Рябов, Т. Ю. Нычик

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

Приводятся результаты исследований технико-эксплуатационных показателей вариантов конструкций верхней головы для проектируемого низконапорного судоходного шлюза Багаевского гидроузла. В статье рассматриваются варианты системы наполнения камер через короткие обходные галереи, наполнение из-под опускных сегментных ворот с криволинейной обшивкой, через водопроводные галереи с камерой гашения под порогом, из-под клапанных консольных ворот, из-под плоских подъемно-опускных ворот, а также наполнение через отверстия в воротах. Для каждого из рассматриваемых вариантов разработана схема верхней головы шлюза, включающая элементы наполнения, гасительные устройства, основные и ремонтные ворота, а также контуры железобетонных конструкций. Представлен сравнитель-

ный анализ рассматриваемых вариантов по времени наполнения, средней энергии потока, поступающей в камеру шлюза, количеству ворот и затворов, объему бетона и длине верхней головы. Сопоставительный анализ показал, что предпочтение по мощности потока имеют верхние головы с опускными и консольными воротами, а наиболее металлоемкими считаются головы с галерейными системами наполнения, которые имеют наибольшую длину и объемы бетона. Наименьший размер головы имеет вариант наполнения через клинкет в плоских откатных воротах, но в нем использованы простые элементы для гашения энергии потока.

Отмечается, что окончательный вариант верхней головы проектируемого судоходного шлюза Багаевского гидроузла должен быть принят на основании лабораторных гидравлических исследований, которые позволят дать оценку качества системы наполнения по условиям стоянки в камере расчетного крупнотоннажного судна и обосновать рациональные режимы шлюзования для различных групп судов.

Ключевые слова: судоходный шлюз, система питания шлюза, система наполнения, верхняя голова, гасительные устройства, короткие обходные галереи, плоские откатные ворота, клинкет, сегментные ворота, клапанные ворота, плоские подъемно-опускные ворота.

Для цитирования:

Гапеев А. М. Исследование вариантов верхней головы проектируемого шлюза Багаевского гидроузла / А. М. Гапеев, Г. Г. Рябов, Т. Ю. Нычик // Вестник Государственного университета морского и речного флота имени адмирала С. О. Макарова. — 2017. — Т. 9. — № 3. — С. 524–536. DOI: 10.21821/2309-5180-2017-9-3-524-536.

Введение (Introduction)

В соответствии с Федеральной целевой программой «Развитие транспортной системы России (2010 – 2020 гг.) в настоящее время выполняется разработка проекта Багаевского гидроузла. Судопропускным сооружением данного комплекса гидротехнических сооружений является двухниточный судоходный шлюз, который по своим параметрам классифицируется как низконапорный с разницей при нормальных уровнях верхнего и нижнего бьефов в 3,7 м и при максимальных уровнях воды обеспеченностью 1 % – 0,2 м. В качестве расчетного судна принят танкер пр. 19614 водоизмещением 79200 кН.

Проектирование системы питания судоходных шлюзов осуществляется с учетом предъявляемых к ним требований [1], среди которых следующие:

- обеспечение безопасных условий шлюзования расчетных судов при минимально допустимом времени наполнения (опорожнения) камеры;
- простота конструкций, сравнительно невысокая металлоемкость ворот и затворов, величина их подъемного усилия и удобства в эксплуатации, влияющие на стоимость сооружения.

Разработка конструкций систем питания судоходных шлюзов выполняется также с учетом имеющегося опыта шлюзостроения [2] – [6] и эксплуатации [7], [8] подобных сооружений. При этом существующие конструкции могут выбираться в качестве аналогов. При определении характеристик систем питания также следует учитывать современные методы численного анализа [7] и возможности применения передовых технологий [10] – [12].

Для принятия взвешенного решения по выбору конструкции системы наполнения Багаевского судоходного шлюза необходимо разработать несколько вариантов конструкций верхней головы, особенности которых рассмотрены в данной работе.

Методы и материалы (Methods and Materials)

Безопасность пропуска судов через шлюзы непосредственно зависит от наличия элементов в системах питания, предназначенных для гашения энергии поступающего в камеру потока воды и равномерного распределения скоростей, а также от принятых режимов шлюзования, при которых обеспечивается равенство действующих на суда гидродинамических сил их нормативной величине [2], [13].

При проектировании низконапорных шлюзов с головной системой питания не всегда удается использовать эффективные гасительные устройства из-за наличия невысокой стенки падения или при её отсутствии. В этих случаях приходится использовать простые по составу и недоста-

точно эффективные гасительные устройства или устраивать их ниже отметки дна камеры шлюза, что приводит к увеличению объемов работ [14].

При выборе типа и конструкции ворот и затворов учитывают их надежность в работе, прочность и удобство в эксплуатации. Наиболее высокие требования предъявляются к рабочим воротам шлюзов, которые кроме гидродинамического воздействия [9] на них могут испытывать значительные нагрузки от навалов судов. Необходимо также учитывать возможность использования ворот не только по прямому назначению — для перекрытия судопропускного отверстия, но и для наполнения (опорожнения) камеры, в качестве аварийных или ремонтных. На выбор типа ворот оказывает влияние величина напора и соотношение между шириной камеры и высотой ворот [15].

В практике отечественного и зарубежного шлюзостроения нашли применение множество разновидностей головных систем питания для низконапорных шлюзов как галерейного, так и безгалерейного типа [4]. Конструктивные и эксплуатационные особенности отдельных разновидностей систем питания существующих шлюзов изложены в научных источниках [16], [17] и эти системы питания могут быть приняты для рассмотрения при проектировании новых шлюзов с конкретными напорами воды на камеру, её габаритами и условиями пропуска крупнотоннажных судов.

Результаты (Results)

При проектировании судоходного шлюза Багаевского гидроузла для рассмотрения были приняты шесть вариантов верхней головы:

- вариант 1 — наполнение камеры шлюза через короткие обходные галереи;
- вариант 2 — наполнение из-под опускных сегментных ворот с криволинейной обшивкой;
- вариант 3 — наполнение через водопроводные галереи с камерой гашения под порогом;
- вариант 4 — наполнение из-под клапанных консольных ворот;
- вариант 5 — наполнение из-под плоских подъемно-опускных ворот;
- вариант 6 — наполнение через отверстия в воротах.

Верхняя голова проектируемого шлюза с наполнением через короткие обходные галереи (вариант 1 (рис. 1)) в конструктивном отношении аналогична шлюзу № 14 Цимлянского гидроузла, шлюзам № 33, 34 Астраханского гидроузла и шлюзу № 1 Константиновского гидроузла, имеющим близкие по размерам полезные габариты камер (145 × 18 м) и глубины на порогах свыше 4,0 м, достаточные для пропуска через них крупнотоннажных судов типа «Волго-Дон» и «Волго-Нефть».

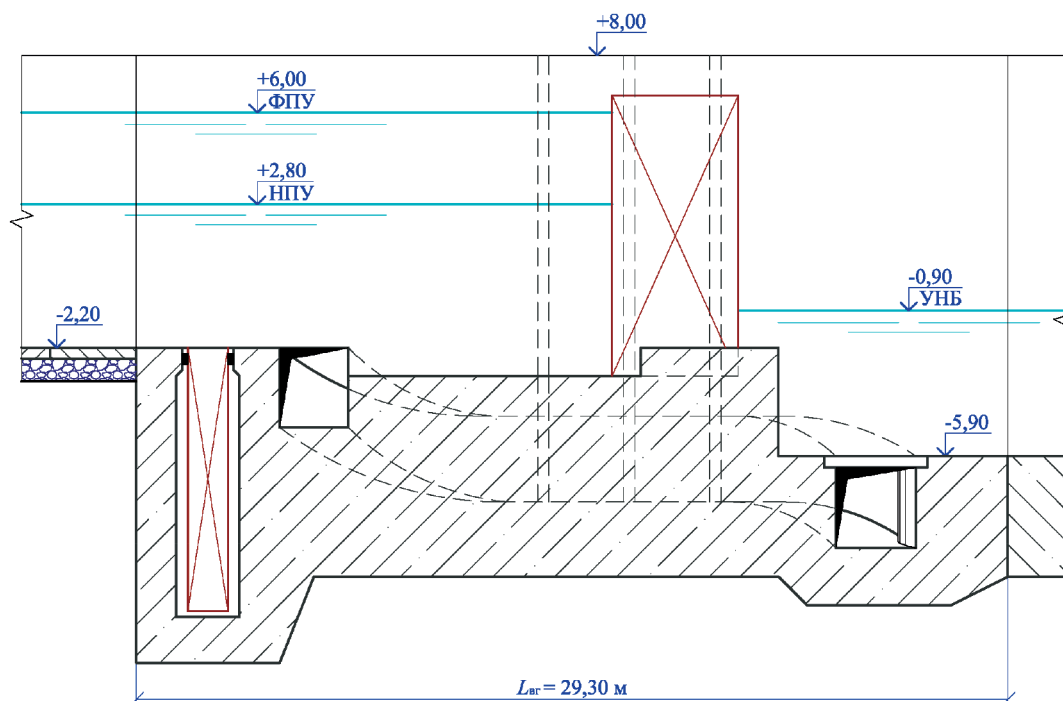


Рис. 1. Верхняя голова шлюза с короткими обходными галереями (вариант 1)

Однако в проектируемом шлюзе, в отличие от аналогов, предлагается устроить отдельный устой по оси камеры толщиной 3 – 4 м для гашения энергии потока, балку-выступ высотой до 1 м на вогнутых гранях выходных отверстий галерей для выравнивания изотак скоростей в их поперечных сечениях, и перекрыть выходные траншеи горизонтальной балочной решеткой с неравномерным шагом отверстий между балками, увеличивающимся от выхода отверстий к разделительному устою. Основным назначением горизонтальной балочной решетки является частичное гашение скоростей потока и их равномерное распределение по ширине при выходе в камеру шлюза.

Следует отметить, что предлагаемые устройства для гашения энергии потока считаются простыми и могут оказаться недостаточными [18] по условиям стоянки в камере шлюза крупнотоннажного судна. Повышения эффективности гасительных устройств в системах питания галерейного типа можно достигнуть за счет уменьшения интенсивности поступающего расхода воды в камеру шлюза при устройстве двух-трех выходных отверстий галереи, но это приведет к усложнению конструкции голов и увеличению их длины. К недостаткам рассматриваемой системы наполнения можно отнести высокую металлоемкость ворот и затворов (два типа ворот и шесть затворов водопроводных галерей для одной нитки судоходного шлюза).

Наполнение камеры из-под сегментных опускных ворот с криволинейной обшивкой (вариант 2) рассматривается по аналогии с использованием этой схемы для судоходного шлюза «Spandau» (Германия). Принятый вариант верхней головы (рис. 2) отличается от аналога несколько большим объемом камеры гашения и отсутствием двух стенок-выступов перед вертикальной решеткой, поскольку они отклоняют поток воды в сторону камеры шлюза, препятствуя равномерному распределению скоростей по глубине.

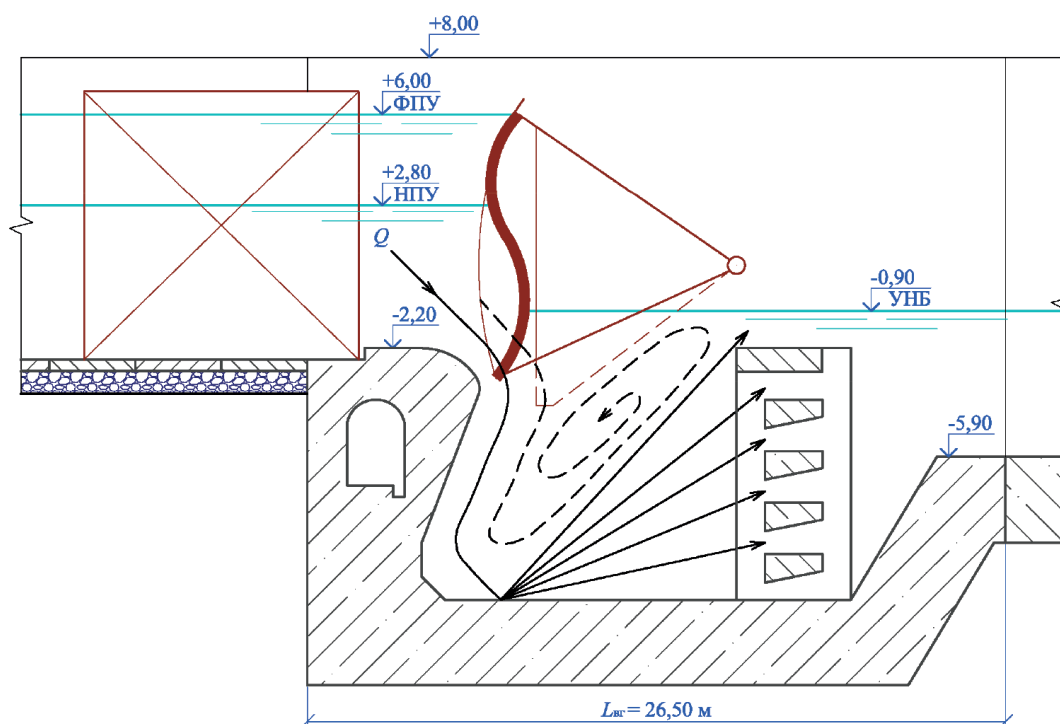


Рис. 2. Верхняя голова шлюза с сегментными опускными воротами (вариант 2)

В рассматриваемой схеме наполнение производится через отверстие высотой до 1 м, образуемое при опускании ворот между порогом с закругленной кромкой и вогнутым очертанием сегмента, что позволяет обеспечить плавное направление потока и более высокую пропускную способность отверстия. При этом положение ворот при опускании совпадает с его направлением в судоходное положение и в этом случае можно ожидать сокращения времени шлюзования. Сег-

ментные ворота имеют простую конструкцию, небольшое подъемное усилие, они надежны в работе, могут использоваться в качестве рабочих и аварийных, но неудобны в эксплуатации из-за узлов вращения, периодически находящихся в воде [14].

Разновидность системы наполнения через водопроводные галереи с камерой гашения под порогом реализована на шлюзах Беломорско-Балтийского канала при напорах на камеру от 4 до 8 м и считается несовершенной из-за неэффективности гасительных устройств [19]. Наполнение в этих шлюзах производится с использованием цилиндрических затворов через вертикальные галереи круглого сечения, а гашение скорости потока — за счет соударения встречных потоков, уширения на выходе и отклоняющей стенки-выступа в камере шлюза.

В верхней голове проектируемого шлюза (вариант 3 (рис. 3)) наполнение камеры предлагается осуществлять через короткие продольные галереи в устоях при помощи плоских затворов, а гашение энергии потока под порогом — за счет наличия колодца, разделительной стенки по оси шлюза, уширения на выходе потока и двух балок вертикальной распределительной решетки.

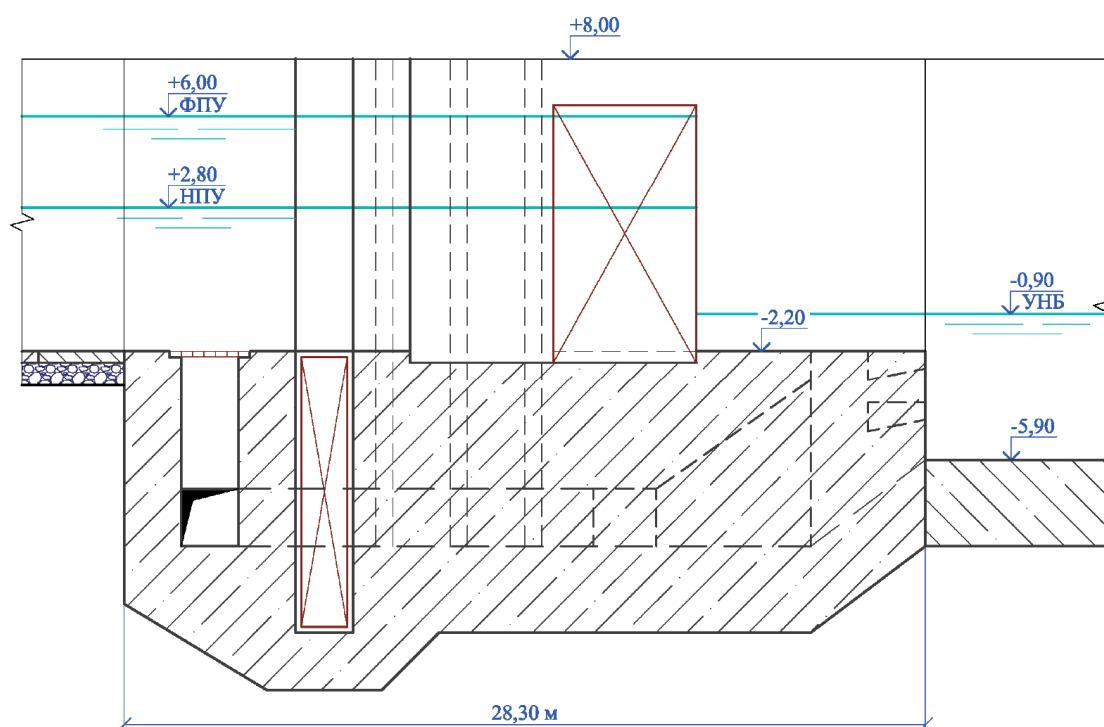


Рис. 3. Верхняя голова шлюза с обходными галереями и камерой гашения под порогом (вариант 3)

Рассматриваемая галерейная схема наполнения камеры является более сложной в конструктивном отношении по сравнению со схемой первого варианта, но отличается от неё несколько большим составом элементов для гашения энергии потока и имеет те же недостатки: высокую металлоемкость ворот и затворов.

Система наполнения камеры из-под клапанных консольных ворот (вариант 4 (рис. 4)) впервые была реализована в шлюзе «Дубой» с напором 2,4 м при реконструкции Днепро-Бугского канала [20]. Она характеризуется достаточно большим, по сравнению с ранее рассмотренными схемами, составом элементов для эффективного гашения энергии потока. В верхней голове проектируемого шлюза для Багаевского гидроузла (см. рис. 4) для гашения энергии потока предусмотрено устройство гасительного колодца ниже отметки дна камеры глубиной до 3 м, плита перекрытия и вертикальная балочная решетка с неравномерным шагом отверстий, увеличивающимся снизу-вверх. Наполнение производится при повороте консоли клапана длиной около 1,5 м, с углом её наклона 30°, позволяющей открыть на полную высоту водопропускные отверстия (до 1 м) и направить поток для гашения энергии на днище головы в колодце.

Поворот клапана осуществляется в сторону верхнего бьефа на угол β (в пределах $40 - 45^\circ$) и его направление совпадает с положением ворот в судоходном положении. Такие особенности затвора требуют увеличения его высоты примерно на 1,5 – 2 м, а в судоходном положении он размещается на опорных подушках.

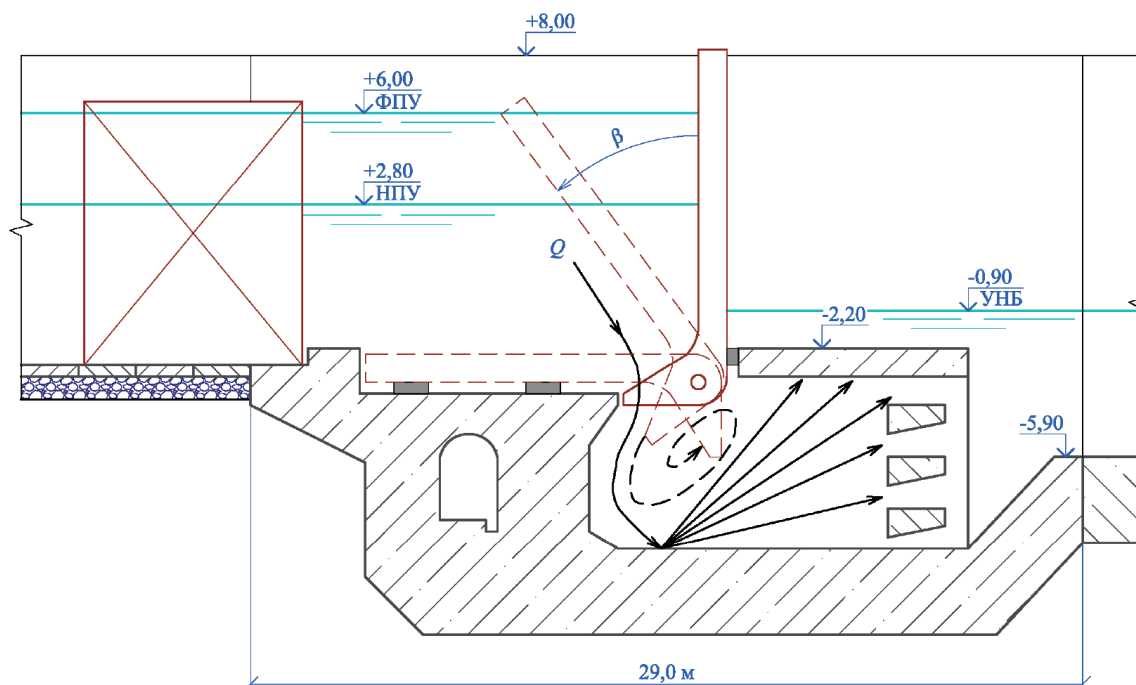


Рис. 4. Верхняя голова шлюза с клапанными воротами (вариант 4)

Клапанные ворота имеют простую конструкцию, небольшое подъемное усилие, они надежны в работе, могут выполнять функцию рабочих и аварийных ворот, но неудобны в эксплуатации из-за наличия опор вращения, постоянно находящихся под водой.

Наполнение камеры из-под плоских подъемно-опускных ворот (вариант 5 (рис. 5)) считается наиболее рациональной схемой питания из-за простоты конструкций, компактного расположения, наличия достаточного количества элементов для гашения энергии потока и равномерного распределения скоростей, а также удобств в эксплуатации [21], [22]. В России эта схема нашла применение при строительстве судоходных шлюзов преимущественно для средних напоров: шлюзы Волго-Донского и Волго-Балтийского каналов, Саратовские, Городецкие и др. [23].

При проектировании верхней головы с наполнением из-под плоских подъемно-опускных ворот для низконапорного шлюза потребовалось устройство колодца глубиной до 9 м для размещения в нем гасительных элементов (см. рис. 5). Для гашения энергии потока, как и в ранее рассмотренной схеме с клапанными воротами, приняты плита перекрытия и вертикальная балочная решетка, но эффективность их работы будет значительно выше из-за глубины гасительного колодца и большего числа балок решетки.

Плоские ворота считаются прочными и надежными в работе, используются не только для наполнения камер, но и в качестве рабочих и аварийных. Рассматриваемый вариант верхней головы при сравнительно малой её длине из-за глубины колодца потребует увеличения объемов строительных работ.

Системы наполнения камер судоходных шлюзов через отверстия в воротах (клинкеты) широко применялись при строительстве первых шлюзованных водных путей на малых реках России [3]. Они рассчитывались на пропуск характерного для того времени мелкотоннажного флота без устройства гасительных элементов (системы наполнения). В дальнейшем с целью увеличе-

ния пропускной способности водных путей стали возводить шлюзы с комбинированной головной системой питания, используя короткие обходные галереи и отверстия в воротах (шлюзы на р. Оке, Северском Донце и Кочетовский шлюз на Нижнем Дону). Последний шлюз с клинкетным наполнением — вторая нитка Константиновского гидроузла, построен в 1983 г. и рассчитан на пропуск скоростных судов. Самыми большими по размерам камерами для пропуска крупнотоннажных судов считаются шестикамерные двухниточные шлюзы Пермского гидроузла ($240 \times 30 \times 6$ м при среднем напоре на камеру 3,3 м).

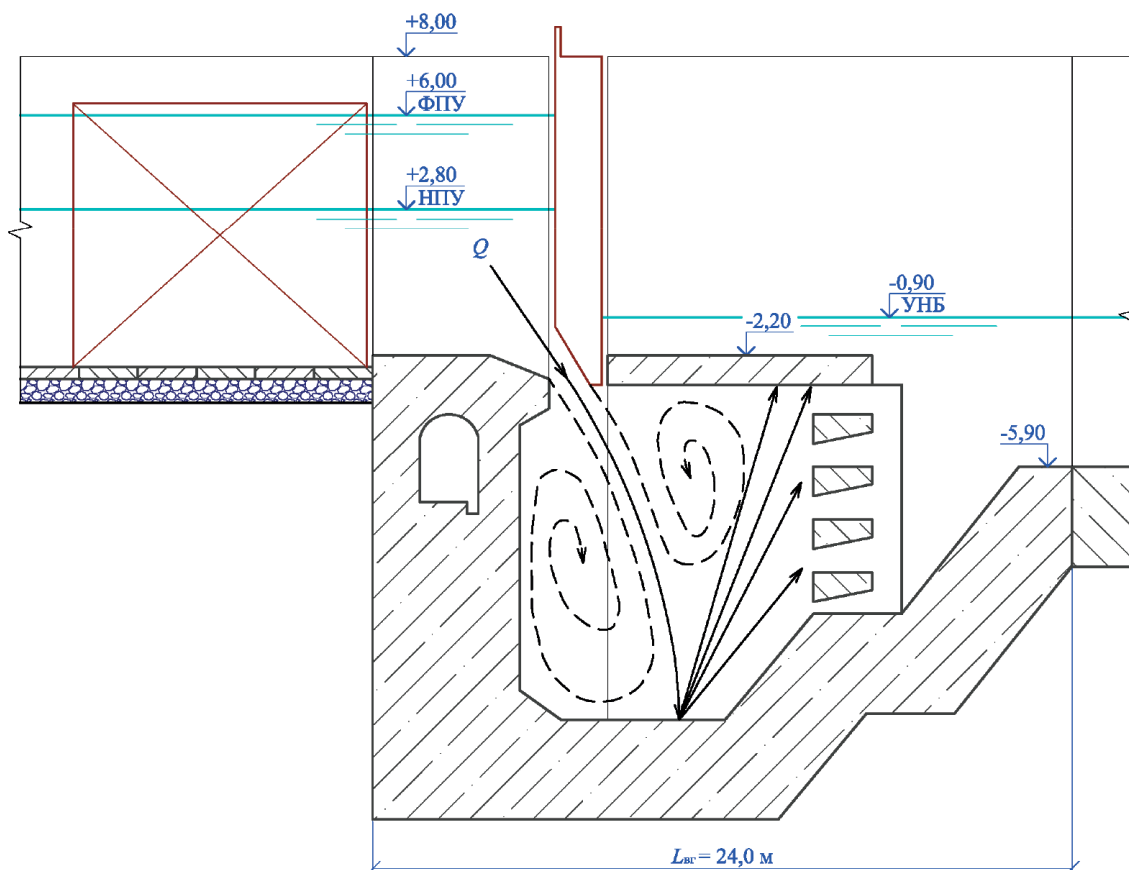


Рис. 5. Верхняя голова шлюза с подъемно-опускными воротами (вариант 5)

В современных условиях, в связи со значительным увеличением грузоподъемности судов и большими сроками эксплуатации в шлюзах с клинкетным наполнением при их реконструкции, стали использовать другие системы питания. Так, например, после реконструкции пяти шлюзов на р. Москва в 1972 г. при напорах 2,4 – 3,2 м для наполнения камер была принята система питания из-под полноповоротных уравновешенных сегментных ворот. В 1975 г. эта же схема была реализована и при возведении Николаевского гидроузла. Следует отметить, что система питания с использованием полноповоротных сегментных ворот, несмотря на некоторые эксплуатационные удобства, требует увеличения размеров голов и в ней отсутствуют устройства для эффективного гашения скорости потока. В настоящее время при реконструкции шлюзов Днепро-Бугского канала на р. Припять стали применять более совершенные системы питания при наличии эффективных гасительных устройств.

Возможность использования систем питания с клинкетным наполнением камер может быть рассмотрена при устройстве перед отверстиями отдельных элементов для гашения потока, которые реализованы на некоторых шлюзах Германии [14]. Для наполнения камер через клинкетные отверстия используют в основном двухстворчатые или откатные ворота. При этом последние применяют в широких шлюзах малого напора при соотношениях полезной ширины камеры к высоте

ворот ($B_{\text{ПК}}/H_{\text{в}}$) в пределах 3 – 4 [15]. Отверстия в воротах чаще всего перекрывают плоскими, дисковыми или сегментными затворами.

На рис. 6 представлен вариант использования откатных ворот для шлюзов Багаевского гидроузла с клинкетным наполнением камеры при устройстве гасителей и транспортного перехода. Заглубление откатных ворот относительно днища головы, из-за необходимости размещения гасителей перед клинкетами, принято в пределах 2 м, а толщина при устройстве плоских затворов — около 2,5 – 3 м. При этом рекомендуемое условие их использования не обеспечивается и оказалось равным $B_{\text{ПК}}/H_{\text{в}} = 1,5$.

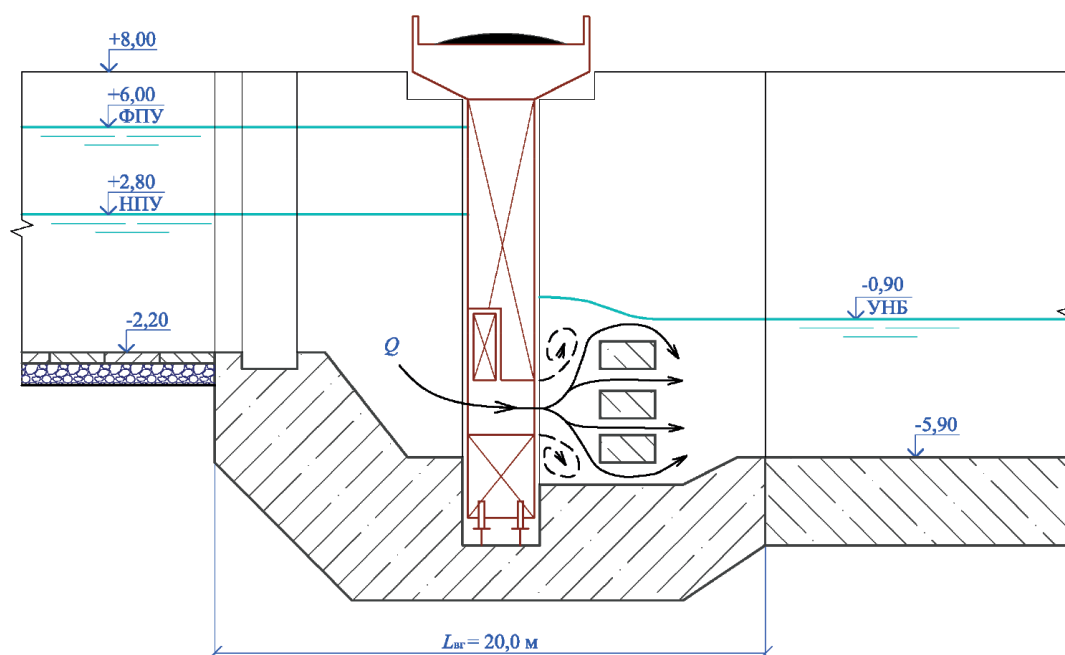


Рис. 6. Верхняя голова шлюза с отверстиями в откатных воротах (вариант 6)

Для гашения энергии потока, поступающего в камеру шлюза при открытии отверстий, предусмотрена установка трех балок прямоугольного сечения размерами 1×2 м, которые обеспечивают частичное гашение скорости потока и могут оказаться недостаточными по условиям стоянки крупнотоннажного судна. Ширина транспортного перехода и высота подмостового перехода принимаются в зависимости от типа перехода и класса сооружения. При пропуске только автомобильного транспорта на территорию судоходных шлюзов ширина перехода должна составлять не менее 6 м.

Обсуждение (Discussion)

Сравнительный анализ рассматриваемых систем наполнения выполнен по времени наполнения, средней энергии потока, поступающей в камеру шлюза, количеству ворот и затворов для 1 камеры, объему бетона и длине верхней головы. Показатели рассчитаны для одной нитки проектируемого шлюза с полезными размерами камеры $155 \times 18 \times 5$ м и представлены в таблице (с. 532).

Предпочтение по мощности потока, как видно из таблицы, имеют верхние головы с опускаемыми и консольными воротами, а наиболее металлоемкими считаются головы с галерейными системами наполнения (варианты 1 и 3) и они же имеют наибольшую длину (до 30 м) и объемы бетона: примерно в 1,5 – 2 раза больше по сравнению с безгалерейными системами питания. Наименьший размер головы, как и ожидалось, имеет вариант наполнения через клинкетные в плоских откатных воротах: около 20 м, но в нем использованы простые элементы для гашения энергии потока.

Сравнительные показатели рассматриваемых вариантов верхней головы шлюза

Вариант	Система наполнения камеры	Элементы для гашения энергии потока	Время наполнения, T , с (мин)	Средний расход воды, $Q_{\text{ср}} = \frac{V}{T}$, $\text{м}^3/\text{с}$	Средняя энергия потока, $N_{\text{ср}} = 9,81 Q_{\text{ср}} \frac{H_k}{2}$, тыс. кВт	Количество ворот и затворов, ед. (для одной камеры)	Объём бетона, м^3	Длина головы, м
1	Через обходные галереи с устоем по оси шлюза	Устой, балка-выступ, горизонтальная решетка над траншеями	465 (7,75)	25,57	0,46	Рабочие двухстворчатые, аварийно-ремонтные подъёмные, шесть плоских затворов галерей	8600	29,3
2	Из-под опускаемых сегментных ворот с криволинейной обшивкой	Гасительный колодец глубиной 5,0 м, пять балок вертикальной решетки	537 (8,95)	22,11	0,40	Рабочие (аварийные) сегментные, ремонтные двухстворчатые	5100	26,5
3	Через обходные галереи с камерой гашения под порогом	Колодец под порогом $h = 3$ м, устой, уширение на выходе, две балки решетки	506 (8,43)	23,46	0,43	Рабочие двухстворчатые, аварийно-ремонтные подъёмные, две плоских затворов галерей	8500	28,3
4	Из-под консольных клапанных ворот	Гасительный колодец $h = 3$ м, плита перекрытия, три балки решетки	570 (9,50)	20,83	0,38	Рабочие (аварийные) клапанные, ремонтные двухстворчатые	5500	29,0
5	Из-под плоских подъемно-опускных ворот	Гасительный колодец $h = 9$ м, плита перекрытия, четыре балки вертикальной решетки	473 (7,89)	25,08	0,46	Рабочие (аварийные) плоские, подъемно-опускные, ремонтные двухстворчатые	5000	24,0
6	Через отверстия в откатных воротах	Колодец $h = 1$ м, три балки вертикальной решетки	472 (7,87)	25,15	0,46	Рабочие (аварийные) откатные, ремонтные в виде багпорта	4600	20,0

Заключение (Conclusion)

Система наполнения судоходного шлюза, в том числе Багаевского гидроузла, является важнейшим элементом процесса шлюзования судов и оказывает значительное влияние на его пропускную способность.

Среди разновидностей систем наполнения были выделены галерейные схемы, с наполнением из-под верхних рабочих ворот, а также с клинкетам. Для каждой из рассмотренных систем были отмечены преимущества и недостатки, которые отражаются как на эксплуатационных качествах шлюза, так и на объеме капиталовложений.

В результате исследований оказалось, что наиболее эффективной по критерию времени наполнения является система с использованием коротких обходных галерей, а с точки зрения металлоемкости — система наполнения камеры из-под клапанных ворот. Также положительно отмечена система наполнения из-под сегментных ворот, которая, несмотря на большее время наполнения, позволяет значительно сократить процесс шлюзования за счет раннего опускания ворот.

Окончательный вариант верхней головы проектируемого судоходного шлюза Багаевского гидроузла необходимо принимать по результатам лабораторных гидравлических исследований, которые позволят дать оценку качества системы наполнения по условиям стоянки в камере расчетного крупнотоннажного судна и обосновать рациональные режимы шлюзования для различных групп судов.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. СП 101.13330.2012. Подпорные стены, судоходные шлюзы, рыбопропускные и рыбозащитные сооружения. Актуализированная редакция СНиП 2.06.07-87: норм.-техн. материал. — М.: ООО «Аналитик», 2012. — 68 с.
2. Михайлов А. В. Судоходные шлюзы / А. В. Михайлов. — М.: Транспорт, 1966. — 340 с.
3. Кононов В. В. Строительство и реконструкция судоходных гидротехнических сооружений в России в 20 веке (исторический обзор) / В. В. Кононов // Водные пути и гидротехнические сооружения: сб. науч. тр. — СПб.: Изд-во СПбГУВК, 2002. — С. 165–173.
4. Гапеев А. М. Системы питания судоходных шлюзов водой / А. М. Гапеев, В. В. Кононов. — СПб.: ГУМРФ имени адмирала С. О. Макарова, 2013. — 268 с.
5. Verelst K. Hydraulic design of a filling emptying system for the new royers lock in the port of antwerp (belgium) / K. Verelst, J. Vercruysse, T. De Mulder, T. Fahner, W. De Cock, H. Pauwels // E-proceedings of the 36th IAHR World Congress. 28 June – 3 July, 2015. — IAHR, 2015.
6. Stocstill R. L. Hydraulic Evaluation of Marmet Lock Filling and Emptying System, Kanawha River, West Virginia / R. L. Stocstill. — Engineer research and development center Vicksburg MS coastal and hydraulics Lab, 2015. — №. ERDC/CHL-TR-15-2. — 58 p.
7. Середович В. А. Система наблюдений за состоянием сооружений Новосибирского шлюза и пути её совершенствования / В. А. Середович, С. С. Студенков, Г. Н. Ткачева // Интерэкспо Гео-Сибирь. — 2006. — Т. 3. — № 2. — С. 124–130.
8. Малаханов В. В. Реконструкция гидравлической системы питания Рыбинского шлюза / В. В. Малаханов, С. Н. Левачев, Л. А. Шурухин, И. А. Крюков // Гидротехническое строительство. — 2011. — № 10 — С. 29–36.
9. Липатов И. В. Математическая модель гидродинамического воздействия потока на рабочие ворота судоходных шлюзов / И. В. Липатов // Проблемы прочности и пластичности. — 2005. — № 67. — С. 151–161.
10. Морозов В. Н. Комплексная система автоматизации судопропуска Шекснинского гидроузла / В. Н. Морозов, И. Л. Краснощеков, Л. А. Павлович [и др.] // Известия Самарского научного центра Российской Академии Наук. — 2015. — Т. 17. — № 2–4 — С. 843–850.
11. Гапеев А. М. Конструктивные, гидравлические и эксплуатационные особенности систем питания камер судоходных шлюзов для малых рек / А. М. Гапеев, П. А. Гарибин // Водные пути и гидротехнические сооружения: сб. науч. тр. — СПб.: Изд-во СПбГУВК, 2002. — С. 125–135.

12. Рябов Г. Г. Исследование режимов наполнения шлюза с дополнительным переливом поверх опускных ворот / Г. Г. Рябов // Журнал Университета водных коммуникаций. — 2011. — 4. — С. 8–16.
13. Гапеев А. М. Влияние отдельных элементов верхней головы шлюза на гидравлические параметры потока / А. М. Гапеев // Гидротехнические сооружения и путевые работы на внутренних водных путях для судоходства. — Л.: ЛИВТ, 1984. — С. 148–155.
14. Михайлов А. В. Головные системы питания судоходных шлюзов и их расчет / А. В. Михайлов. — М.: Минречфлот СССР, 1951. — 172 с.
15. Семанов Н. А. Судоходные каналы, шлюзы и судоподъемники / Н. А. Семанов, Н. Н. Варламов, В. В. Баланин. — М.: Транспорт, 1970. — 352 с.
16. Гапеев А. М. Анализ эксплуатационных качеств наполнения камер судоходных шлюзов / А. М. Гапеев // Высшее образование в современных условиях. — Ч. II. — СПб.: СПбГУВК, 1996. — С. 164–165.
17. Гапеев А. М. Конструктивные, гидравлические и эксплуатационные особенности систем питания камер судоходных шлюзов для малых рек / А. М. Гапеев, П. А. Гарибин // Водные пути и гидротехнические сооружения: сб. тр. — СПб.: Изд-во СПбГУВК, 2002. — С. 125–135.
18. Гапеев А. М. Определение размеров и взаимного расположения элементов системы наполнения камер судоходных шлюзов из-под плоских подъемно-опускных ворот / А. М. Гапеев // Вестник Государственного университета морского и речного флота имени адмирала С. О. Макарова. — 2012. — № 2. — С. 34а–40.
19. Полилова А. И. Уменьшение гидродинамической силы при наполнении шлюза / А. И. Полилова // Речной транспорт. — 1972. — № 3. — С. 43.
20. Гапеев А. М. Обоснование системы наполнения камеры судоходного шлюза «Дубой» Днепро-Бугского канала / А. М. Гапеев, Г. Г. Рябов // Водные пути и гидротехнические сооружения: сб. тр. — СПб.: Изд-во СПбГУВК, 2007. — С. 84–95.
21. Гапеев А. М. Анализ существующих теоретических исследований по определению размеров водопропускных отверстий, образованных элементами головных систем питания камер судоходных шлюзов / А. М. Гапеев, А. В. Подрешетникова // Вестник Государственного университета морского и речного флота имени адмирала С. О. Макарова. — 2014. — № 4 (26). — С. 95–100.
22. Сергеев А. В. Об особенностях расчета плоских подъемно-опускных ворот судоходных шлюзов при реконструкции / А. В. Сергеев, И. И. Крылов // Известия высших учебных заведений. Серия: Строительство. — 1999. — № 4. — С. 95–97.
23. Гапеев А. М. Строительство судоходных гидротехнических сооружений в России (К 200-летию начала подготовки инженеров в области гидротехнического строительства) / А. М. Гапеев, В. В. Кононов // Гидротехническое строительство. — 2009. — № 10. — С. 11–17.

REFERENCES

1. Set of rules SP 101.13330.2012. Retaining walls, navigation locks, fish passing and fish protection facilities. М.: ООО «Analitik», 2012.
2. Mikhailov, A.V. *Sudokhodnye shlyuzy*. М.: Transport, 1966.
3. Kononov, V. V. “Stroitel'stvo i rekonstruktsiya sudokhodnykh gidrotekhnicheskikh sooruzhenii v Rossii v 20 veke (istoricheskii obzor).” *Vodnye puti i gidrotekhnicheskii sooruzheniya: sbornik nauchnykh trudov*. SPb.: Izd-vo SPbGUVK, 2002: 165–173.
4. Gapeev, A. M., and V. V. Kononov. *Sistemy pitaniya sudokhodnykh shlyuzov vodoi*. SPb.: GUMRF im. admirala S.O. Makarova, 2013.
5. Verelst, Kristof, Jeroen Vercruysse, Tom De Mulder, Tom Fahner, Wim De Cock, and Hans Pauwels. “Hydraulic design of a filling emptying system for the new royers lock in the port of antwerp (belgium).” *E-proceedings of the 36th IAHR World Congress. 28 June – 3 July, 2015*. IAHR, 2015.
6. Stocstill, R. L. *Hydraulic Evaluation of Marmet Lock Filling and Emptying System, Kanawha River, West Virginia*. Engineer research and development center Vicksburg MS coastal and hydraulics Lab, 2015. №. ERDC/CHL-TR-15-2.
7. Seredovich, V. A., S. S. Studenkov, and G. N. Tkacheva. “Sistema nablyudenii za sostoyaniem sooruzhenii Novosibirskogo shlyuza i puti ee sovershenstvovaniya.” *Interespo Geo-Sibir* 3.2 (2006): 124–130.
8. Malakhanov, V. V., S. N. Levachev, L. A. Shurukhin, and I. A. Kryukov. “Rekonstruktsiya gidravlicheskoj sistemy pitaniya Rybinskogo shlyuza.” *Gidrotekhnicheskoe stroitel'stvo* 10 (2011): 29–36.

9. Lipatov, I. V. "A mathematical model of a hydrodynamic effect of the flow on the shipping lock gate." *Problemy prochnosti i plastichnosti* 67 (2005): 151–161.
10. 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.
11. Gapeev, A. M., and P. A. Garibin. "Konstruktivnye, gidravlicheskie i ekspluatatsionnye osobennosti sistem pitaniya kamer sudokhodnykh shlyuzov dlya malykh rek." *Vodnye puti i gidrotekhnicheskie sooruzheniya: sbornik nauchnykh trudov*. SPb.: Izd-vo SPbGUVK, 2002: 125–135.
12. Ryabov, G. G. "The study of modes of filling the shipping lock with additional water flow over the dropping gate." *Zhurnal Universiteta vodnykh kommunikatsii* 4 (2011): 8–16.
13. Gapeev, A. M. "Vliyanie otdel'nykh elementov verkhnei golovy shlyuza na gidravlicheskie parametry potoka." *Gidrotekhnicheskie sooruzheniya i putevye raboty na vnutrennikh vodnykh putyakh dlya sudokhodstva*. L.: LIVT, 1984: 148–155.
14. Mikhailov, A. V. *Golovnye sistemy pitaniya sudokhodnykh shlyuzov i ikh raschet*. M.: Minrechflot SSSR, 1951.
15. Semanov, N. A., N. N. Varlamov, and V. V. Balanin. *Sudokhodnye kanaly, shlyuzy i sudopod'emniki*. M.: Transport, 1970.
16. Gapeev, A. M. "Analiz ekspluatatsionnykh kachestv napolneniya kamer sudokhodnykh shlyuzov." *Vyshee obrazovanie v sovremennykh usloviyakh*. Ch. II. SPb.: SPbGUVK, 1996: 164–165.
17. Gapeev, A. M., and P. A. Garibin. "Konstruktivnye, gidravlicheskie i ekspluatatsionnye osobennosti sistem pitaniya kamer sudokhodnykh shlyuzov dlya malykh rek." *Vodnye puti i gidrotekhnicheskie sooruzheniya: sbornik trudov*. SPb.: Izd-vo SPbGUVK, 2002: 125–135.
18. Gapeev, A. M. "Opredelenie razmerov i vzaimnogo raspolozheniya elementov sistemy napolneniya kamer sudokhodnykh shlyuzov iz-pod ploskikh pod'emno-opusknykh vorot." *Vestnik Gosudarstvennogo universiteta morskogo i rechnogo flota imeni admirala S.O. Makarova* 2 (2012): 34a–40.
19. Polilova, A. I. "Umen'shenie gidrodinamicheskoi sily pri napolnenii shlyuza." *Rechnoi transport* 3 (1972): 43.
20. Gapeev, A. M., and G. G. Ryabov. "Obosnovanie sistemy napolneniya kamery sudokhodnogo shlyuza «Duboi» Dnepro-Bugskogo kanala." *Vodnye puti i gidrotekhnicheskie sooruzheniya: sbornik trudov*. SPb.: Izd-vo SPbGUVK, 2007: 84–95.
21. Gapeev, A. M., and A. V. Podreshetnikova. "Analysis of the existing theoretical researches to determine the dimensions of the culvert openings formed components of the head power systems of the shipping lock's chambers." *Vestnik Gosudarstvennogo universiteta morskogo i rechnogo flota imeni admirala S.O. Makarova* 4(26) (2014): 95–100.
22. Sergeev, A. V., and I. I. Krylov. "Ob osobennostyakh rascheta ploskikh pod'emno-opusknykh vorot sudokhodnykh shlyuzov pri rekonstruktsii." *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedenii. Stroitel'stvo* 4 (1999): 95–97.
23. Gapeev, A. M., and V. V. Kononov. "Stroitel'stvo sudokhodnykh gidrotekhnicheskikh sooruzhenii v Rossii (K 200-letiyu nachala podgotovki inzhenerov v oblasti gidrotekhnicheskogo stroitel'stva)." *Gidrotekhnicheskoe stroitel'stvo* 10 (2009): 11–17.

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

Гапеев Анатолий Михайлович —
доктор технических наук, профессор
ФГБОУ ВО «ГУМРФ имени
адмирала С.О. Макарова»
198035, Российская Федерация, г. Санкт-Петербург,
ул. Двинская, 5/7
e-mail: kaf_gsk@gumrf.ru
Рябов Георгий Георгиевич —
кандидат технических наук
ФГБОУ ВО «ГУМРФ имени
адмирала С.О. Макарова»
198035, Российская Федерация, г. Санкт-Петербург,
ул. Двинская, 5/7
e-mail: RyabovGG@gumrf.ru

INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Gapeev, Anatolii 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_gsk@gumrf.ru
Ryabov, Georgii G. —
PhD
Admiral Makarov State University of Maritime
and Inland Shipping
5/7 Dvinskaya Str., St. Petersburg
198035, Russian Federation
e-mail: RyabovGG@gumrf.ru

Нычик Татьяна Юрьевна —
кандидат технических наук
ФГБОУ ВО «ГУМРФ имени адмирала
С. О. Макарова»
198035, Российская Федерация, г. Санкт-Петербург,
ул. Двинская, 5/7
e-mail: tatyana-nychik@mail.ru

Nychik Tatyana Yu. —
PhD
Admiral Makarov state University of Maritime
and Inland Shipping
5/7 Dvinskaya Str, St. Petersburg, 198035,
Russian Federation
e-mail: tatyana-nychik@mail.ru

*Статья поступила в редакцию 26 апреля 2017 г.
Received: April 26, 2017.*

DOI: 10.21821/2309-5180-2017-9-3-537-551

CAUSES OF WAVE ARTEFACTS APPEARANCES ON THE SEABED DIGITAL TERRAIN MODELS

P. I. Barashok

ROMONA Inc., Yuzhno-Sakhalinsk, Russian Federation

All over the world, there are many areas where multibeam echosounder systems data are extremely important and circumstances require the high-resolution data. The modern hydroacoustic equipment develops every day and it is necessary to design and test new methods and software of data acquisition. Nowadays, in the century of high expensive engineering works the preferences are paid to the complete environment explorations. Such researches include data acquire by different sensors simultaneously, for example, analog surveys of the pipeline construction areas require data collecting from sides-can sonar, multi-beam echosounder, number of sub-bottom profilers with various resolution and penetration, system of magnetometers and etc. Therefore, every data type is strongly regulated by quality requirements. However, unexpected situations have a place and it seems the single way is to provide the data re-acquisition, what is not favorably for most of the companies. In this article, some causes of artefacts emergence in bathymetric data, the artefacts forms and premises for this mistakes compensation are described. The influence of such parameters as pivot point location, time delay in motion reference unit data, data synchronization, zero surface for motion reference unit installation, offsets measurement is analyzed. This article represents the dynamic model creation of the vessel with variable center of rotation, data examples which have been influenced by factors of quality regression. In addition, the formula of appropriate data transmission by RS 232 are derived in special subchapter. Moreover, this article contains the results of proper tests and the direction of further explorations has been determined due to improvement of acquiring data.

Keywords: high-resolution shallow water survey, multi-beam echo sounder, Motion Reference Unit, offset measurement, pivot point location, artifacts on bathymetry data, angular errors.

For citations:

Barashok, Pavel I. "Causes of wave artefacts appearances on the seabed digital terrain models." *Vestnik Gosudarstvennogo universiteta morskogo i rechnogo flota imeni admirala S.O. Makarova* 9.3 (2017): 537–551. DOI: 10.21821/2309-5180-2017-9-3-537-551.

УДК 528.47

ПРИЧИНЫ ВОЗНИКНОВЕНИЯ АРТЕФАКТОВ В ФОРМЕ «ВОЛН» НА ЦИФРОВЫХ МОДЕЛЯХ РЕЛЬЕФА ДНА

П. И. Барашок

ЗАО «РОМОНА», Южно-Сахалинск, Российская Федерация

Существует много областей применения данных батиметрии, но в последнее время все большее внимание уделяется данным высокого разрешения. Современная гидроакустическая аппаратура быстро развивается, предоставляя широкий спектр возможностей, а, значит, необходимо одновременно развивать и методы, контролирующие сбор данных высокого разрешения. Ввиду высоких затрат на проведение инженерных изысканий, сегодня для экономии средств все большее внимание уделяется комплексным исследованиям. Такие исследования подразумевают сбор данных различными сенсорами одновременно, например, аналоговые изыскания на трассе строительства трубопровода, когда одновременно ведется запись данных гидролокатора бокового обзора, многолучевого эхолота, нескольких профилографов с разным разрешением и проникающей способностью (penetration), системой магнитометров и др. Следовательно, на каждый тип данных априорно накладываются жесткие требования относительно качества. Работа посвящается поиску причин возникновения артефактов в виде волн на данных батиметрии, губительно влияющих на их качество. Найдены и рассмотрены основные предпосылки возникновения этих волн на данных батиметрии. Предложены пути компенсации вышеуказанных ошибок. Анализируется влияние на данные таких параметров, как положение центра вращения судна, появление ненулевых временных задержек,

синхронизация данных программными средствами, установка нулевых плоскостей датчиков перемещения судна и измерения смещений. Подняты вопросы создания динамической модели судна с изменяющимся центром вращения, представлены примеры данных, на которые оказывают влияние различные ухудшающие качество факторы. Представлена формула для расчета оптимальной скорости передачи данных протоколом RS 232. Изложены результаты проводимых тестирований, определены области дальнейших исследований, направленных на улучшение качества получаемых данных.

Ключевые слова: съемка рельефа дна высокого разрешения, многолучевой эхолот, датчик перемещения судна, измерение смещений, положение центра вращения судна, артефакты на данных батиметрии, угловые ошибки.

Для цитирования:

Барашок П. И. Причины возникновения артефактов в форме «волн» на цифровых моделях рельефа дна / П. И. Барашок // Вестник Государственного университета морского и речного флота имени адмирала С. О. Макарова. — 2017. — Т. 9. — № 3. — С. 537–551. DOI: 10.21821/2309-5180-2017-9-3-537-551.

Введение (Introduction)

При выполнении детальных мелководных съемок при помощи комплексов на базе многолучевых эхолотов, когда создается цифровая модель рельефа дна (ЦМРД) с гридом 0,1 – 0,3 м, существенное значение приобретают характеристики судна-носителя аппаратуры, взаимное положение антенн многолучевого эхолота (МЛЭ) и датчиков динамических перемещений судна (ДПС) [1], [2]. Также некоторые положения теории судна, например, расположение центра вращения судна (Pivot Point), которые ранее были актуальны для судоводителей теперь становятся важными и для гидрографов, так как неверно определенные параметры будут вносить погрешности в данные гидрографических съемок и способствовать появлению артефактов. В настоящее время в связи с тем, что многие суда проходят модернизацию с целью проведения каких-либо специфических работ или для определенных районов плавания, зачастую вносятся изменения в конструктивную часть судов и распределение масс. Также иногда, ввиду определенных финансовых ситуаций, гидрографам бывает необходимо собрать качественные данные в плохую погоду, когда высота волн достигает двух метров. В таких случаях многие ошибки, особенно угловые, становятся наиболее заметными [3], [4]. Таким образом, в настоящее время необходимо уметь быстро и с малыми финансовыми вложениями проводить калибровку положения центра вращения судна, так как эта проблема в настоящее время является актуальной как для гидрографов, так и для судоводителей.

В настоящее время не вся работа, которую выполняют гидрографы, относится к обеспечению безопасности судоходства. Сегодня выполняются многие задачи, требующие следующих решений:

- высокоточного позиционирования (укладка трубопроводов и кабелей, определение газových плюмов, постановка нефтегазовых платформ, позиционирование автономных и телеуправляемых необитаемых подводных аппаратов (ТНПА и АПА), взятие проб, морская сейсмическая разведка и т. д.) [5];
- измерения глубин с высокой точностью и дискретностью (контроль дноуглубления, инспекция трубопроводов, поиски взрывоопасных предметов, отслеживание изменения морского дна) [6];
- процесс постобработки и визуализации данных [7].

Часто такие работы нельзя отнести к классической гидрографии, поэтому многие руководящие документы теряют свою силу.

Как видно из примера, приведенного на рис. 1, современные МЛЭ способны детектировать сильно расчлененную поверхность морского дна и объектов на нем.

Точность позиционирования и корректность пересчета наклонных дальностей, измеренных многолучевым эхолотом (МЛЭ) зависит от множества факторов. Одним из наиболее важных моментов пересчета является компенсация позиции и высоты прибора за углы крена, дифферента и движение судна вдоль оси Z .

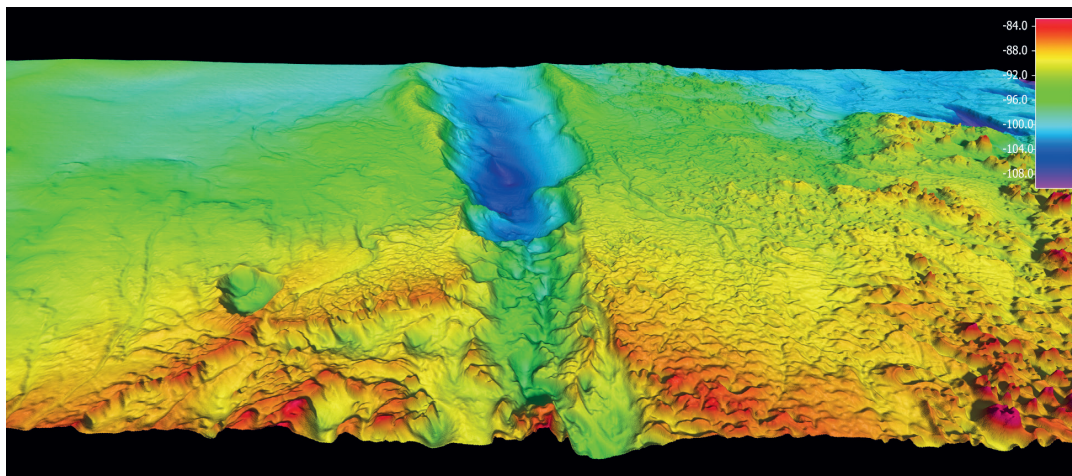


Рис. 1. Пример данных площадной съемки рельефа дна со сложной геологией, полученных при помощи многолучевого эхолота

Отдельно следует остановиться на вертикальном перемещении. В настоящее время существует множество приборов (MRU — Measurement Reference Unit), позволяющих вычислять углы крена, дифферента и движение судна вдоль осей x , y , z . Ключевым является слово *вычислять*, так как датчик перемещений не способен измерять эти значения, а только пересчитывать их из измеренных ускорений.

Современные датчики перемещений судна (ДПС) в основном состоят из трех акселерометров и трех гироскопов, расположенных вдоль трех основных осей [8], [9]. Ввиду конструкции, на датчики такого типа оказывают существенное влияние изменения курса и скорости судна носителя. При изменении этих показателей на акселерометры и гироскопы будут действовать силы инерции, поэтому необходимо правильно компенсировать подобные изменения. В большинстве современных ДПС реализован прием NMEA сообщений (GPVTG — строка скорости и GRHDT — строка курса) и разработаны специальные алгоритмы, автоматически учитывающие изменения курса и скорости [10], [11].

Основная информация, которую может предоставить ДПС:

- *Roll* — угол бортовой качки;
- *Pitch* — угол килевой качки;
- *Heave* — движение точки вазового центра прибора вдоль вертикальной оси;
- *Surge* — движение точки фазового центра прибора вдоль оси, направленной вперед и перпендикулярной диаметральной плоскости судна;
- *Sway* — движение точки фазового центра прибора вдоль оси, направленной в борт и перпендикулярной диаметральной плоскости судна.

На рис. 2 показаны параметры, которые можно получить при использовании вышеуказанного датчика, установленного на судне.

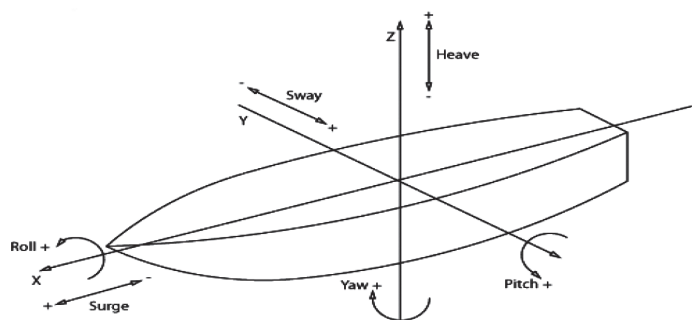


Рис. 2. Углы бортовой качки (*Roll*), килевой (*Pitch*), вертикального перемещения (*Heave*), движение судна в направлении нос – корма (*Surge*), движение в направлении правый – левый борт (*Sway*)

При вычислении положения пятен облучения в пространстве используются данные *Heave* (вертикальное перемещение), *Pitch* (килевая качка), *Roll* (бортовая качка) [12]. Показания движения судна по оси *Z* (*Heave*), как правило, поступают из прибора в метрах и являются относительной величиной, которая не привязана ни к какой плоскости отсчета. Если из прибора поступило значение 0,5 м, то это означает, что за строго определенный период, заданный пользователем, конкретная точка на судне поднялась на 0,5 м. Для выявления ошибок, связанных с работой датчика перемещения судна, необходимо поэтапно разобрать процесс компенсации данных за *Roll*, *Pitch*, *Heave* от начала их вычисления до момента поступления в программу сбора данных. На рис. 3 изображены данные съемки рельефа дна, полученные при плохих погодных условиях, когда высота волн достигала 2,5 м, при сильном ветре и течении в борт судна. Невооруженным взглядом видно, насколько сильно данные искажаются при неправильном учете углов крена, дифферента и вертикального перемещения судна (см. рис. 3, а — неправильно скомпенсированные данные; рис. 3, б — скомпенсированные данные).

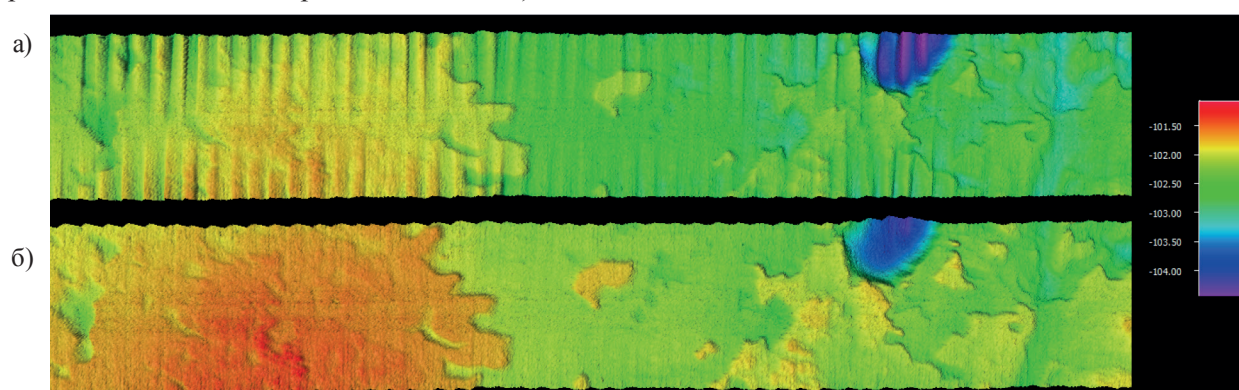


Рис. 3. Цифровая модель рельефа дна при неправильной (а) и правильной компенсации (б)

Как видно из рис. 3, неправильная компенсация данных может вызывать сильное искажение рельефа дна, что критично для современной гидрографии, например, при проведении инспекций трубопроводов или при контроле дноуглубительных работ. Существует много причин появления «волн» на данных. В статье рассмотрены некоторые из них и предложены методы контроля и компенсации ошибок. Основными причинами являются:

- появление временной задержки данных;
- ошибка, возникающая из-за неправильно определенного центра вращения судна;
- ошибка из-за неправильно измеренных плеч между МЛЭ и ДПС и некорректной установки нулевых плоскостей ДПС.

Основная часть (Main Part)

Появление временной задержки данных. Процесс компенсации положения глубин за углы крена, дифферента и проседания судна можно разделить на четыре этапа: 1-й этап — измерение и пересчет показаний внутри датчика перемещения судна; 2-й этап — передача данных через каналы связи; 3-й этап — поступление и распределение данных в ПК; 4-й этап — компенсация положения через пересчет в программном обеспечении.

1-й этап — *измерение ускорений прибором (ДПС) и процесс вычисления внутри прибора*. Следует отметить, что ДПС разных производителей имеют разную точность, которая зависит, в том числе, от качества математических алгоритмов, скорости пересчета, методов фильтрации и уравнивания данных. После необходимых вычислений данные формируются в строку для передачи и поступают в буфер прибора. После прихода данных в буфер следует процесс передачи, большинство приборов оснащены протоколом передачи RS232 (com-port), либо LAN-выходом. Зачастую для передачи данных от ДПС к ПК используют усовершенствованные преобразователи

последовательных интерфейсов Ethernet серии NPort. Системы связи на базе NPort очень удобны при работах, так как нет необходимости протягивать лишние кабели по судну или катеру, что значительно сокращает время мобилизации, но при неправильно настроенной локальной сети могут возникать потери данных или временные задержки [13].

2-й этап — *передача данных по каналам связи*. На данном этапе могут возникать потери и задержки данных. Рассмотрим два основных типа передачи: *com-port* (протокол RS-232) и *internet*-соединение. Отличием RS232 от параллельных портов, которые содержат до восьми информационных линий и способны передавать байт за один такт, является способность передачи данных по одной линии, однако ввиду последовательной передачи данных (бит за битом) значительно уменьшается скорость передачи [14], [15]. В момент, когда данные не передаются, на линии устанавливается уровень логической единицы — *режим ожидания*. В момент активации режима передачи данных передается стартовый бит (логический ноль) длительностью в одну элементарную посылку. Далее все биты данных посылаются последовательно: младший бит — первым, затем бит проверки четности, если требуется, и стоповый бит длительностью стоповой посылки — 1, 1,5 или 2 бита (рис. 4). Эти параметры, наряду со скоростью передачи, являются базовыми и должны быть четко выбраны при настройках систем.



Рис. 4. Схема последовательности передачи данных

Скорость передачи информации измеряется в бодах (количество битов за 1 с). Зная скорость в бодах можно вычислить количество передаваемых символов в секунду. При передаче на скорости 9600 бод/с, 8 бит данных, один стоповый бит и стартовый бит общая длина посылки равна 10 битам, т. е. $9600/10 = 960$ символов в секунду. Выведем необходимые формулы для расчета скорости передачи символов: $K = V/N$, где K — количество символов, передаваемых за 1 с; V — скорость передачи, бод/с; N — длина последовательности, бит, $N = (n_1 + n_2 + n_3 + n_4)$; n_1 — стартовый бит; n_2 — количество бит данных; n_3 — бит проверки на четность; n_4 — стоповая посылка (1, 1,5 или 2 бита). Таким образом, минимальная скорость передачи рассчитывается по формуле:

$$V = K \cdot N.$$

Перед написанием статьи, во время сбора материалов, были произведены различные тестирования. Одним из тестов являлась запись данных датчика перемещения судна, установленного на специальной площадке, имеющей одну точку вращения. При записи использовались разные настройки соединения (скорость передачи). Тестируемый прибор способен экспортировать множество форматов строк, во время тестирования ДПС генерировал сообщение \$PSMCS. Строка имеет вид: \$PSMCS,±уу.ууу,±хх.ххх,±hh.hh, пример строки — \$PSMCS,+00.089,-00.888,-00.04. Расшифровка строки приведена в следующей таблице.

Расшифровка строки \$PSMCS

уу.ууу	Бортовая качка, град.	±30° — разрешение 0,001°
хх.ххх	Килевая качка, град.	±30° — разрешение 0,001°
hh.hh	Вертикальное перемещение, м	±10 м — разрешение 0,01м

Во время тестов ДПС был настроен на выдачу сообщений с частотой 90 Гц. В результате выяснилось, что при стандартных скоростях передачи ниже 38400 бод/с некоторые сообщения приходили не целиком или вовсе терялись. Данный тест подтверждает формулу на с. 541. Количество передаваемых символов в одном сообщении равно 29 и, соответственно, в секунду передавалось $29 \cdot 90 = 2610$ символов. Определим минимальную скорость передачи: $2610 \cdot 10 = 26100$ бод/с. Скорость передачи данных также оказывает влияние на целостность передаваемых пакетов [16]. При большой длине кабеля и маленькой скорости передачи в строках могут появляться посторонние символы. При возникновении таких ситуаций программные средства не будут корректно воспринимать данные. Зависимость скорости передачи от длины кабеля производители приборов обычно указывают в инструкциях, но на практике скорость нужно контролировать и при необходимости корректировать.

Еще одной возможной причиной задержек могут являться программные задержки. В настоящее время профессиональные программные средства сбора данных быстро развиваются, но при неправильной настройке могут возникать задержки. Наиболее распространенной ошибкой при настройке синхронизации является выдача строки ZDA (точного GPS времени) с одного спутникового приемника, а сигнала 1PPS — с другого. При таких настройках возникают ошибки синхронизации, что приводит в том числе к неправильной компенсации данных многолучевого эхолота. Однако в процессе постобработки многие современные программные средства позволяют изменять временную задержку, отображая при этом изменения данных. Поэтому, если «волны» на данных вызваны временной задержкой, то такие данные можно довольно быстро исправить.

Ошибка, вызванная несовпадением осей вращения судна и установленного ДПС. Ошибка, вызванная неучтенным несовпадением осей вращения судна и установленного ДПС, весьма сильно влияет на правильность компенсации данных многолучевого эхолота. Как отмечалось ранее, все современные ДПС вычисляют углы крена, дифферента и вертикальные перемещения судна из измеренных ускорений и углов. Как правило акселерометры, измеряющие ускорения, и гироскопы, измеряющие угловые значение, внутри прибора располагаются вдоль трех основных осей: вдоль ДПС, поперек ДПС и вертикально вверх, измеряя ускорения и углы каждый относительно соответствующей оси. Рис. 5 демонстрирует несовпадение осей судовой системы координат и осей установленного прибора.

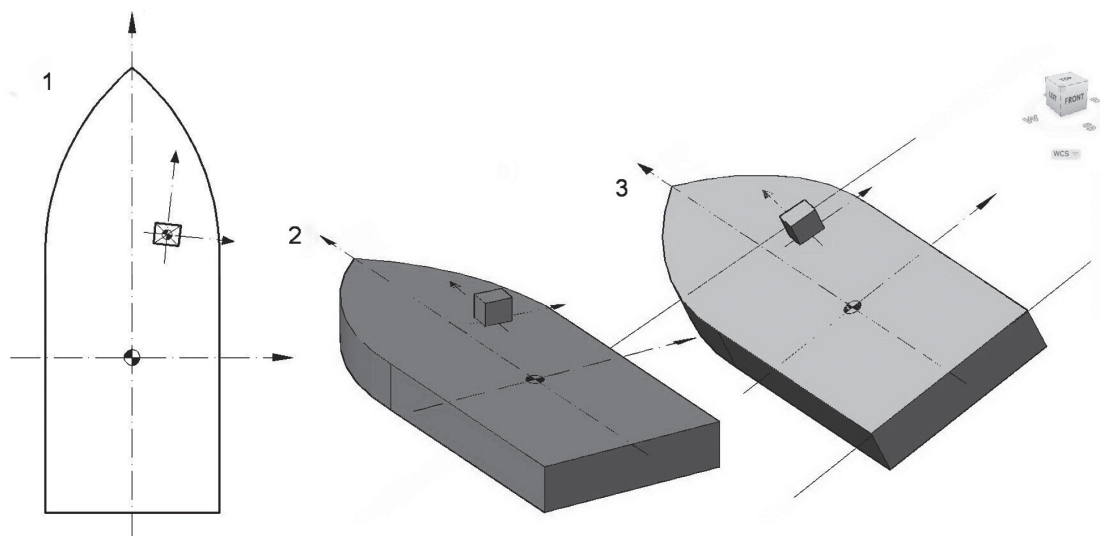


Рис. 5. Несовпадение осей судна и ДПС:

1 — вид в плане; 2 — судно в начальном положении; 3 — судно имеет крен на левый борт

Рассмотрим три случая, которые изображены на рис. 6. Оси XI , YI , ZI имеют начальное положение, причем ось XI направлена в борт судна, ось YI направлена в нос судна, а ось ZI направлена вверх.

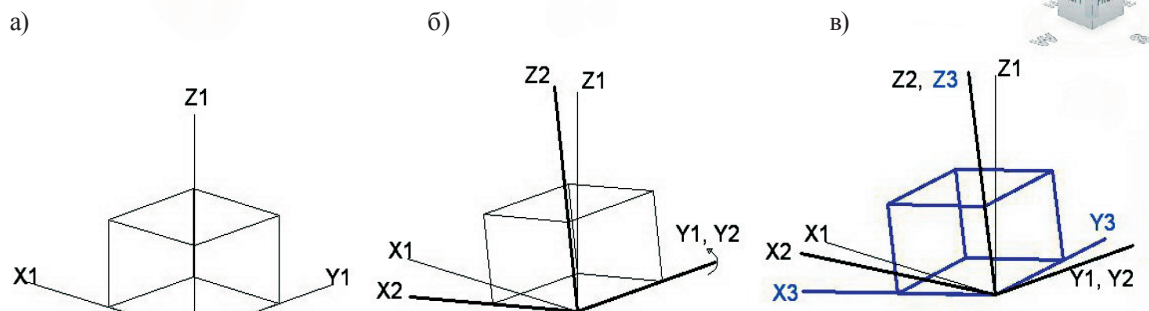


Рис. 6. Три положения датчика перемещения судна

1-й случай. На рис. 3, а изображен ДПС, находящийся в равновесии (в нулевой плоскости по всем осям), причем все оси прибора и судовые оси — коллинеарные, а на акселерометры и гироскопы датчика перемещения судна оказывают влияние только постоянные силы, объект — в состоянии покоя.

2-й случай. Оси ДПС и судовые оси на рис. 6, б по-прежнему сонаправлены. У судна появился крен α на левый борт (судно повернулось вокруг продольной оси Y на угол α). В результате вертикальная ось прибора $Z1$ и поперечная ось прибора $X1$ отклонятся в положения $Z2$ и $X2$ соответственно, что приведет к появлению дополнительных сил, действующих на акселерометры и гироскопы, расположенные в этих плоскостях. Движение вдоль оси Z будет равно проекции на ось $Z1$, а движение вдоль оси X равно проекции на ось $X1$. Угол крена будет рассчитан из показаний акселерометров и гироскопов правильно, так как оси прибора совпадают с основными осями судна.

3-й случай. Как и во втором случае, у судна на рис. 6, в возник угол крена α , только оси прибора и оси судна неколлинеарны (продольная ось прибора и продольная ось судна не параллельны). В результате возникнут силы, действующие на все акселерометры и гироскопы вдоль осей X , Y , Z , что приведет к следующим ошибкам в вычислениях: неправильному определению угла крена и ложному углу дифферента. В итоге для судна определятся неправильные углы бортовой качки — *Roll*, килевой качки — *Pith* и данные многолучевого эхолота будут скомпенсированы неправильно.

Таким образом, правильность установки ДПС значительно влияет на компенсацию данных многолучевого эхолота. Однако в настоящее время многие производители навигационного оборудования нашли несколько способов для полной или частичной компенсации ошибки неправильной установки прибора. Так, производители инерциальных навигационных систем пятого поколения создали алгоритмы, учитывающие данные акселерометров для расчета курса судна (в отличие от систем четвертого поколения, где решающее значение имели GNSS-измерения), и при калибровке курсовых коэффициентов инерциальной системы автоматически вводятся поправки в датчик перемещения судна. Другой способ — это совмещение гироскопа, работающего на основе использования эффекта Саньяка и датчика перемещения судна в один прибор. В таких системах угловая поправка, полученная при стандартной калибровке гироскопа, будет равна углу несоответствия осей ДПС и судна.

Ошибка, возникающая из-за неправильно определенного центра вращения судна. Рассмотрим проблемы, возникающие при ошибочном определении центра вращения судна (ЦВС). На рис. 7 показано, что при ошибке в определении ЦВС, равной 2,5 м (в плоскости нос — корма) и амплитуде дифферента судна в 5° возникает ошибка определения высоты в 0,22 м. Следует иметь в виду, что в реальных условиях будет возникать дополнительная ошибка в плоскости, перпендикулярной диаметральной, следовательно, результирующая ошибка (получаемая при сложении бортовой и килевой качки) может стать еще больше.

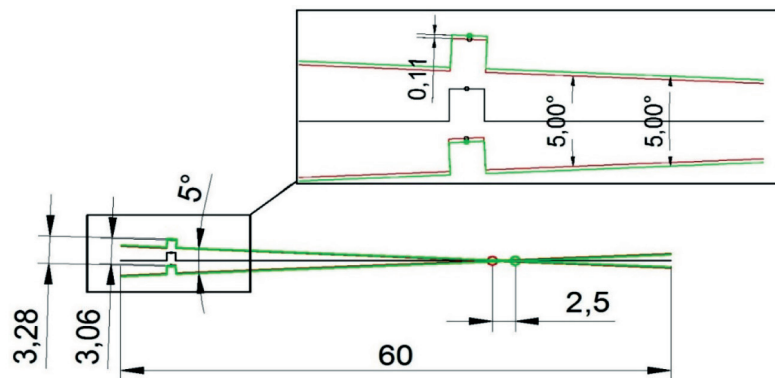


Рис. 7. Вращение плоскости вокруг разных точек

Одной из возможных причин появления «волн» на данных может являться неправильно определенное положение ЦВС. В настоящее время эта проблема весьма актуальна в инженерной гидрографии и смежных направлениях науки, чаще всего из-за изменения конструктивной части судов. Ввиду активного развития поисковой техники и модернизации способов проведения изысканий предъявляются определенные требования к судам, участвующим в работах. После постройки судна и его спуска на воду центр вращения судна указан в судовой документации. При проведении специфических работ необходима доработка судна, изменение его конструктивной части, а при подготовке к проекту судно загружают оборудованием (ТНПА, сейсмическая коса, акустические пушки и т. д.), провизией, топливом, водой и т. д. и все это оказывает влияние на положение ЦВС. Для точного проведения работ необходимо компенсировать вызванные ошибки путем введения поправок.

Динамическая модель центра вращения судна. Существуют формулы для расчета положения центра масс. Для определения трехмерного положения центра масс необходимо составить уравнения статистических моментов относительно основных координатных плоскостей: X , Y , Z . Отдельные области судна и грузы на нем разделить на части, учитывая при расчетах координаты и массы всех составляющих.

Статический момент относительно диаметральной плоскости судна (ось X): $DX_G = P_1x_1 + P_2x_2 + \dots + P_nx_n$; статический момент относительно плоскости мидель-шпангоута: $DY_G = P_1y_1 + P_2y_2 + \dots + P_ny_n$; статический момент относительно оси Z : $DZ_G = P_1z_1 + P_2z_2 + \dots + P_nz_n$ (теорема статического момента). Масса судна $D = P_1 + P_2 + \dots + P_n$. Тогда формулы для расчета координат будут иметь вид [17]:

$$X_G = \frac{P_1x_1 + P_2x_2 + \dots + P_nx_n}{D}; \quad Y_G = \frac{P_1y_1 + P_2y_2 + \dots + P_ny_n}{D}; \quad Z_G = \frac{P_1z_1 + P_2z_2 + \dots + P_nz_n}{D}.$$

Таким образом, в результате вычислений будут получены координаты центра масс судна относительно изначально выбранной точки. Во время проведения работ необходимо вносить поправки за перераспределение масс (перекачка воды, топлива и т. д.), таким образом создавая изменяющуюся модель. Такой способ имеет свои недостатки, такие, например, как отсутствие поправок, компенсирующих гидродинамические свойства судна [18] и необходимость измерения массы всех элементов носителя аппаратуры, что не всегда возможно. Если судно претерпело конструктивные изменения, а добавленные детали не были должным образом измерены или занесены в судовую спецификацию, то вычисление массы в условиях мобилизации будет весьма проблематично. Вычислить центр вращения судна можно по показаниям GNSS-приемников (описание алгоритма вычислений выходит за рамки этой статьи).

При возникновении «волн» на данных можно проверить, вызваны ли они неправильно определенным центром вращения судна. Для этого в настоящее время производится подробный анализ

всех возможных способов компенсации данной проблемы и поиск новых решений, включающих использование данных GNSS-аппаратуры в режиме RTK, датчиков перемещения судна, тахеометров и т. д. В итоге планируется определить наиболее точный алгоритм поиска центра вращения судна и протестировать его на практике. Если результат окажется положительным, то следующим этапом станет разработка и написание программы, которая в режиме реального времени будет рассчитывать положение центра вращения и вносить коррекции в измеренные «плечи».

Ошибка из-за неправильно вычисленных координат сенсоров в судовой системе и некорректной установки нулевых плоскостей ДПС. Процесс мобилизации судна включает в себя множество этапов, одним из которых является определение координат сенсоров в судовой системе координат, или *измерение смещений* (Lever Arm Measurement / Offsets Measurement). После установки оборудования на плавсредство необходимо выбрать точку отсчета (в англоязычных источниках CRP (Central Reference Point), которая будет являться началом судовой системы координат. Логичнее всего совместить точку отсчета (далее — CRP) с центром вращения судна. Также необходимо определить направление осей. Во избежание путаницы следует задавать такое же направление, как в программе сбора информации и навигации.

Наиболее распространенным является следующий порядок направления осей: ось Y направлена в нос судна, ось X — в правый борт, ось Z — вверх. Однако некоторые производители ПО могут изменять этот порядок, что необходимо обязательно учитывать. После определения точки отсчета, если судно стоит в доке, необходимо задать нулевые плоскости для ДПС. Установка нулевых плоскостей — один из наиболее важных этапов при измерении смещений, так как эта плоскость будет считаться плоскостью отсчета для углов крена и дифферента. Для экономии средств желательно при установке нулевых плоскостей использовать два ДПС. Оба прибора поставить на ровном месте, максимально близко друг к другу, в качестве плоскости отсчета для одного прибора задать плоскость, в которой стоит судно, а второму прибору в качестве плоскости отсчета установить горизонталь. Горизонталь устанавливается на берегу при помощи штатива и триггера. Таким образом, в результате можно будет узнать разность плоскостей судовой системы координат и нормальной горизонтальной плоскости. Эти данные необходимо вносить в отчет о калибровке.

После выбора точки отсчета координат и подготовки оборудования выполняется измерение смещений. Существует два самых распространенных способа таких измерений: первый — при помощи тахеометра, второй — при помощи измерительной рулетки [19]. Первый способ гораздо точнее и продуктивнее, но бывают случаи, когда приходится выполнять измерения рулеткой. Для сохранения установленной плоскости в комплексе с рулеткой необходимо применять уровень, так как измерения без поправок за наклон элементов катера будут содержать дополнительные ошибки.

Для удобства на некоторых судах используют систему специальных марок. На судне, в доке, физически создается система специальных точек, которые имеют точные координаты в судовой системе. Затем производят контрольные измерения этих точек и для надежности создают дополнительный набор, при помощи которого будет производиться контроль созданных марок (контроль необходим ввиду деформации судна льдами, изгибов палубы и т. д.). В отчет по созданию точек необходимо внести информацию об отклонении плоскости судовой системы от горизонтальной плоскости (горизонтальная плоскость в данном случае — нормальный горизонтальный уровень, или плоскость, перпендикулярная вектору силы тяжести). Зная эти углы, датчику перемещения судна можно задать установочные углы и тем самым привести его в судовую систему координат.

На рис. 8 показана схема судна, где положение 1 указано красным цветом, а положение 2 — синим. Установочный угол между плоскостями равен одному градусу. Видно, что угол значительно влияет на длину плеч между сенсорами. Рисунок наглядно демонстрирует важность правильной установки начальной плоскости судна при измерении смещений. Также если измерить угол между плоскостью 2 и 3, то можно менять датчики перемещения судна, задавая им правильную плоскость отсчета. Например, на судно прибыл новый ДПС, который имеет старые установочные

углы. Сначала прибор необходимо установить на геодезический трегер и отгоризонтировать, после чего записать небольшую сессию данных, включающую в себя значения углов, затем обработать данные и определить углы относительно отгоризонтированной плоскости трегера. Для установки прибора в плоскость судовой системы координат необходимо полученные углы скомпенсировать углом между плоскостью 2 и 3.

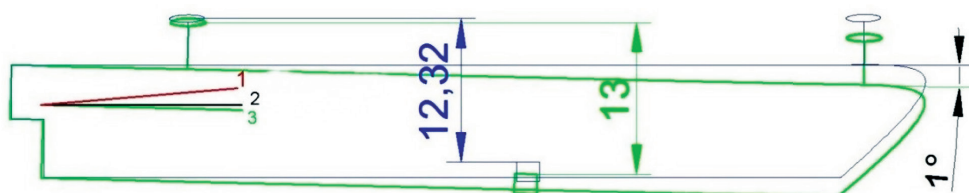


Рис. 8. Схематичное представление судна в двух состояниях:
1 — плоскость, заданная для нового IMU при работе на другом судне;
2 — нулевая плоскость, перпендикулярная силе тяжести;
3 — начальная скорость при измерении смещений

Таким образом, в статье были рассмотрены основные причины возникновения волн на данных батиметрии: из-за влияния задержки, из-за неправильно определенного центра вращения судна, из-за неправильно измеренных смещений и некорректной установки нулевых плоскостей. Рис. 9 наглядно демонстрирует разницу в этих ошибках и состоит из шести сегментов. Сегмент 1 содержит правильно скомпенсированные данные, сегмент 2 — данные, на которые повлияла задержка угловых измерений и вертикального перемещения, сегмент 3 показывает влияние неправильно выбранного центра вращения судна, сегмент 4 содержит данные, полученные при суммарной ошибке в определении центра вращения судна и задержке данных датчика перемещения судна, сегмент 5 представляет результат влияния неправильно установленных нулевых плоскостей для ДПС (как видно из примера, данные сильно исказились — у поверхности морского дна появился уклон, а также возникли небольшие по амплитуде «волны»), сегмент 6 — данные при исправном ДПС.

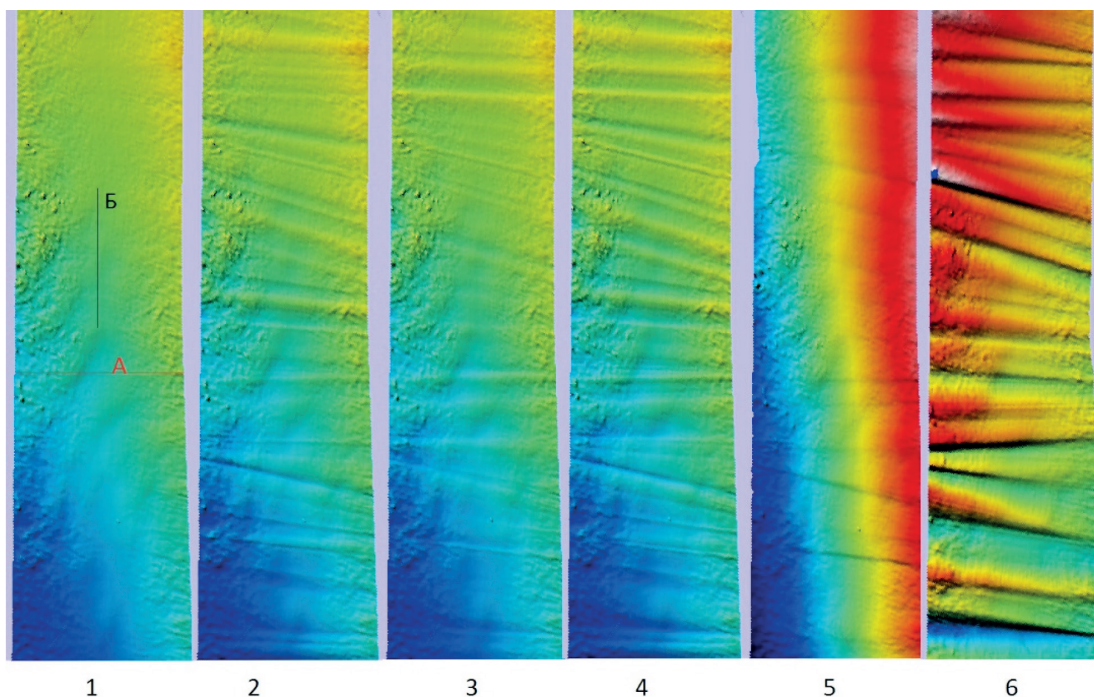


Рис. 9. Изображения участка морского дна при влиянии на данные различных ошибок (буквами «А» и «Б» обозначены разрезы слоев)

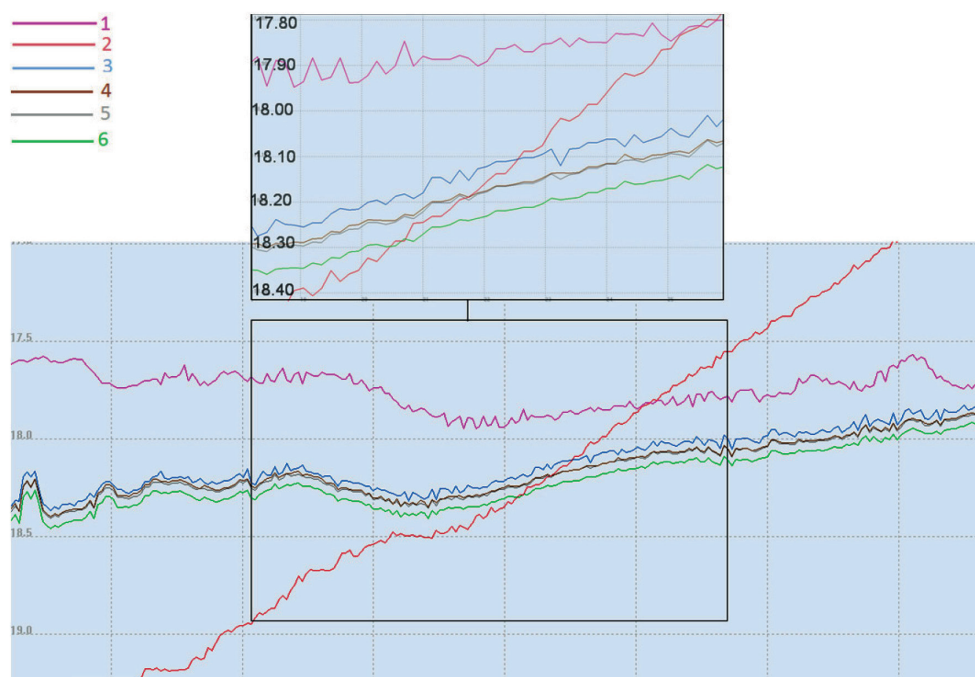


Рис. 10. Изображение разреза, сделанного по профилю «А» (поперек движения судна), где линии разных цветов обозначают влияние ошибок на данные батиметрии

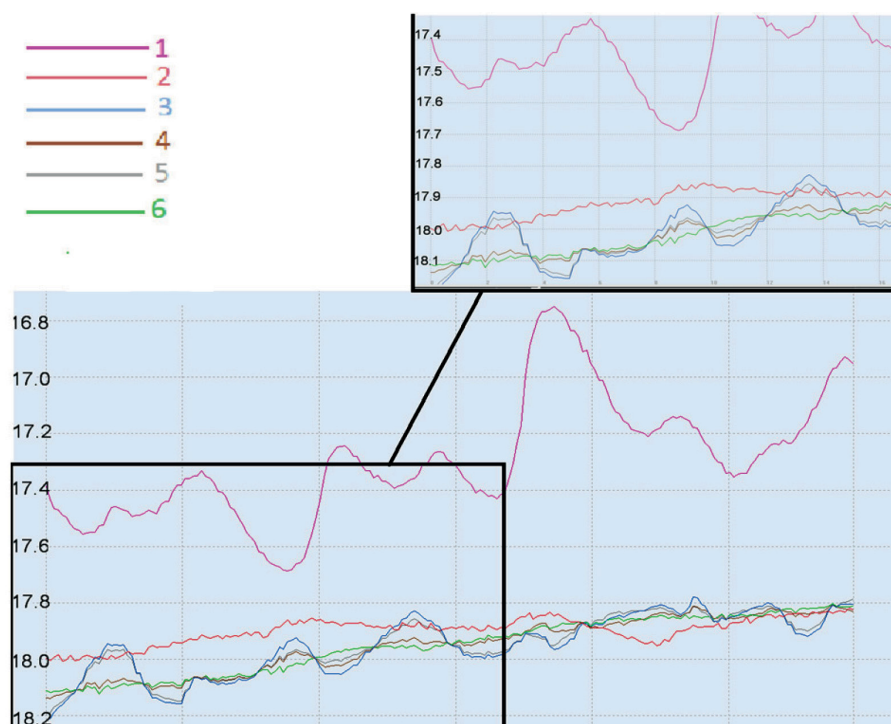


Рис. 11. Изображение разреза, сделанного по профилю «Б» (вдоль движения судна), где линии разных цветов обозначают влияние ошибок на данные батиметрии

Условные обозначения на рис. 10 – 11:

- 1 — изображение морского дна в профиле, полученное при использовании некорректного датчика перемещения судна; 2 — профиль морского дна построенный по данным, включающим ошибку в установке нулевых плоскостей ДПС;
- 3 — профиль, показывающий суммарное влияние ошибки при определении центра вращения судна и задержке данных; 4 — профиль, демонстрирующий ошибку в определении только центра вращения судна;
- 5 — данные при влиянии задержки угловых измерений и вертикального перемещения;
- 6 — правильно скомпенсированные данные, профиль реального морского дна

На рис. 10 и 11 изображены разрезы, сделанные по профилям «А» и «Б». Особенно сильно тестовые данные батиметрии исказились из-за некорректной работы ДПС (см. линии 1 на рис. 10 – 11) и при ошибочной установке нулевых плоскостей. Ошибку, вызванную неправильной установкой нулевых плоскостей, можно частично скомпенсировать проведением калибровки систематических погрешностей установки преобразователей многолучевого эхолота (Patch Test), но такое исправление в данном случае не исправит данные в полной мере. Сбор анализируемых данных выполнялся во время хорошей погоды, поэтому влияние задержки данных (см. линии 3 – 5 на рис. 10 и 11) и неправильно определенного центра вращения судна (см. линии 3 – 5 на рис. 10 и 11) сказываются на цифровой модели рельефа дна не слишком критично. В плохую погоду, при высоте волн более метра или сильном течении в борт судна, во время максимальных значений углов крена и дифферента, данные батиметрии будут искажены настолько, что не будут нести информации о реальном рельефе морского дна.

Исходя из ранее изложенного, ошибки, возникающие при неправильно скомпенсированных данных, существенны и иногда достигают 15 см и более, что критично при проведении ежегодных инспекций трубопроводов, мониторинге состояния отсыпки нефтегазовых платформ гравитационного и полупогружного типа, а также дноуглубительных работах при подсчете объема. Поэтому проблема требует более тщательного исследования. В настоящее время автором статьи проводятся различные тестирования с целью поиска алгоритмов для решения данной проблемы, а также разрабатываются способы автоматизации процесса устранения ошибок, создаются математические решения и выполняется анализ множества данных, полученных с различных судов, чтобы подтвердить полученные формулы. Итоги всех работ будут представлены в следующих статьях, продолжающих тему этой работы.

Обсуждение (Discussion)

Ввиду постоянно повышающихся требований к данным батиметрии, современные МЛЭ быстро развиваются, что накладывает некоторые требования на используемые с ними сенсоры, а также разработку поправок для основных способов проведения работ. В процессе поиска причин возникновения волн на данных батиметрии выяснилось, что на данные могут оказать влияние следующие факторы:

- задержки информации с датчиков перемещения судна;
- ошибка в определении центра вращения судна;
- ошибка при измерении оффсетов;
- ошибка в установке нулевых плоскостей датчиков перемещения судна.

Все указанные ранее факторы были подробно проанализированы в статье. Был подготовлен материал для дальнейшего исследования данной проблемы. Во избежание временных задержек при мобилизации судна необходимо правильно рассчитывать длину кабеля, скорость и объем передачи данных. Перед началом проведения мобилизации необходимо тщательно изучить судовую документацию и составить точный план работ. На судах с большим водоизмещением и сложной формой рекомендуется использовать динамическое положение центра вращения судна, которое будет изменяться ввиду перекачки воды и топлива, при подъеме и спуске больших грузов.

Для датчиков перемещения судна рекомендуется выполнять определение углов наклона судовой системы координат от плоскости, перпендикулярной направлению силы тяжести, что поможет при установке нового прибора на судне. Для удобства проведения мобилизации на судне необходимо разработать систему специальных марок. После измерения смещений необходимо проводить процедуру верификации, которая позволит исключить множество ошибок.

Выводы

1. При выполнении детальных мелководных съемок при помощи комплексов на базе многолучевых эхолотов необходимо уделять особое внимание взаимному расположению приборов, а также характеристикам судна-носителя.

2. При использовании датчиков перемещения судна необходимо правильно реализовывать компенсацию данных внутренних акселерометров и гироскопов за изменения скорости и курса судна.

3. Необходимо правильно определять скорость передачи данных по последовательным и параллельным соединениям.

4. Важно проводить тесты на предмет выявления программных задержек и проверять целостность приходящих пакетов.

5. Во время мобилизации необходимо:

- продумать процесс обнуления плоскостей ДПС;
- протестировать комплекс на предмет временных задержек;
- постараться найти в судовой документации положение центра вращения судна;
- для удобства разработать специальную судовую систему координат и совместить ноль системы с центром вращения судна;
- разрабатывать дополнительные методы контроля измерения смещений.

6. Во время сбора данных необходимо периодически проводить тщательную проверку появления артефактов.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Calder B. R.* Automatic processing of high-rate, high-density multibeam echosounder data / B. R. Calder, L. A. Mayer // *Geochemistry, Geophysics, Geosystems*. — 2003. — Vol. 4. — Is. 6. DOI: 10.1029/2002GC000486.
2. *Roberts J. M.* Acoustic mapping using a multibeam echosounder reveals cold-water coral reefs and surrounding habitats / J. M. Roberts, C. J. Brown, D. Long, C. R. Bates // *Coral Reefs*. — 2005. — Vol. 24. — Is. 4. — Pp. 654–669.
3. *Yang F.* A post-processing method for the removal of refraction artifacts in multibeam bathymetry data / F. Yang, J. Li, Z. Wu, X. Jin, F. Chu, Z. Kang // *Marine Geodesy*. — 2007. — Vol. 30. — Is. 3. — Pp. 235–247. DOI: 10.1080/01490410701438380.
4. *Sacchetti F.* Geomorphology of the Irish Rockall Trough, North Atlantic Ocean, mapped from multibeam bathymetric and backscatter data / F. Sacchetti, S. Benetti, A. Georgiopolou [et al.] // *Journal of Maps*. — 2011. — Vol. 7. — Is. 1. — Pp. 60–81. DOI: 10.4113/jom.2011.1157.
5. *Колосков Е. Н.* Применение современных гидрографических технологий для изучения рельефа и донного газопроявления в северных морях России / Е. Н. Колосков, Ю. Г. Фирсов // *Вестник Государственного университета морского и речного флота имени адмирала С. О. Макарова*. — 2015. — № 3 (31). — С. 54–62.
6. *Барашок П. И.* Современные способы обследования морского дна для обнаружения и устранения взрывоопасных объектов до строительства трубопровода / П. И. Барашок, Ю. Г. Фирсов // *Вестник Государственного университета морского и речного флота имени адмирала С. О. Макарова*. — 2016. — № 1 (35). — С. 47–59. DOI: 10.21821/2309-5180-2016-8-1-47-59.
7. *Фирсов Ю. Г.* Новые методы пространственной визуализации результатов инженерной батиметрической съемки / Ю. Г. Фирсов, И. В. Кожухов // *Вестник Государственного университета морского и речного флота имени адмирала С. О. Макарова*. — 2014. — № 2 (24). — С. 17–23.
8. *Farrell J.* Aided navigation: GPS with high rate sensors / J. Farrell. — McGraw-Hill Education, 2008. — 530 p.
9. *Nassar S.* Improving the inertial navigation system (INS) error model for INS and INS/DGPS applications: Dr. Diss. / S. Nassar. — National Library of Canada= Bibliothèque nationale du Canada, 2003. — 155 p.
10. *Meijer G. A. L.* Methods to assess physical activity with special reference to motion sensors and accelerometers / G. A. L. Meijer, K. R. Westerterp, F. [et al.] // *IEEE Transactions on Biomedical Engineering*. — 1991. — Vol. 38. — Is. 3. — Pp. 221–229. DOI: 10.1109/10.133202.
11. *Godhaven J. M.* Adaptive tuning of heave filter in motion sensor/ J. M. Godhaven // *OCEANS'98 Conference Proceedings*. — IEEE, 1998. — Vol. 1. — Pp. 174–178. DOI: 10.1109/OCEANS.1998.725731
12. *Фирсов Ю. Г.* Основы гидроакустики и использования гидрографических сонаров: учеб. пособие / Ю. Г. Фирсов. — СПб.: Нестор-история, 2010. — 348 с.

13. Лисецкий С. Ю. Стек TCP/IP в технологических сетях / С. Ю. Лисецкий, Д. П. Медведенко // Программные продукты и системы. — 2005. — № 3. — С. 2.
14. Олссон Г. Цифровые системы автоматизации и управления / Г. Олссон, Д. Пиани. — СПб.: Nevskiy Dialekt, 2001. — 557 с.
15. Агуров П. В. Последовательные интерфейсы ПК. Практика программирования / П. В. Агуров. — СПб.: БХВ-Петербург, 2004. — 496 с.
16. Игнатьев А. С. Создание распределенных систем управления на базе высокоскоростного последовательного интерфейса / А. С. Игнатьев // Промышленные АСУ и контроллеры. — 2008. — № 12. — С. 5–6.
17. Nachman M. Moored ship motion determination system: pat. № 5089972 / M. Nachman, R. H. Overton. — США, 1992.
18. Seo S. G. The use of pivot point in ship handling for safer and more accurate ship manoeuvring / S. G. Seo // Proceedings of IMLA. — 2011. — Vol. 1. — № 29. — Pp. 271–280.
19. Bound J. Measurement error in survey data / J. Bound, C. Brown, N. Mathiowetz // Handbook of econometrics. — 2001. — Vol. 5. — Pp. 3705–3843. DOI: 10.1016/S1573-4412(01)05012-7.

REFERENCES

1. Calder, B. R., and Larry A. Mayer. “Automatic processing of high-rate, high-density multibeam echosounder data.” *Geochemistry, Geophysics, Geosystems* 4.6 (2003). DOI: 10.1029/2002GC000486.
2. Roberts, J. M., C. J. Brown, D. Long, and C. R. Bates. “Acoustic mapping using a multibeam echosounder reveals cold-water coral reefs and surrounding habitats.” *Coral Reefs* 24.4 (2005): 654–669.
3. Yang, Fanlin, J. Li, Z. Wu, X. Jin, F. Chu, and Z. Kang. “A post-processing method for the removal of refraction artifacts in multibeam bathymetry data.” *Marine Geodesy* 30.3 (2007): 235–247. DOI: 10.1080/01490410701438380.
4. Sacchetti, Fabio, S. Benetti, A. Georgiopolou, P. Dunlop, and R. Quinn. “Geomorphology of the Irish Rockall Trough, North Atlantic Ocean, mapped from multibeam bathymetric and backscatter data.” *Journal of Maps* 7.1 (2011): 60–81. DOI: 10.4113/jom.2011.1157.
5. Koloskov, E. N., and Yu. G. Firsov. “Implementation of the new hydrographic technologies for bottom topography and seafloor gas venting investigations in the Russian northern seas.” *Vestnik Gosudarstvennogo universiteta morskogo i rechnogo flota imeni admirala S. O. Makarova* 3(31) (2015): 54–62.
6. Barashok, Pavel Ivanovich, and Yuri Georgievich Firsov. “Modern methods of the seafloor investigations for the explosive objects detection before the pipeline construction.” *Vestnik Gosudarstvennogo universiteta morskogo i rechnogo flota imeni admirala S. O. Makarova* 1(35) (2016): 47–59. DOI: 10.21821/2309-5180-2016-8-1-47-59.
7. Firsov, Yu. G., and I. V. Kozhukhov. “The new three dimensional visualization techniques for bathymetric engineering survey.” *Vestnik Gosudarstvennogo universiteta morskogo i rechnogo flota imeni admirala S. O. Makarova* 2(24) (2014): 17–23.
8. Farrell, J. *Aided navigation: GPS with high rate sensors*. McGraw-Hill Education, 2008.
9. Nassar, S. Improving the inertial navigation system (INS) error model for INS and INS/DGPS applications. Dr. Diss. National Library of Canada= Bibliothèque nationale du Canada, 2003.
10. Meijer, Gerwin A. L., K. R. Westertep, F. M. H. Verhoeven, H. B. M. Koper, and F. ten Hoor. “Methods to assess physical activity with special reference to motion sensors and accelerometers.” *IEEE Transactions on Biomedical Engineering* 38.3 (1991): 221–229. DOI: 10.1109/10.133202.
11. Godhaven, J-M. “Adaptive tuning of heave filter in motion sensor.” *OCEANS’98 Conference Proceedings*. Vol. 1. IEEE, 1998: 174–178. DOI: 10.1109/OCEANS.1998.725731.
12. Firsov, Ju. G. *Osnovy gidroakustiki i ispolzovaniya gidroakusticheskikh sonarov*. SPb.: Nestor-Istorija, 2010.
13. Liseckij, S. Ju., and D. P. Medvedenko. “Stek TCP/IP v tehnologicheskikh setjah.” *Programmnye produkty i sistemy* 3 (2005): 2.
14. Olsson, G., and D. Piani. *Cifrovye sistemy avtomatizacii i upravlenija*. SPb.: Nevskij Dialekt, 2001.
15. Agurov, P. V. *Posledovatel’nye interfejsy PK. Praktika programmirovaniya*. SPb.: BHV-Peterburg, 2004.
16. Ignatiev, A. S. “Distributed control systems development based on high-speed serial interface.” *Industrial Automatic Control Systems and Controllers* 12 (2008): 5–6.
17. Nachman, M., and R. H. Overton. Moored ship motion determination system: pat. № 5089972. USA, 1992.

18. Seo, Seong-Gi. "The use of pivot point in ship handling for safer and more accurate ship manoeuvring." *Proceedings of IMLA* 1.29 (2011): 271–280.

19. Bound, John, Charles Brown, and Nancy Mathiowetz. "Measurement error in survey data." *Handbook of econometrics* 5 (2001): 3705–3843. DOI: 10.1016/S1573-4412(01)05012-7.

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРЕ

Барашок Павел Иванович —
геодезист ГГП
ЗАО «РОМОНА»
693004, Российская Федерация,
г. Южно-Сахалинск, пр. Мира, 426
e-mail: pbarashok@mail.ru

INFORMATION ABOUT THE AUTHOR

Barashok, Pavel I. —
Surveyor
ROMONA Inc.
426 prospekt Mira, Yuzhno-Sakhalinsk,
693004, Russian Federation
e-mail: pbarashok@mail.ru

Статья поступила в редакцию 16 апреля 2017 г.

Received: April 16, 2017.

СУДОСТРОЕНИЕ И СУДОРЕМОНТ

DOI: 10.21821/2309-5180-2017-9-3-552-559

EXPERIMENTAL AND NUMERICAL STUDY OF CONSTRUCTIVE ENERGY-EFFICIENT PERFORMANCE ON THE TANK TANKER

E. A. Gorbaneva

Astrakhan State Technical University, Astrakhan, Russian Federation

To reduce heat losses through the deck of a bulk vessel when transporting highly viscous liquid cargo requiring heating, the author proposes an energy-saving solution in the form of an easy horizontal partition located above the heaters. Energy-saving effect is achieved due to lower temperature of the upper layer of cargo in the tank. The flow of heated liquid from tubular heaters located in the lower part of the tank is limited to a horizontal partition. The addition of a new structural element leads to a decrease in the speed of convective fluid mixing in the tank, the ascending streams of the heated cargo do not reach the free surface of the cargo, as a result of which heat losses through the deck are reduced. For practical implementation of this technology, it is necessary to solve the following tasks: the development of a methodology for calculating the tank tank heating system in the conditions of dividing the cargo into zones by a horizontal partition, optimizing the height of the partition above the heaters from the condition of achieving a balance between the minimum liquid surface temperature and the highest average temperature of the cargo volume in Tank, the determination of the pressure gradient in the partition zone to determine the dynamic loads on the partition from the convection A different flow of cargo.

To solve the set tasks, a set of studies was carried out to determine the effect of the partition on the operation of the tank heating system, and the velocity, pressure, and temperature fields were obtained. A significant number of determining parameters determined the main method of investigation numerical simulation, supplemented by experimental studies. Experimental studies have made it possible to identify the main regularities of the behavior of liquid cargo in a tank, as well as to assess the adequacy of the numerical model. Studies have shown that the proposed technology allows to reduce energy consumption for the load of cargo up to 10 %. The processing and generalization of the results obtained are carried out using the similarity theory.

The main results of the study are the obtained criterial equations used to develop the methodology for designing a heating system for a tank with energy-saving performance.

Keywords: numerical simulation, energy-efficient performance of the tank tanker, transport of high loads.

For citations:

Gorbaneva, Eugenia A. "Experimental and numerical study of constructive energy-efficient performance on the tank tanker." *Vestnik Gosudarstvennogo universiteta morskogo i rechnogo flota imeni admirala S.O. Makarova* 9.3 (2017): 552–559. DOI: 10.21821/2309-5180-2017-9-3-552-559.

УДК 661.21.002.6

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ И ЧИСЛЕННОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ЭНЕРГОЭФФЕКТИВНОГО КОНСТРУКТИВНОГО ИСПОЛНЕНИЯ ТАНКА НАЛИВНОГО СУДНА

Е. А. Горбанева

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

Для снижения потерь тепла через палубу наливного судна при перевозке высоковязких жидких грузов, требующих подогрева, предложено энергосберегающее решение в виде лёгкой горизонтальной перегородки, расположенной над подогревателями. Энергосберегающий эффект достигается за счёт снижения температуры верхнего слоя груза в танке. Поток нагретой жидкости от трубчатых подогревателей,

расположенных в нижней части танка, ограничивается горизонтальной перегородкой. Введение нового конструктивного элемента приводит к снижению скорости конвективного перемешивания жидкости в танке, восходящие потоки нагретого груза не достигают свободной поверхности груза, в результате чего снижаются потери тепла через палубу. Для практического внедрения этой технологии необходимо решение следующих задач: разработка методики расчёта системы подогрева танка наливного судна в условиях деления груза на зоны горизонтальной перегородкой, оптимизация высоты расположения перегородки над нагревателями из условия достижения баланса между минимальной температурой поверхности жидкости и максимально высокой средней температуры объёма груза в танке, определение градиента давления в зоне перегородки для определения динамических нагрузок на перегородку от конвективного потока груза.

Для решения поставленных задач был выполнен комплекс исследований по определению влияния перегородки на работу системы подогрева танка, получены поля скоростей, давлений и температур. Значительное число определяющих параметров определило основным методом исследования численное моделирование, дополненное экспериментальными исследованиями. Экспериментальные исследования позволили выявить основные закономерности поведения жидкого груза в танке, а также оценить адекватность численной модели. Исследования показали, что предложенная технология позволяет снизить расход энергии на подогрев груза до 10 %. Обработка и обобщение полученных результатов выполнены с применением теории подобия.

Основными результатами исследования являются полученные критериальные уравнения, использованные для разработки методики проектирования системы подогрева танка энергосберегающего исполнения.

Ключевые слова: численное моделирование, энергоэффективное исполнение танка наливного судна, перевозка высоковязких грузов.

Для цитирования:

Горбанева Е. А. Экспериментальное и численное исследование энергоэффективного конструктивного исполнения танка наливного судна / Е. А. Горбанева // Вестник Государственного университета морского и речного флота имени адмирала С. О. Макарова. — 2017. — Т. 9. — № 3. — С. 552–559. DOI: 10.21821/2309-5180-2017-9-3-552-559.

Введение

В Правилах морской перевозки нефти и нефтепродуктов наливом на танкерах Министерством морского флота (РД 31.11.81.36-81) регламентируется контроль управления температурой перевозимого груза. Наибольшие сложности возникают при перевозке нефти и мазута, которые относятся к застывающим жидкостям, так как в своем составе имеют большое количество тяжелых углеводородов и большое количество парафинов. Вязкость данных жидкостей в процессе снижения температуры быстро увеличивается и при сравнительно высокой температуре они становятся маловязкими. При снижении температуры ниже температуры застывания в жидкости выделяются кристаллы парафина, количество которых растет за счет понижения температуры. Данное свойство накладывает существенные ограничения на процесс транспортировки данного рода грузов. В связи с этим для перевозки высоковязких жидкостей используются узкоспециализированные суда, оборудованные системами подогрева. Предназначенные для данного рода грузов суда, как и все танкеры, имеют особенности конструктивного исполнения, такие как деление на отсеки (танки в которых непосредственно размещен груз), двойной борт, днище, изолированная палуба, наличие перегородок и систем подогрева груза. Очевидно, подогрев груза во время рейса до средней температуры 60 – 70 °С приводит к потерям тепла в окружающую среду. Учитывая, что одним из приоритетов в развитии проектирования судов в настоящее время является «экологическое» конструктивное исполнение корпуса и всего внутреннего оборудования, важным становится осуществление работ в соответствии с заданным технологическим режимом процесса транспортировки без загрязнения окружающей среды.

Значительный расход энергии на подогрев груза повышает себестоимость транспортировки [1]. Изменение конструкции танкера и установка теплоизоляции повышают стоимость судна, снижая расход энергии на подогрев. Учитывая, что танкеры могут перевозить не только высо-

ковязкие жидкости, добавленная стоимость повысит себестоимость перевозки других грузов. Отказ от энергосберегающих элементов в конструкции танкера снижает стоимость судна, но повышает затраты энергии на подогрев. Таким образом, важной задачей является выбор конструктивного исполнения танкера. Для низких температур окружающей среды и преимущественной транспортировки высоковязких грузов будет оправдано использование теплоизоляции, для тёплого климата и перевозок лёгких нефтепродуктов оправдано упрощение конструкции.

Значительные затраты на снижение потерь тепла не окупаются в том случае, когда танкер эксплуатируется в различных климатических зонах и перевозит широкий спектр нефтепродуктов, а также при реконструкции старых танкеров. Для судов, в которых использование теплоизоляции экономически нерентабельно, а затраты на подогрев груза велики, нами предложено техническое решение, основанное на повышении термического сопротивления со стороны самого груза, заключающееся в установке лёгких негерметичных перегородок в танке, предотвращающих прямой приток нагретого груза к стенкам танка и поверхности груза [2], [3].

Существующие методики расчёта потерь тепла от груза в окружающую среду и расчёта систем подогрева танка не учитывают особенности влияния добавленного конструктивного элемента на процессы теплообмена в танке. Это определяет актуальность проведения исследований для получения расчётных зависимостей и методики расчёта систем подогрева танка с делением жидкого груза в танке установкой облегчённых перегородок. Задача исследования заключается в теоретическом и экспериментальном исследовании работы систем подогрева в танке наливного судна при использовании энергосберегающих конструктивных элементов. Целью исследования является разработка методики расчёта систем подогрева наливного судна.

Методы и материалы

Исследование работы системы подогрева в танке является сложной научной задачей, так как зависит от значительного числа определяющих параметров. В связи с этим необходимость проведения большого числа экспериментов определило основным методом исследования численное моделирование, дополненное экспериментальными исследованиями. Разработанная численная модель танка, позволяющая оперативно варьировать определяющие параметры и получать информацию о поведении груза и работе систем подогрева, позволила выявить основные влияющие факторы и обобщить результаты исследований. Такие особенности численных моделей, как устойчивость решения и влияние используемого алгоритма на достоверность полученного результата [4] – [7], определяют необходимость многоуровневого контроля адекватности модели и полученных результатов сопоставлением с известными решениями и экспериментальной проверкой результатов. Полученные результаты не противоречат результатам известных исследований по транспорту и хранению нефтепродуктов [8] – [10]. Результаты расчёта работы систем подогрева, полученные автором, представлены в [11].

Экспериментальные исследования, проведённые на первом этапе исследования, позволили выявить основные закономерности поведения жидкого груза в танке при установке перегородок и определить влияющие на него параметры. Адекватность результатов, полученных на численной модели, проверена сопоставлением с имеющимися результатами натурных замеров и с данными, полученными при проведении экспериментов. Обработка и обобщение полученных результатов выполнены с применением теории подобия.

Экспериментальная установка моделирует танк наливного судна с системой подогрева, дополненный энергосберегающей горизонтальной перегородкой, размещённой над нагревателями. Для визуализации наблюдений установка выполнена из стекла.

Результаты

Экспериментальная установка представляет собой модель танка наливного судна с облегчённой горизонтальной перегородкой, расположенной над подогревателями, которая позволяет сократить потери тепла от зеркала свободной поверхности жидкости.

Модель (рис. 1) включает в себя корпус танка 1, нагревательные элементы 2, горизонтальную легкую перегородку 3, которая устанавливается в объеме жидкости с зазором относительно зеркала свободной поверхности, горячий объем жидкости 4, холодный слой 5 между зеркалом свободной поверхности жидкости и перегородкой. Предлагаемый конструктивный элемент в виде легкой горизонтальной проницаемой перегородки 3 (см. рис. 1) устанавливают параллельно оси подогревателей 2 в объеме жидкости танка 1, ниже зеркала свободной поверхности жидкости [3].

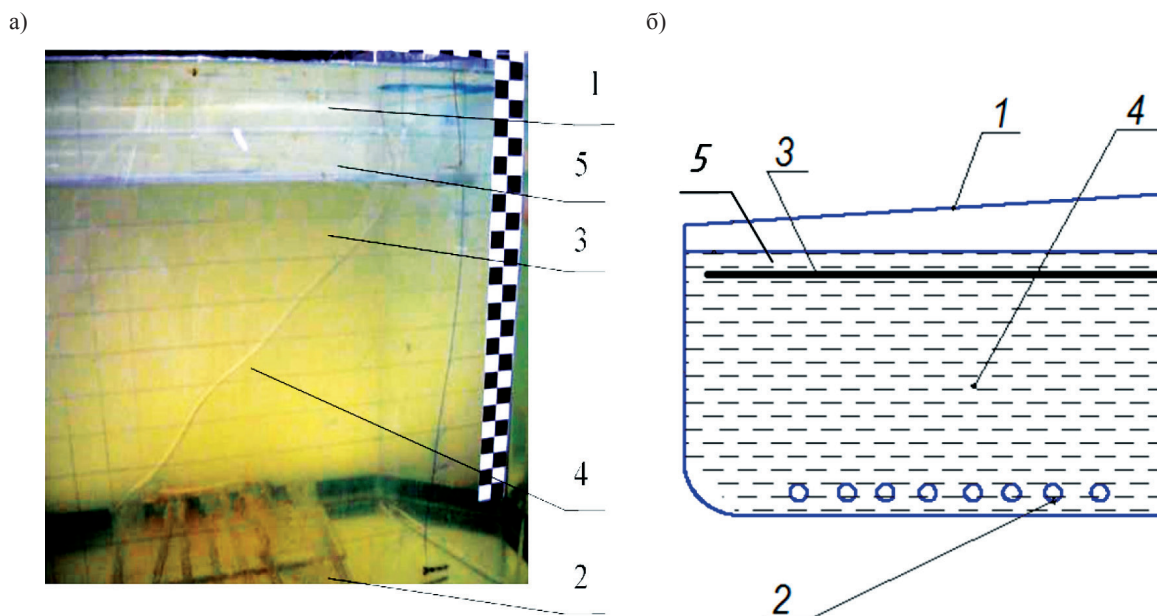


Рис. 1. Модель танка: а — общий вид экспериментальной установки; б — принципиальная схема экспериментальной установки

Принцип работы модели следующий: в процессе работы нагревательных элементов 2, расположенных в донной части корпуса танка 1, горячая жидкость за счет разности температур поднимается вверх, смешиваясь с холодными слоями, формируя устойчивое поле течения и повышая температуру ядра 4. Установка горизонтальной перегородки 3 позволяет отделить холодный слой жидкости 5 у свободной поверхности от высокотемпературного ядра 4. Выполненные в перегородке перфорации позволяют произвести процесс отгрузки с минимальным мертвым остатком.

Движения жидкости в экспериментальной установке снималось на видео, которое впоследствии обрабатывалось для получения траекторий и скорости движения груза в различных точках установки. Визуализация обеспечивалась добавкой в жидкость порций красителя. Данная методика позволяет измерить векторы скоростей по величине и направлению. Применяя счетчик кадров и наблюдая движение красителя относительно линий разметки, определяли время прохождения красителем контрольных отрезков. Полученные данные по траекториям и скорости движения были сопоставлены с результатами расчёта на численной модели. Проведенные эксперименты и полученные данные подтвердили наличие зон, определяющих особенности процесса теплообмена в танке при оборудовании его дополнительным конструктивным элементом в виде горизонтальной перегородки.

Обсуждение

В процессе исследования были выявлены следующие характерные зоны, определяющие особенности свободно- конвективного теплообмена в танке.

I зона — восходящий след от подогревателей (рис. 2, а).

II зона — смешение с основным объемом и, как следствие, перемещение к вертикальной стенке вблизи горизонтальной перегородки (рис. 2, б). Нагретая жидкость от подогревателей поднимается вверх, смешиваясь с основным объемом жидкости, повышает температуру ядра, а затем за счет свободно-конвективного течения перемещается к боковой вертикальной холодной стенке и остывая, опускается вниз. При этом в связи формируется устойчивое циркуляционное течение в объеме жидкости. Движущей силой данного процесса является разность температур. За счет высокой скорости и достаточной разности температуры, так как плотность нагретой жидкости вихря меньше плотности ядра, происходит циркуляция жидкости и наблюдается нагретый след, который по мере перемещения через перегородку к свободной поверхности остывает. В результате увеличения плотности при понижении температуры жидкости этот слой жидкости начинает опускаться вниз, стекая вдоль горизонтальной поверхности к вертикальной стенке и движется к подогревателям.

III зона — возникновение ячеистого движения жидкости над перегородкой в центре емкости показана на рис. 2, в. В центральной части, в зазоре между верхней поверхностью перегородки и зеркалом свободной поверхности жидкости, можно выделить небольшую *застойную зону*. Как отмечалось ранее, энергосберегающий эффект достигается снижением градиента температур вблизи поверхности. Малость температурного напора в сочетании с относительно малым зазором затрудняет формирование циркуляционных ячеек у свободной поверхности груза. Вдоль борта в угловой зоне потери тепла растут за счёт взаимного влияния холодной поверхности и холодного борта. Это приводит к формированию в угловых зонах устойчивых циркуляционных ячеек.

IV зона — ячеистое течение жидкости от нижней поверхности перегородки к ядру груза (рис. 2, г). В отличие от известных закономерностей движения груза в танке с формированием одного вихря от нагревателей к свободной поверхности и вдоль борта вниз, перегородка привела к образованию ряда вихрей при малых градиентах температур между ядром груза и нижней поверхностью перегородки.

V зона. Формирование этой зоны (рис. 2, д) происходит только при наличии зазора между горизонтальной перегородкой и бортом. Значительная разность плотностей жидкости, из-за переохлаждения жидкости над перегородкой, приводит к интенсивному ее «подтягиванию» из зазора между перегородкой и зеркалом свободной поверхности в зазор между перегородкой и вертикальной стенкой с образованием двух вихрей: в сторону свободной поверхности и в сторону зазора. Очевидно, что подобное перемещение груза из высокотемпературного ядра к свободной поверхности приведёт к росту потерь тепла через палубу. Проведенные исследования показали целесообразность обеспечения условия проницаемости горизонтальной перегородки только на время погрузки / выгрузки нефтепродукта из танка. Во время рейса зазоры целесообразно минимизировать.

VI зона (рис. 2, е) демонстрирует формирование вихревого движения жидкости и движение к зеркалу свободной поверхности с дальнейшим торможением за счет остывания в угловой зоне между бортом и нижней поверхностью перегородки. Вторичное воздействие вихря на жидкость приводит к образованию второго вихря, который движется вдоль вертикальной стенки.

VII зона (рис. 2, ж) демонстрирует ячеистое движение остывающих слоев жидкости в придонной области с образованием двух вихрей. Течение в зоне 1 определяется вихреобразованием в области высокотемпературного ядра, формируемым двумя течениями: восходящие потоки от нагревателей и нисходящее движение груза вдоль борта. Течение в зоне 2 формируется под влиянием работы подогревателей, в результате работы которых слои жидкости опускаются в застойную угловую область и «подтягиваются» вдоль донной части танка в зазоре между дном и подогревателями. В результате работы подогревателей формирующееся циркуляционное свободно-конвективное движение общего объема жидкости танка образует вихри, которые способствуют смешению холодных оседающих слоев с нагретыми над подогревателями, за счет чего происходит подъем слоя груза вверх к центральной части емкости.

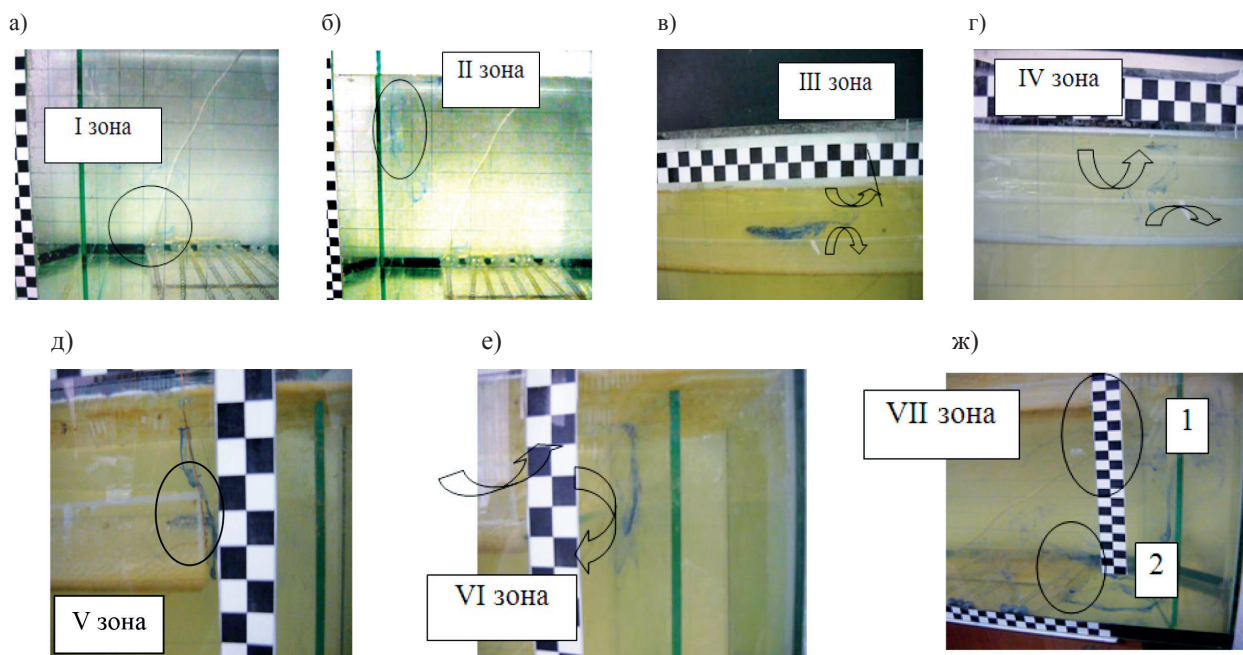


Рис. 2. Основные зоны, определяющие особенности свободно-конвективного теплообмена в танке:

- a* — I зона — восходящий поток (тепловой след нагревателей);
- б* — II зона — движение жидкости вдоль вертикальной стенки около перегородки;
- в* — III зона — центр емкости над горизонтальной поверхностью;
- г* — IV зона — движение потоков вблизи вертикальной стенки над горизонтальной поверхностью;
- д* — V зона — сток жидкости непосредственно в угловой зоне; *е* — VI зона — угловая;
- ж* — VII зона — стекание слоя жидкости с горизонтальной перегородки вдоль вертикальной

Таким образом, анализируя ранее изложенное, можно сделать вывод о сложном характере теплообмена и взаимосвязи конструктивных особенностей танка с учетом добавленных новых элементов в работе теплоэнергетического оборудования судна и свойств жидкости.

Заключение

На основании результатов проведенных экспериментов выявлены основные закономерности и выделены характерные зоны движения груза, полей скоростей и температур, используемых в дальнейших исследованиях для проверки адекватности используемой численной модели.

Эксперименты подтвердили полученные ранее результаты расчетов [11]. Для расчета потерь тепла через палубу в диапазоне изменения числа Рэлея $1 \cdot 10^{11} \leq Ra \leq 12 \cdot 10^{11}$ предложено критериальное уравнение [11]:

$$Nu = 2Ra^{0,6014} \cdot (-0,05H_{\text{перг}}^3 + 0,4 \cdot H_{\text{перг}}^2 - 0,7H + 1,4).$$

Установка в танке горизонтальной перегородки над нагревателями позволяет снизить расход энергии на подогрев нефтепродукта на 7 – 11 %.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Бердина М. Ю. Морской транспорт в системе международных бизнес-операций / М. Ю. Бердина, Е. К. Торосян // Современные проблемы науки и образования. — 2015. — № 1-1. — С. 558.
- Пат. 104542 Российская Федерация, МПК В 65 D 88/74. Устройство для снижения тепловых потерь от разогретой жидкости в танках судна / П. В. Яковлев, Е. А. Горбанева, Ю. А. Аляутдинова, Н. Б. Ачилова; заявитель и патентообладатель ФГОУ ВПО АГТУ. — № 2010150226/12; заявл. 07.12.2010; опублик. 20.05.2011, Бюл. № 14. — 3 с.

3. Пат. № 154604 Российская Федерация, МПК В 65D 88/74. Устройство для снижения теплотерь от разогретой жидкости в танках судна / П. В. Яковлев, Е. А. Горбанева; заявитель и патентообладатель ФГОУ ВПО АГТУ. — № 2015105857/12; Заявлено 19.02.2015; Опубл. 27.08.2015, Бюл. № 24. — 3 с.
4. Мартюшев С. Г. Численный анализ сопряженной термогравитационной конвекции и теплового поверхностного излучения в замкнутом кубе, заполненном диатермичной средой / С. Г. Мартюшев, И. В. Мирошниченко, М. А. Шеремет // Вестник Удмуртского университета. Математика. Механика. Компьютерные науки. — 2014. — № 2. — С. 111–120.
5. Макаров С. С. Математическая модель охлаждения высокотемпературных металлических заготовок квазистационарным потоком воды с пузырьками воздуха / С. С. Макаров, К. Э. Чекмышев, Е. В. Макарова // Вестник ИжГТУ им. М. Т. Калашникова. — 2015. — № 4 (68). — С. 5–9.
6. Липанов А. М. Численное исследование охлаждения высокотемпературного металлического цилиндра потоком газожидкостной среды / А. М. Липанов, С. С. Макаров, А. И. Карпов, Е. В. Макарова // Теплофизика и аэромеханика. — 2017. — Т. 24. — № 1 (103). — С. 53–60.
7. Липанов А. М. Численные решения задач охлаждения высокотемпературных металлических тел потоками жидкости / А. М. Липанов, С. С. Макаров // Труды Института механики УрО РАН «Проблемы механики и материаловедения». — Ижевск: Ин-т механики Уральского отд. РАН, 2015. — С. 180–192.
8. Головчун С. Н. Моделирование тепломассопереноса в судовых системах подогрева высоковязких топлив и жидких грузов: дис. ... канд. техн. наук / С. Н. Головчун. — Астрахань, 2010. — 135 с.
9. Моисеев В. И. Теория и модели процессов тепломассопереноса при транспортных операциях с застывающими наливными грузами: дис. ... д-ра техн. наук / В. И. Моисеев. — СПб., 2012. — 463 с.
10. Моисеев В. И. Естественная конвекция горячих нефтепродуктов при перевозках в условиях низких температур / В. И. Моисеев // «Математика в вузе»: тр. XXII Междунар. науч.-практ. конф. — СПб.: ПГУПС, 2010. — С. 132–136.
11. Яковлев П. В. Моделирование процессов тепломассообмена при перевозке высокозастывающих грузов водным транспортом / П. В. Яковлев, Ю. А. Аляутдинова, Е. А. Горбанева // Вестник Астраханского государственного технического университета. Серия: Морская техника и технология. — 2009. — № 2. — С. 104–109.

REFERENCES

1. Berdina, M. Yu., and E. K. Torosyan. "Maritime transport in international business operations." *Modern problems of science and education* 1-1 (2015): 558.
2. Jakovlev, P. V., E. A. Gorbaneva, Ju. A. Aljautdinova, and N. B. Achilova. RU 104 542 U1, IPC B 65 D 88/74. Ustrojstvo dlja snizhenija teplopoter' ot razogretoj zhidkosti v tankah sudna. Russian Federation, assignee. Publ. 20 May 2011.
3. Jakovlev, P. V., and E. A. Gorbaneva. RU 154 604 U1, IPC B 65 D 88/74. Ustrojstvo dlja snizhenija teplopoter' ot razogretoj zhidkosti v tankah sudna. Russian Federation, assignee. Publ. 27 Aug. 2015.
4. Martyushev, Semen Grigor'evich, Igor' Valer'evich Miroshnichenko, and Mikhail Aleksandrovich Sheremet. "Numerical analysis of conjugate natural convection and thermal surface radiation in a cube filled with diathermanous medium." *The Bulletin of Udmurt University. Mathematics. Mechanics. Computer Science* 2 (2014): 111–120.
5. Makarov, S. S., K. E. Chekmyshev, and E. V. Makarova. "Mathematical Model of High-Temperature Metal Blanks Cooling by Quasi-stationary Stream of Water with Air Bubbles." *Bulletin of Kalashnikov ISTU* 4(68) (2015): 5–9.
6. Lipanov, A. M., S. S. Makarov, A. I. Karpov, and E. V. Makarova. "Chislennoe issledovanie okhlazhdeniya vysokotemperaturnogo metallichesкого tsilindra potokom gazozhidkostnoi sredy." *Teplofizika i aeromekhanika* 24.1(103) (2017): 53–60.
7. Lipanov, A. M., and S. S. Makarov. "Chislennye resheniya zadach okhlazhdeniya vysokotemperaturnykh metallicheskich tel potokami zhidkosti." *Trudy Instituta mekhaniki UrO RAN «Problemy mekhaniki i materialovedeniya»*. Izhevsk: Institut mekhaniki Ural'skogo otdeleniya RAN, 2015: 180–192.
8. Golovchun, S. N. Modelirovanie teplomassoperenosa v sudovykh sistemakh podogreva vysokovязkikh topliv i zhidkikh грузов. PhD diss. Astrakhan: Astrakhan State Technical University, 2010.
9. Moiseev, V. I. Teorija i modeli processov teplomassoperenosa pri transportnyh operacijah s zastyvajushhimi nalivnymi грузами. Dr. diss. SPb., 2012.

10. Moiseev, V. I. "Estestvennaja konvekcija gorjachih nefteproduktov pri perevozkah v uslovijah nizkih temperature." *«Matematika v vuze»: tr. XXII Mezhdunarodnoj nauchno-prakticheskoy konferencii*. SPb.: PGUPS, 2010. 132–136.

11. Yakovlev, Pavel Viktorovich, Yulia Amirovna Alyautdinova, and Evgeniya Aleksandrovna Gorbaneva. "Design of processes of heat-mass transfer while transportation of high-viscosity loads by water." *Vestnik of Astrakhan State Technical University. Series: Marine Engineering and Technologies 2* (2009): 104–109.

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

Горбанева Евгения Александровна —
аспирант
Научный руководитель:
Яковлев Павел Викторович
ФГБОУ ВО «Астраханский государственный
технический университет»
414056, Российская Федерация, г. Астрахань,
ул. Татищева, 16
e-mail: eugine-astra@rambler.ru

INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Gorbaneva, Eugenia A. —
Postgraduate
Supervisor:
Yakovlev, Pavel V.
Astrakhan State Technical University
16 Tatishcheva Str., Astrakhan, 414056,
Russian Federation
e-mail: eugine-astra@rambler.ru

*Статья поступила в редакцию 26 декабря 2016 г.
Received: December 26, 2016.*

**ANALYSIS OF FORCES AND DEFORMATIONS
IN THE SHIP FRAME SIMULATED BY TRUSS****M. N. Kirsanov**National Research University “Moscow Power Engineering Institute”,
Moscow, Russian Federation

Considered a promising model of the hinge-rod statically determinate frame in a circular shape. The inner core zone design and external diagonal bars are connected by radial struts. The geometry of the truss defined by a center angle of the arc design, radius, number of panels and the distance between the belts (length of columns). Determined the stress and strain state of the structure in the two schemes of loading by concentrated forces. In the first case, the scheme operates as an arch under the action of a concentrated force at Midspan, the second structure is bent as a horseshoe in two mutually opposite forces at its ends. The forces in the rods is determined by the method of sections. The design includes four types of rods, the rods of one type have the same length, and the efforts — like shape. To determine the deflection using a formula of Maxwell - Mohr considering that all components work only in tension and compression, and the stiffness of the rods are the same. The structure of solutions for forces, has the form of finite sums. By the methods of computer algebra system Maple, one can obtain the values of these sums, which significantly simplifies the solution. Plots of deformation and geometrical parameters and distribution curves of the stresses in the bars of the structure are obtained. Separately the problem of mounting the structure with the condition of location of the rods in the absence of their bending out of the plane is solved. It is shown that this condition coincides with the condition of the edge proper coloring of the graph structure. An example of coloring is made using special operator system Maple. It is noticed that standard operator Edge Chromatic Number from the Graph Theory package does not allow to correctly solve the problem of installation of trusses with non-planar lattices. Given the recommendation to overcome this shortcoming.

Keywords: truss, deflection, analytical solution, Maple, induction, edge-coloring.

For citation:

Kirsanov, Mikhail N. “Analysis of forces and deformations in the ship frame simulated by truss.” *Vestnik Gosudarstvennogo universiteta morskogo i rechnogo flota imeni admirala S. O. Makarova* 9.3 (2017): 560–569. DOI: 10.21821/2309-5180-2017-9-3-560-569.

УДК 629.7.015 .4: 624.044.2**АНАЛИЗ УСИЛИЙ И ДЕФОРМАЦИЙ В КОРАБЕЛЬНОМ ШПАНГОУТЕ,
МОДЕЛИРУЕМОМ ФЕРМОЙ****М. Н. Кирсанов**Национальный исследовательский университет «МЭИ»,
Москва, Российская Федерация

Рассмотрена перспективная модель шарнирно-стержневого статически определимого шпангоута кругового очертания. Внутренний стержневой пояс конструкции и внешний соединены раскосной решеткой с радиальными стойками. Геометрия фермы определяется центральным углом дуги конструкции, радиусом, числом панелей и расстоянием между поясами (длиной стоек). Определяется напряженное и деформированное состояние конструкции в двух схемах нагружения сосредоточенными силами. В первом случае схема работает как безраспорная арка под действием сосредоточенной силы в середине пролета, во втором — конструкция изгибается как подкова двумя взаимно противоположными силами по ее концам. Усилия в стержнях определяются методом сечений. Конструкция содержит четыре типа стержней, стержни одного типа имеют одинаковую длину. Для определения прогиба используется формула Максвелла–Мора с учетом того, что все элементы конструкции работают только на растяжение и сжатие, а жесткости стержней одинаковы. Структура решений для усилий имеет вид конечных сумм. Методами системы компьютерной математики Maple удается получить значения этих сумм, что существенно упрощает решение. Построены графики зависимости деформаций от геометрических параметров и кри-

вые распределения усилий в стержнях конструкции. Отдельно решается проблема монтажа конструкции из условия отсутствия изгиба стержней из плоскости. Показано, что это условие совпадает с условием правильной реберной раскраски графа конструкции. Приведен пример раскраски, выполненный с привлечением специального оператора системы Maple. Отмечается недостаток стандартного оператора Edge Chromatic Number из пакета Graph Theory, не позволяющий правильно решать задачу монтажа ферм с непланарными графами решеток. Дана рекомендация по устранению этого недостатка.

Ключевые слова: ферма, прогиб, аналитическое решение, Maple, индукция, реберная раскраска.

Для цитирования:

Кирсанов М. Н. Анализ усилий и деформаций в корабельном шпангоуте моделируемого фермой / М. Н. Кирсанов // Вестник Государственного университета морского и речного флота имени адмирала С. О. Макарова. — 2017. — Т. 9. — № 3. — С. 560–569. DOI: 10.21821/2309-5180-2017-9-3-560-569.

Введение

Основными конструктивными элементами судна, отвечающими за жесткость и прочность корпуса, являются поперечные шпангоуты, которые традиционно выполняются в виде жесткой рамы. Использование ферменных конструкций в составе корпуса судна всегда было предметом отдельного рассмотрения Российского морского и Российского речного регистров судоходства, а применение соединений шпангоутов способом рамных стоек, распоров и раскосов требует отдельного расчета.

Шпангоуты из стержневых элементов обладают лучшим сочетанием прочности и веса по сравнению с рамными элементами, но уступают по сложности технологии изготовления и монтажа. Наибольший эффект от применения ферменных конструкций можно ожидать применительно к малым (негрузовым) судам, в надстройках судов, в судах из композиционных материалов и для корпусов, которые омоноличиваются совместно с обшивкой. Здесь нет особого экономического смысла использовать рамные шпангоуты, поскольку их габаритно-массовые характеристики будут заведомо хуже, чем у рамной конструкции. Подобные решения хорошо зарекомендовали себя в авиа- и ракетостроении.

Традиционным способом расчета напряженно-деформированного состояния и жесткости шпангоутов является *метод конечных элементов* [1] – [4]. Другой подход, развитый в строительной механике плоских и пространственных ферм, — *аналитический*, основан на методе индукции с применением системы компьютерной математики, например, Maple. Правила Российского речного регистра судоходства содержат подробные аналитические методы для расчета местной прочности продольных переборок и ферм, раскосных ферм.

В данной работе предлагаются точные формульные решения для регулярных периодических структур и произвольной нагрузки, которые в дальнейшем при развитии предлагаемого подхода позволят моделировать судовой шпангоут фермой. Преимущество развиваемого подхода заключается в возможности широкой автоматизации расчетов с помощью использования распространенного программного обеспечения в сочетании с аналитическими оценками.

Простейшей моделью стержневого шпангоута может служить плоская ферма с криволинейным (круговым) очертанием (рис. 1) — нагружение 1. При этом наиболее важной информацией о жесткости конструкции могут служить три деформационные характеристики: вертикальный прогиб под действием вертикальной нагрузки, горизонтальное смещение опоры под действием этой же нагрузки и сближение опор под действием горизонтальных сил, приложенных к концам фермы. В отличие от работ [5] – [7], метод составления и решения системы уравнений равновесия всех узлов фермы для такой задачи не подходит — уравнения и решения получаются весьма громоздкими, а время их вывода нереально большим. Связано это с тем, что параметр индукции (число панелей) входит в этой задаче в направляющие углы фермы, в то время как в балочных фермах и фермах с параллельными поясами число различных углов, задающих направляющие косинусы, т. е. коэффициенты уравнений равновесия, ограничено и не зависит от параметра индукции. Поэтому в рассматриваемой задаче принят другой способ вычисления усилий — *метод сечений*.

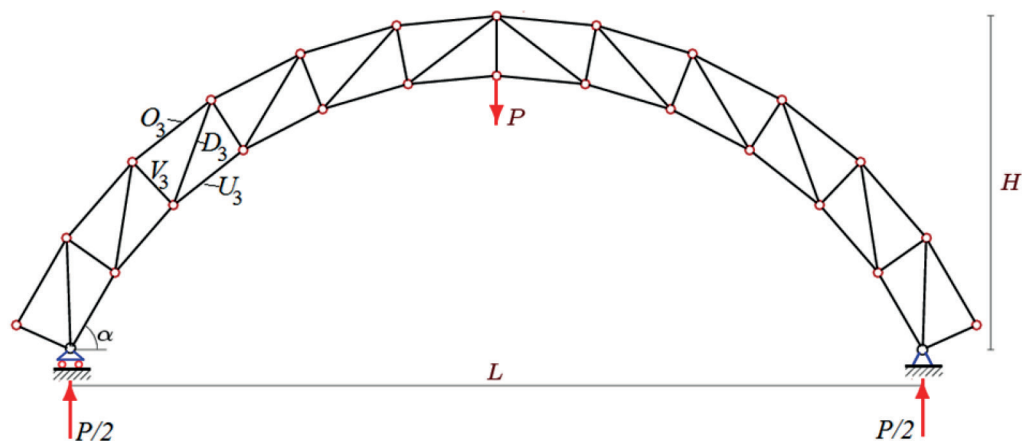


Рис. 1. Нагружение вертикальной сосредоточенной силой при $n = 2k = 12$ (схема нагрузок 1)

Ниже для получения основных формул выводятся выражения для усилий четырех типов стержней (стержни поясов, стоек и раскосов), которые включаются в интеграл Максвелла–Мора при вычислении прогиба. Большой удачей является возможность найти конечные суммы, входящие в выражения для усилий в стержнях.

Конструкция и усилия в стержнях

Рассмотрим ферму с четным числом панелей $n = 2k$ (рис. 2). Панель (ячейка периодичности) фермы состоит из пяти стержней. Нижний пояс образуют стержни длиной a , стойки — стержни длиной b , верхний пояс — стержни длиной $v = a + 2c$, где $c = b \sin(\beta/2)$. Боковые панели наклонены к горизонту под углом α , а угол β выражается как $\beta = 2\alpha / (2k - 1)$. Раскосы фермы имеют длину $d = \sqrt{(a+c)^2 + u^2}$ и образуют с поясами угол $\gamma = \arccos((a+c)/d)$. Расстояние между стержнями поясов $u = b \cos(\beta/2)$.

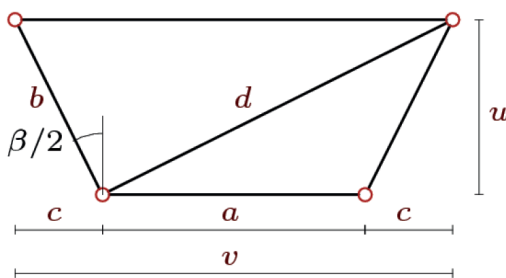


Рис. 2. Элемент шпангоута

Шарнирные опоры по концам фермы условны. В реальной конструкции (например, корабля) шпангоут крепится к внешнему корпусу судна или расположен внутри двойного корпуса, образуя наряду с основным шпангоутом дополнительный элемент жесткости. В предлагаемой схеме опоры служат только для оценки вертикальной жесткости фермы, а при оценке горизонтальной жесткости под действием горизонтальных сил, приложенных к крайним узлам, могут и вовсе не входить в расчетную схему. Высота фермы определяется другими геометрическими параметрами конструкции как конечная сумма: $H = b + a \sum_{i=1}^k \sin(\alpha - (i-1)\beta)$. С помощью системы Maple оператором `sum` удастся вычислить сумму:

$$H = (1/2)(a(\sin(\varphi(2k+1)) - 2\sin\varphi - \sin\alpha) + 2b(\cos(2\varphi) - 1) / (\cos(2\varphi) - 1), \quad (1)$$

где $\varphi = \alpha / (2k - 1)$.

Аналогично для длины пролета фермы имеем выражение

$$L = 2a \sum_{i=1}^k a \cos(\alpha - (i-1)\beta) = a(\cos(\varphi(2k+1)) - \cos \alpha) / (\cos(2\varphi) - 1). \quad (2)$$

Заметим, что в данном случае термин «пролет» не совсем точно соответствует действительности и применен в большей степени по традиции. Рассматриваемая конструкция шпангоута может быть и практически замкнутой при $L \approx 0$, например, в конструкции корпуса подводной лодки или фюзеляжа самолета. Поэтому L — это просто одна из геометрических характеристик конструкции, зависящая от числа панелей, размера панели a и угла α . Размер конструкции можно также охарактеризовать радиусом описанной окружности $R = (a/2 + c) / \sin(\beta/2)$ и вписанной окружности $r = a / (2 \sin(\beta/2))$.

Введем обозначения для усилий стержней. Усилия в стержнях верхнего (или внешнего) пояса обозначим $O_{j,i}$ с индексами, указывающими на тип нагрузки ($j = 1, 2$) и номер панели ($i = 1, \dots, k$). Аналогично для усилий нижнего (внутреннего) пояса введено обозначение $U_{j,i}$, для стоек — $V_{j,i}$, где $i = 1, \dots, k+1$, для раскосов — $D_{j,i}$ ($i = 1, \dots, k$).

Рассмотрим нагружение сосредоточенной силой в среднем узле фермы (см. рис. 1). Методом Риттера находим усилие в стержне верхнего пояса i -й панели:

$$O_{1,i} = -(P/2)h_i / u, \quad i = 1, \dots, k,$$

где $h_i = \sum_{j=1}^{i-1} a \cos(\alpha - (j-1)\beta)$.

Конечная сумма, входящая в выражение для плеча реакции опоры, может быть вычислена средствами Maple:

$$h_i = (a/2)(\cos(\varphi(1+2k)) - \cos \alpha - \cos(\varphi(2i-2k-3)) + \cos(\varphi(2i-2k-1))) / (\cos(2\varphi) - 1).$$

Для усилий в стержнях нижнего пояса также методом Риттера из уравнения моментов получим

$$U_{1,i} = (P/2)g_i / u, \quad i = 1, \dots, k, \quad g_i = d \cos(\gamma + \alpha) + v \sum_{j=1}^{i-1} a \cos(\alpha - j\beta).$$

Конечная сумма, входящая в это выражение, также может быть найдена следующим образом:

$$g_i = d \cos(\gamma + \alpha) - \frac{v(\cos \alpha - \cos(\varphi(2k-3)) - \cos(\varphi(2i-1-2k)) + \cos(\varphi(2i-2k+1)))}{4 \sin^2 \varphi}.$$

Усилия в раскосах находим из уравнения проекций на ось, перпендикулярную поясам:

$$D_{1,i} = -(P/2) \cos(\alpha - (i-1)\beta) / \sin \gamma.$$

Усилия в стойках $2, \dots, k-1$ можно также найти методом Риттера, однако с учетом уже найденных усилий значительно проще эти величины найти методом вырезания узлов:

$$V_{1,i+1} = -(O_{1,i+1} \sin \beta + D_{1,i} \sin \gamma) / \cos(\beta/2), \quad i = 1, \dots, k-1.$$

Отдельно вычисляются усилия в крайних панелях:

$$V_{1,1} = 0, \quad V_{1,k+1} = -2(O_{1,k} \sin(\beta/2) + D_{1,k} \sin(\beta/2 + \gamma)).$$

Проверка этого решения была проведена по уже отработанной в публикациях [5] – [7] схеме и программе [8], написанной для системы Maple [9] в численной моде, где отмеченный недостаток, связанный с громоздкостью формул, отсутствует. Схожие формулы этим же методом получаются

и в случае нагружения фермы горизонтальными силами (рис. 3). При этом все моментные точки и уравнения не меняются, что упрощает решение.

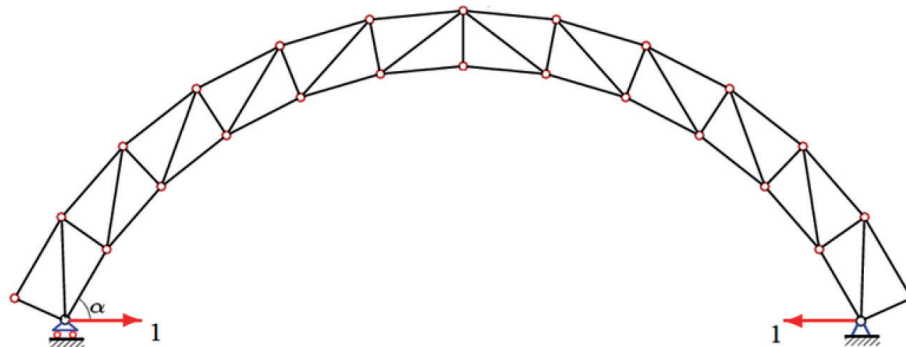


Рис. 3. Нагружение опор единичной силой (схема нагрузок 2)

Усилие в стержнях верхнего (наружного) пояса:

$$O_{2,i} = -h'_i / u, \quad i = 1, \dots, k,$$

$$h'_i = \sum_{j=1}^{i-1} a \sin(\alpha - (j-1)\beta) =$$

$$= (a/2) (\sin(\varphi(1+2k)) - \sin \alpha + \sin(\varphi(2i-2k-3)) - \sin(\varphi(2i-2k-1))) / (\cos(2\varphi) - 1).$$

Усилие в нижнем (внутреннем) поясе:

$$U_{2,i} = g'_i / u, \quad i = 1, \dots, k,$$

$$g'_i = d \sin(\gamma + \alpha) + v \sum_{j=1}^{i-1} a \sin(\alpha - j\beta) = d \sin(\gamma + \alpha) +$$

$$+ (v/2) (\sin \alpha - \sin(\varphi(2k-3)) + \sin(\varphi(2i-1-2k)) - \sin(\varphi(2i-2k+1))) / (\cos(2\varphi) - 1).$$

Усилия в раскосах:

$$D_{2,i} = \sin(\alpha - (i-1)\beta) / \sin \gamma.$$

Усилия в стойках:

$$V_{2,i+1} = -(O_{2,i+1} \sin \beta + D_{2,i} \sin \gamma) / \cos(\beta/2), \quad i = 1, \dots, k-1;$$

$$V_{2,1} = 0, \quad V_{2,k+1} = -2(O_{2,k} \sin(\beta/2) + D_{2,k} \sin(\beta/2 + \gamma)).$$

Деформации

Прогиб конструкции в упругой стадии работы определяем по формуле Максвелла–Мора, разбивая сумму на слагаемые, отвечающие отдельным группам стержней. Такое представление решения помимо наглядности формул позволит при желании легко учесть различные жесткости стержней введением поправочных коэффициентов. Вертикальное смещение (прогиб) конструкции на двух опорах под действием сосредоточенной силы (см. рис. 1) состоит из четырех слагаемых:

$$\Delta_{1,V} = \sum_{i=1}^k V_{1,i}^2 b; \quad \Delta_{1,U} = \sum_{i=1}^k U_{1,i}^2 a; \quad \Delta_{1,O} = \sum_{i=1}^k O_{1,i}^2 v; \quad \Delta_{1,D} = \sum_{i=1}^k D_{1,i}^2 d.$$

При такой нагрузке, используя решения для схем на рис. 1 и 3, определяем горизонтальное смещение опор:

$$\Delta_{2,V} = \sum_{i=1}^k V_{1,i} V_{2,i} b; \quad \Delta_{2,U} = \sum_{i=1}^k U_{1,i} U_{2,i} a; \quad \Delta_{2,O} = \sum_{i=1}^k O_{1,i} O_{2,i} v; \quad \Delta_{2,D} = \sum_{i=1}^k D_{1,i} D_{2,i} d.$$

Деформацию (сближение концов арки) при действии горизонтальных сил по ее концам получаем в виде

$$\Delta_{3,V} = \sum_{i=1}^k V_{2,i}^2 b; \quad \Delta_{3,U} = \sum_{i=1}^k U_{2,i}^2 a; \quad \Delta_{3,O} = \sum_{i=1}^k O_{2,i}^2 v; \quad \Delta_{3,D} = \sum_{i=1}^k D_{2,i}^2 d.$$

Во всех трех задачах полная деформация определяется из суммы

$$EF\Delta_j = 2(\Delta_{j,U} + \Delta_{j,D} + \Delta_{j,V} + \Delta_{j,O}) + V_{j,k+1}^2 h, \quad j = 1, 2, 3.$$

Обозначим относительный прогиб $\Delta'_j = \Delta_j EF / P$, $j = 1, 2, 3$. Приведем численный пример для случая нагружения 1. Пусть $a = 6$ м, $b = 1$ м, $\alpha = \pi/2$, $k = 10$ (рис. 4). По формулам (1) и (2) можно вычислить размеры $\underline{L} = 72,4$ м; $H = 40,3$ м. Знаки усилий по длине дуги не меняются (рис. 5), а усилия по модулю, естественно, возрастают к середине пролета:

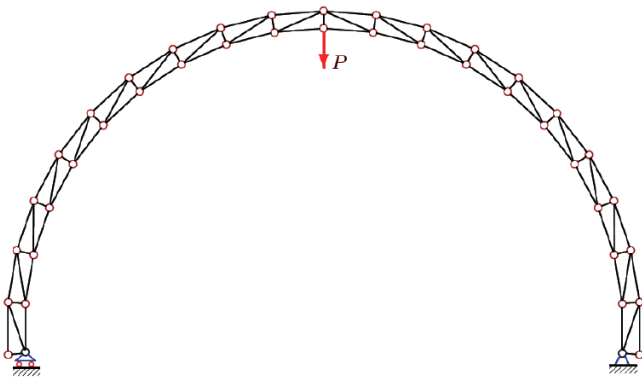


Рис. 4. Ферма при $\alpha = \pi/2$, $k = 10$

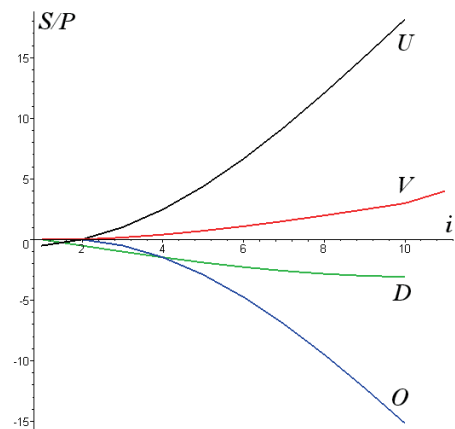


Рис. 5. Распределение усилий в стержнях

Относительный прогиб здесь $\Delta'_1 = 245,1$. Зависимость трех полученных решений от угла α при $L = 100$ м и фиксированном числе секций k представлена графически на рис. 6, а. Интересно отметить, что прогиб фермы при схеме нагружения 1 почти не зависит от угла α , а при некотором угле (в данном случае $\alpha \approx 35^\circ$) все три решения практически совпадают. Кривые на рис. 6, б иллюстрируют все три полученных решения как функции числа секций при фиксированных геометрических данных $\alpha = 30^\circ$, $\underline{L} = 100$ м, $h = 3$ м. Из графика следует, что «дробление» конструкции на большее число секций увеличивает жесткость фермы при любых нагрузках.

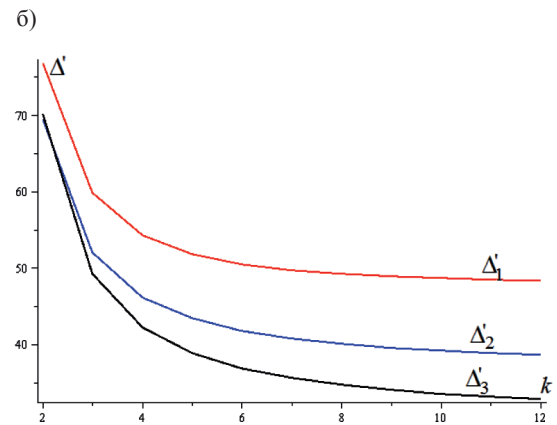
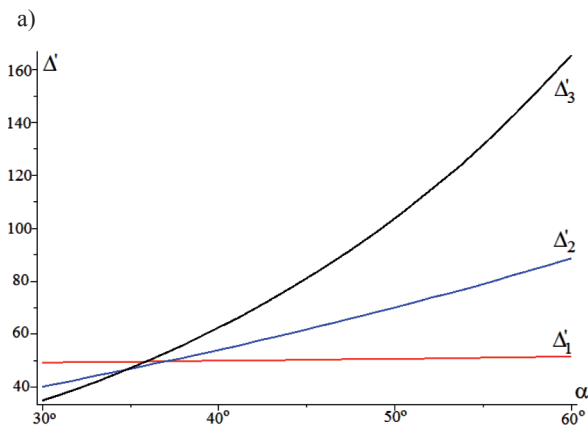


Рис. 6. Зависимости деформаций от α при $k = 8$ (а) и от k (б)

Монтажная схема

При сборке конструкции необходимо обеспечить такой порядок соединения элементов, при котором стержни будут располагаться в параллельных плоскостях, не подвергаясь перекосам за счет расположения концов в разных плоскостях. В дискретной математике (теория раскрасок графов) это задача о реберной раскраске графа, при которой ребрам графа ставятся в соответствие натуральные числа (цвета) так, чтобы одной вершине графа (узлу фермы) были инцидентны ребра разных цветов [10] – [12]. В случае монтажа фермы цвета — это условный уровень плоскости, в которой монтируется стержень.

Для решения задачи о монтаже применим специальный оператор Edge Chromatic Number из пакета Graph Theory системы Maple. Рассмотрим для примера схему монтажа фермы с шестью панелями, полученную этим оператором. Неориентированный (Undirected) граф фермы задает оператор Graph, кодируя ребра номерами его концов: $G := \text{Graph}(\text{undirected}, \{\text{un}, \text{opt}, \text{vr}, \text{dg}\})$, где список ребер нижнего пояса — $\text{un} := \text{seq}(\{i, i+1\}, i=1..n)$, верхнего пояса — $\text{opt} := \text{seq}(\{i, i+1\}, i=n+2..2*n+1)$, стоек — $\text{vr} := \text{seq}(\{i, i+n+1\}, i=1..n+1)$, раскосов — $\text{dg} := \text{seq}(\{i, i+n+2\}, i=1..k), \text{seq}(\{i+k+1, i+n+k+1\}, i=1..k)$. По заданному графу решетки оператор Edge Chromatic Number ($G, \text{'col'}$) возвращает в переменную 'col' набор ребер одного цвета: $\{\{1, 2\}, \{3, 11\}, \{4, 5\}, \{6, 7\}, \{8, 9\}, \{12, 13\}\}, \{\{1, 8\}, \{2, 3\}, \{4, 11\}, \{5, 6\}, \{7, 13\}, \{9, 10\}\}, \{\{1, 9\}, \{2, 10\}, \{3, 4\}, \{5, 11\}, \{6, 12\}, \{7, 14\}\}, \{\{2, 9\}, \{5, 12\}, \{6, 13\}, \{10, 11\}\}, \{\{3, 10\}, \{11, 12\}, \{13, 14\}\}$ и хроматический индекс 5. Это означает, что в списке пять групп ребер одного цвета (одного уровня плоскости при монтаже). Уровни I – III содержат по шесть стержней, уровень IV — четыре стержня, уровень V — три стержня: $\{\{3, 10\}, \{11, 12\}, \{13, 14\}\}$ (рис. 7).

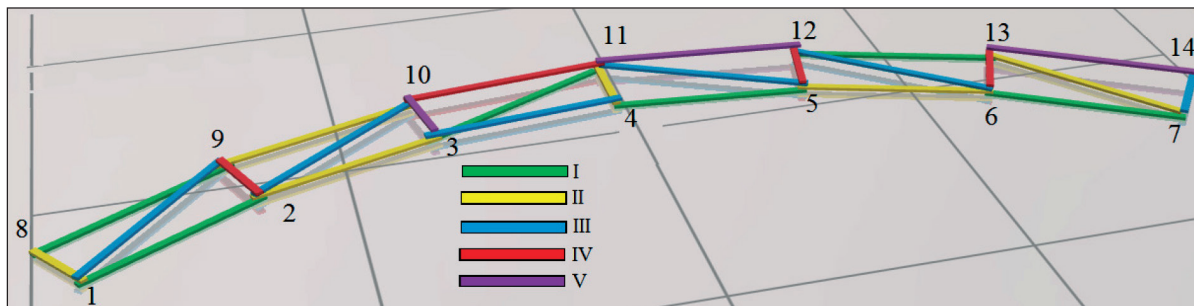


Рис. 7. Реберная раскраска и монтажная схема фермы, $k = 3$

При этом обнаруживается, что в узлах 3 и 14 между стержнями III и V уровня образуются промежутки по высоте, требующие дополнительных шайб с толщиной, равной толщине стержня (рис. 8). Очевидно, эффективность предлагаемого автоматического составления монтажной схемы растет с увеличением числа панелей, где вручную назначить порядок сборки узлов представляется практически невыполнимой задачей.

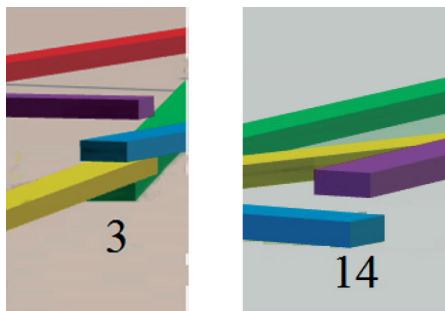


Рис. 8. Места для дополнительных выравнивающих шайб

Следует также отметить, что время работы оператора Edge Chromatic Number по алгоритму, встроенному в Maple, существенно, но немонотонно и зависит от размера графа. При $n = 6$ расчет

выполняется практически мгновенно (0,05 с), при $n = 8$ за 6,42 с, при $n = 5$ за 1,17 с, а при $n = 7$ — уже за 92,61 с. При $n = 6$ решение не было получено, работа программы была остановлена после 20 мин работы. Кроме того, замечена, в какой-то степени, парадоксальная особенность решения: симметричная конструкция имеет несимметричное распределение расположения стержней по уровням — картина соответствующих цветов ребер графа несимметричная. Хроматический индекс 5 не зависит от числа панелей.

Описанный метод имеет ограничение. Граф фермы, к которой он применим, должен быть плоским. В случае пересечения стержней (крестообразная решетка) алгоритм дает сбой. Оператор Edge Chromatic Number возвращает правильные цвета в узлах, но в точках пересечения стержни могут оказаться в одной плоскости, что, конечно, недопустимо, если поставлена цель избежать изгиб элементов. В этом случае стандартный оператор можно модифицировать, представив ферму в виде псевдографа, в котором ребра имеют более двух вершин. Условную фиктивную вершину следует поместить в точках пересечения ребер, что обеспечивает разнесение стержней в точке пересечения в разные плоскости. Усовершенствованный алгоритм удобно также использовать для составления монтажной схемы тех ферм, в которых имеются прямолинейные пояса и в которых нет смысла резать длинные элементы только для того, чтобы стержни располагались в разных плоскостях, удовлетворяя свойству правильной реберной раскраски.

Выводы

Расчет различных типов шпангоутов судов на статические и динамические нагрузки является актуальной задачей [13] – [18]. Предложена схема статически определимой шарнирно-стержневой конструкции для упрочнения корпусов судов.

Основным результатом работы является аналитическое решение для усилий во всех ее элементах для произвольных размеров фермы, двух типов нагрузок и при произвольном числе секций. Учет числа секций оказался наиболее сложной задачей. Методы индукции с решением общей системы уравнений равновесия всех узлов конструкции здесь оказались непригодны. Формальное использование готовых алгоритмов привело к весьма громоздкому решению, не поддающемуся анализу. Поэтому для решения поставленной задачи здесь был применен другой способ получения решения. Усилия были получены сочетанием метода сечений и метода вырезания узлов. При этом оказался весьма удобным приём поворота системы координат при переходе от одного узла к другому. Уравнения для усилий не меняются, меняются только на постоянную величину углы в этих уравнениях, что делает решение легко алгоритмируемым применительно к системам символьной математики. К сожалению, до конца в аналитической форме решение для прогибов получить не удалось. Однако достаточно компактные аналитические выражения для усилий позволяют получить решение в виде конечных сумм.

Другим результатом работы является уточнение алгоритма составления монтажной схемы, впервые предложенной в [7]. Даны рекомендации для составления монтажных схем ферм с пересекающимися стержнями. Несколько численных примеров, проиллюстрированных графически, показали физически достоверные результаты.

Рассмотренная схема является статически определимой, однако известно, что на практике статически определимые конструкции применяются редко. Как правило, шарниры заменяются жесткими соединениями и добавляются дополнительные стержни. В этом случае полученное решение будет, во-первых, являться готовым решением задачи об основной системе, на котором базируется метод сил раскрытия статической неопределимости, во-вторых, это решение представляет нижнюю оценку жесткости проектируемой системы. Такие схемы могут быть использованы для усиления как поперечной, так и продольной жесткости корпуса судна.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Тряскин В. Н. Автоматизированное параметрическое проектирование конструкций корпуса судна: учеб. пособие / В. Н. Тряскин. — СПб.: СПбГМТУ, 2010. — 152 с.

2. Сафронова Т. Д. Применение метода отсеков к расчету колебаний круговых цилиндрических оболочек с тонкостенными шпангоутами / Т. Д. Сафронова, Ф. Н. Шклярчук // МТТ. — 1992. — № 2. — С. 151–159.
3. Чжунбум Р. Расчет колебаний составных оболочек вращения с соединительными шпангоутами по методу конечных элементов / Р. Чжунбум // Труды МАИ. — 2013. — № 69. — С. 2.
4. Болдырев А. В. Оптимизация тонкостенной каркасированной конструкции с ограничениями по прочности и жесткости / А. В. Болдырев, В. А. Комаров // Вестник Самарского университета. Аэрокосмическая техника, технологии и машиностроение. — 2006. — № 1 (9). — С. 42–47.
5. Кирсанов М. Н. Формулы для расчета прогиба балочной многорешетчатой фермы / М. Н. Кирсанов, А. Н. Маслов // Строительная механика и расчет сооружений. — 2017. — № 2 (271). — С. 6–10.
6. Кирсанов М. Н. Анализ прогиба фермы пространственного покрытия с крестообразной решеткой / М. Н. Кирсанов // Инженерно-строительный журнал. — 2016. — № 4 (64). — С. 52–58. DOI: 10.5862/MCE.64.5.
7. Кирсанов М. Н. Статический анализ и монтажная схема плоской фермы / М. Н. Кирсанов // Вестник Государственного университета морского и речного флота имени адмирала С. О. Макарова. — 2016. — № 5 (39). — С. 61–68. DOI: 10.21821/2309-5180-2016-8-5-61-68.
8. Кирсанов М. Н. Решебник. Теоретическая механика / М. Н. Кирсанов; под ред. А. И. Кириллова. — М.: Физматлит, 2008. — 382 с.
9. Голоскоков Д. П. Практический курс математической физики в системе Maple / Д. П. Голоскоков. — СПб.: Изд-во ПаркКом, 2010. — 644 с.
10. Andersen L. D. On edge-colourings of graphs / L. D. Andersen // Mathematica Scandinavica. — 1977. — Vol. 40. — No. 2. — Pp. 161–175.
11. Baudon O. Equitable neighbour-sum-distinguishing edge and total colourings / O. Baudon, M. Pilśniak, J. Przybyło, M. Senhaji, É. Sopena, M. Woźniak // Discrete Applied Mathematics. — 2017. — Vol. 222. — Pp. 40–53. DOI: 10.1016/j.dam.2017.01.031.
12. Venkateswarlu A. On acyclic edge-coloring of complete bipartite graphs / A. Venkateswarlu, A. Sarkar, S. M. Ananthanarayanan // Discrete Mathematics. — 2017. — Vol. 340. — Is. 3. — Pp. 481–493. DOI: 10.1016/j.disc.2016.08.026.
13. Драгун Д. К. Моделирование прочностных свойств силовых шпангоутов в каркасных конструкциях / Д. К. Драгун, А. В. Ульянчиков, А. В. Языков // Машины и установки: проектирование, разработка и эксплуатация. — 2016. — № 5. — С. 17–32. DOI:10.7463/aplts.0516.0847809.
14. Драгун Д. К. Моделирование поперечного силового набора в каркасных конструкциях / Д. К. Драгун, А. В. Ульянчиков, А. В. Языков // Машины и установки: проектирование, разработка и эксплуатация. — 2016. — № 3. — С. 9–22. DOI: 10.7463/aplts.0316.0843865.
15. Григорьев В. Д. Методика поверочных расчетов прочности конструкций из композиционных материалов / В. Д. Григорьев, А. С. Дзюба, А. А. Ионов, Ю. А. Камышов, В. Ф. Кутынов // Ученые записки ЦАГИ. — 1991. — Т. XXII. — № 3. — С. 81–91.
16. Фомичев П. А. Применение метода конечных элементов на этапе предварительной тарировки препарированных сечений стреловидного крыла самолета / П. А. Фомичев, С. Ф. Мандзюк, И. В. Ледовских // Авиационно-космическая техника и технология. — 2014. — № 5. — С. 64–69.
17. Maron A. Design of a ship model for hydro-elastic experiments in waves / A. Maron, G. Kapsenberg // International Journal of Naval Architecture and Ocean Engineering. — 2014. — Vol. 6. — Is. 4. — Pp. 1130–1147. DOI: 10.2478/IJNAOE-2013-0235.
18. Maroun W. J. Steel truss/composite skin hybrid ship hull, Part II: Manufacturing and sagging testing / W. J. Maroun, J. Cao, J. L. Grenestedt // Composites Part A: Applied Science and Manufacturing. — 2007. — Vol. 38. — Is. 7. — Pp. 1763–1772. DOI: 10.1016/j.compositesa.2006.11.003.

REFERENCES

1. Tryaskin, V. N. *Avtomatizirovannoe parametricheskoe projektirovanie konstruksii korpusa sudna: uchebnoe posobie*. SPb.: SPbGMTU, 2010.
2. Safronova, T. D., and F. N. Shklyarchuk. “Primenenie metoda otsekov k raschetu kolebanii krugovykh tsilin-dricheskikh obolochek s tonkostennymi shpangoutami.” *MTT* 2 (1992): 151–159.
3. Chzhunbum, R. “Raschet kolebanii sostavnykh obolochek vrashcheniya s soedinitel’nyimi shpangoutami po metodu konechnykh elementov.” *Trudy MAI* 69 (2013): 2.

4. Boldyrev, A. V., and V. A. Komarov. "Optimization of a thin-walled wireframe structure with strength and stiffness limitations." *VESTNIK of Samara University. Aerospace and Mechanical Engineering* 1(9) (2006): 42–47.
5. Kirsanov, M. N., and A. N. Maslov. "Formuly dlya rascheta progiba balochnoi mnogoreshetchatoi fermy." *Stroitel'naya mekhanika i raschet sooruzhenii* 2(271) (2017): 6–10.
6. Kirsanov, M. N. "Analysis of the buckling of spatial truss with cross lattice." *Magazine of Civil Engineering* 4(64) (2016): 52–58. DOI: 10.5862/MCE.64.5.
7. Kirsanov, M. N. "Static analysis and mounting diagram of flat truss." *Vestnik Gosudarstvennogo universiteta morskogo i rechnogo flota imeni admirala S.O. Makarova* 5(39) (2016): 61–68. DOI: 10.21821/2309-5180-2016-8-5-61-68.
8. Kirsanov, M. N. *Reshebnik. Teoreticheskaya mekhanika*. Edited by A. I. Kirillov. M.: Fizmatlit, 2008.
9. Goloskokov, D. P. *Prakticheskij kurs matematicheskoy fiziki v sisteme Maple*. SPb.: Izd-vo ParkKom, 2010.
10. Andersen, L. D. "On edge-colourings of graphs." *Mathematica Scandinavica* 40.2 (1977): 161–175.
11. Baudon, Olivier, Monika Pilśniak, Jakub Przybyło, Mohammed Senhaji, Éric Sopena, and Mariusz Woźniak. "Equitable neighbour-sum-distinguishing edge and total colourings." *Discrete Applied Mathematics* 222 (2017): 40–53.
12. Venkateswarlu, Ayineedi, Santanu Sarkar, and Sai Mali Ananthanarayanan. "On acyclic edge-coloring of complete bipartite graphs." *Discrete Mathematics* 340.3 (2017): 481–493.
13. Dragun, D. K., A. V. Ul'yanenkov, and A. V. Yazykov. "Modeling the Strength Properties of Power Bulkheads in the Frame Structures." *Machines and Plants: Design and Exploiting* 5 (2016): 17–32.
14. Dragun, D. K., A. V. Ul'yanenkov, and A. V. Yazykov. "Simulation of Cross Set in Frame Structures." *Machines and Plants: Design and Exploiting* 3 (2016): 9–22.
15. Grigor'ev, V. D., A. S. Dzyuba, A. A. Ionov, Yu. A. Kamyshev, and V. F. Kut'inov "Metodika poverochnykh raschetov prochnosti konstruksii iz kompozitnykh materialov." *Uchenye zapiski TsAGI XXII.3* (1991): 81–91.
16. Fomichev, P. A., S. F. Mandzyuk, and I. V. Ledovskih. "Finite element method application in the pre-calibration stage of an airplane sweptwing dissected sections." *Aviatsionno-kosmicheskaya tekhnika i tekhnologiya* 5 (2014): 64–69.
17. Marón, Adolfo, and Geert Kapsenberg. "Design of a ship model for hydro-elastic experiments in waves." *International Journal of Naval Architecture and Ocean Engineering* 6.4 (2014): 1130–1147. DOI: 10.2478/IJNAOE-2013-0235.
18. Maroun, William J., Jun Cao, and Joachim L. Grenestedt. "Steel truss/composite skin hybrid ship hull, Part II: Manufacturing and sagging testing." *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing* 38.7 (2007): 1763–1772. DOI: 10.1016/j.compositesa.2006.11.003.

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРЕ

Кирсанов Михаил Николаевич —
доктор физико-математических наук, профессор
Национальный исследовательский
университет «МЭИ»
111250, Российская Федерация, г. Москва,
ул. Красноказарменная, 14
e-mail: C216@Ya.ru

INFORMATION ABOUT THE AUTHOR

Kirsanov, Mikhail N. —
Dr. of Physical and Mathematical Sciences, professor
National Research University
"Moscow Power Engineering Institute"
14 Krasnokazarmennaya Str., Moscow, 111250,
Russian Federation
e-mail: C216@Ya.ru

Статья поступила в редакцию 25 апреля 2017 г.
Received: April 25, 2017.

СУДОВЫЕ ЭНЕРГЕТИЧЕСКИЕ УСТАНОВКИ, СИСТЕМЫ И УСТРОЙСТВА

DOI: 10.21821/2309-5180-2017-9-3-570-580

ON THE POSSIBILITIES OF USING SECONDARY ENERGY RESOURCES IN MARINE ENGINE

V. L. Erofeyev, V. A. Zhukov, O. V. Melnik

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

The article is devoted to one of the most important problems of modern power engineering is to improve the efficiency of fuel utilization, characterized by energy efficient motors. Traditional methods of improving energy efficiency are the use of secondary energy resources (heat) of the exhaust gas of engines and heat transfer for their cooling systems. The article presents the results of calculations of power efficiency of utilization of the turbine, working under direct Rankine cycle using different coolants. The basic reserve of increase of power efficiency of thermal engines is the rational use of secondary energy resources. To assess the prospects of using secondary energy resources heat transfer fluids (coolants) cooling systems the calculation of the heat pump, working on the reverse Rankine cycle. Based on the results of the calculations in the article the conclusion about the prospects of using these devices, including the replacement of Autonomous boilers in ship power plants. The article also contains proposals for use of alternative types of secondary energy resources, such as the mechanical energy of a fuel and its gladiatorial. The article shows that the use of these energy resources seems to be promising when using gas fuel. This research is relevant in connection with active introduction of gas and gas-diesel engines in various sectors of energy and transport. The data obtained in the result of the research show that the use of secondary energy resources heat engines using the utilization of turbines and heat pumps of modern design is promising and allows to increase the rate of fuel consumption of piston and gas turbine engines. When using gaseous fuels have the additional possibility of using secondary energy resources.

Keywords: heat engines, energy efficiency, secondary energy resources, utilization, heat balance, heat transfer, enthalpy change, recycling steam turbine, heat pump.

For citation:

Erofeyev, Valentin L., Vladimir A. Zhukov, and Olesya V. Melnik. "On the possibilities of using secondary energy resources in marine engine." *Vestnik Gosudarstvennogo universiteta morskogo i rechnogo flota imeni admiral S. O. Makarova* 9.3 (2017): 570–580. DOI: 10.21821/2309-5180-2017-9-3-570-580.

УДК 621.432

О ВОЗМОЖНОСТЯХ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ ВТОРИЧНЫХ ЭНЕРГЕТИЧЕСКИХ РЕСУРСОВ В СУДОВЫХ ДВС

В. А. Ерофеев, В. А. Жуков, О. В. Мельник

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

Статья посвящена анализу возможностей более полного использования теплоты, выделяющейся при сгорании топлива в тепловых двигателях, характеризуемого энергетической эффективностью установок. Традиционными методами повышения эффективности использования топлива и сокращения его расхода является утилизация вторичных энергетических ресурсов (теплоты) отработавших газов двигателей и теплоносителей их систем охлаждения. Возможность использования этих ресурсов исследуется на основании уравнения теплового баланса с проведением расчетов, учитывающих изменение энтальпии теплоносителя системы охлаждения. В статье представлено сравнение эффективности утилизационно-

го турбогенератора, работающего по прямому циклу Ренкина, при использовании различных теплоносителей. С целью оценки возможностей повышения коэффициента полезного действия установок за счет использования энергетических ресурсов теплоносителей систем охлаждения (теплоты, отводимой с охлаждающей жидкостью) выполнен расчет теплового насоса, работающего по обратному циклу Ренкина. На основании результатов выполненных расчетов сделан вывод о перспективности использования данных устройств, в том числе для замены автономных котлов в судовых энергетических установках. Статья содержит предложения по использованию нетрадиционных видов вторичных энергетических ресурсов, таких как механическая энергия топлива и его хладопотенциал. Показано, что использование данных энергетических ресурсов представляется перспективным при использовании газового топлива. Указанное направление исследований является актуальным в связи с активным внедрением газовых и газодизельных двигателей в различных отраслях энергетики и транспорта. Данные, полученные в результате проведенных исследований, показывают, что использование вторичных энергетических ресурсов тепловых двигателей с применением утилизационных турбин и тепловых насосов современных конструкций является перспективным и позволяет повысить коэффициент топливоиспользования поршневых и газотурбинных двигателей. При использовании газовых топлив появляются дополнительные возможности использования вторичных энергетических ресурсов.

Ключевые слова: тепловые двигатели, энергоэффективность, вторичные энергетические ресурсы, утилизация теплоты, тепловой баланс, теплоноситель, изменение энтальпии, утилизационная паровая турбина, тепловой насос.

Для цитирования:

Ерофеев, В. Л. О возможностях использования вторичных энергетических ресурсов в судовых ДВС / В. Л. Ерофеев, В. А. Жуков, О. В. Мельник // Вестник Государственного университета морского и речного флота имени адмирала С. О. Макарова. — 2017. — Т. 9. — № 3. — С. 570–580. DOI: 10.21821/2309-5180-2017-9-3-570-580.

Введение

Эффективное использование топлива в тепловых двигателях и снижение выбросов с отработавшими газами — важнейшие проблемы современной транспортной энергетики. На решение указанной проблемы направлены нормативно-правовые мероприятия [1], совершенствование рабочих процессов тепловых двигателей [2], [3], модернизация их основных систем [4], [5], совершенствование эксплуатации энергетических установок [6] – [8].

Эффективность использования энергии оценивается такими показателями как эффективный КПД двигателя η_e , удельный эффективный расход топлива g_e , составляющие теплового баланса. Связь между этими показателями рассмотрена в работе [9]. Для анализа возможных путей повышения энергетической эффективности теплового двигателя целесообразно воспользоваться двумя показателями: удельным эффективным расходом топлива g_e , кг/(кВт·ч) и количеством выбросов диоксида углерода CO_2 , мг/(кВт·ч), отнесенных к единице произведенной двигателем работы. Важность второго показателя обусловлена тем, что именно с выбросами CO_2 связывают появление парникового эффекта. На рис. 1 представлен процесс преобразования первичного источника энергии (топлива) в механическую работу и причины появления и ресурсы вторичных источников энергии.

Все более возрастающее использование природного газа в качестве альтернативы нефтяного топлива, подаваемого к энергетическому объекту в виде сжиженного природного газа (СПГ) и сжатого природного газа (КПГ), позволяет добавить к химической энергии топлива, зависящей от химического состава и определяемой высшей Q_p^h , МДж/кг, и низшей Q_p^h , МДж/кг, теплотой его сгорания, еще и энергию физического состояния топлива — механическую энергию, определяемую перепадами удельной энтальпии КПГ в бункеровочной емкости для хранения i_{xp} , кДж/кг, и энтальпии газа, поступающего в двигатель $i_{дв}$, кДж/кг, или «хладопотенциал» — количество теплоты, необходимой для испарения жидкого природного газа и нагрева его до температуры подачи в тепловой двигатель. Так, в автомобильных баллонах с КПГ давление газа достигает 26 МПа, а параметры СПГ, которым бункеруются суда, составляют криогенные температуры (–165 °С) при давлении 0,6 МПа.

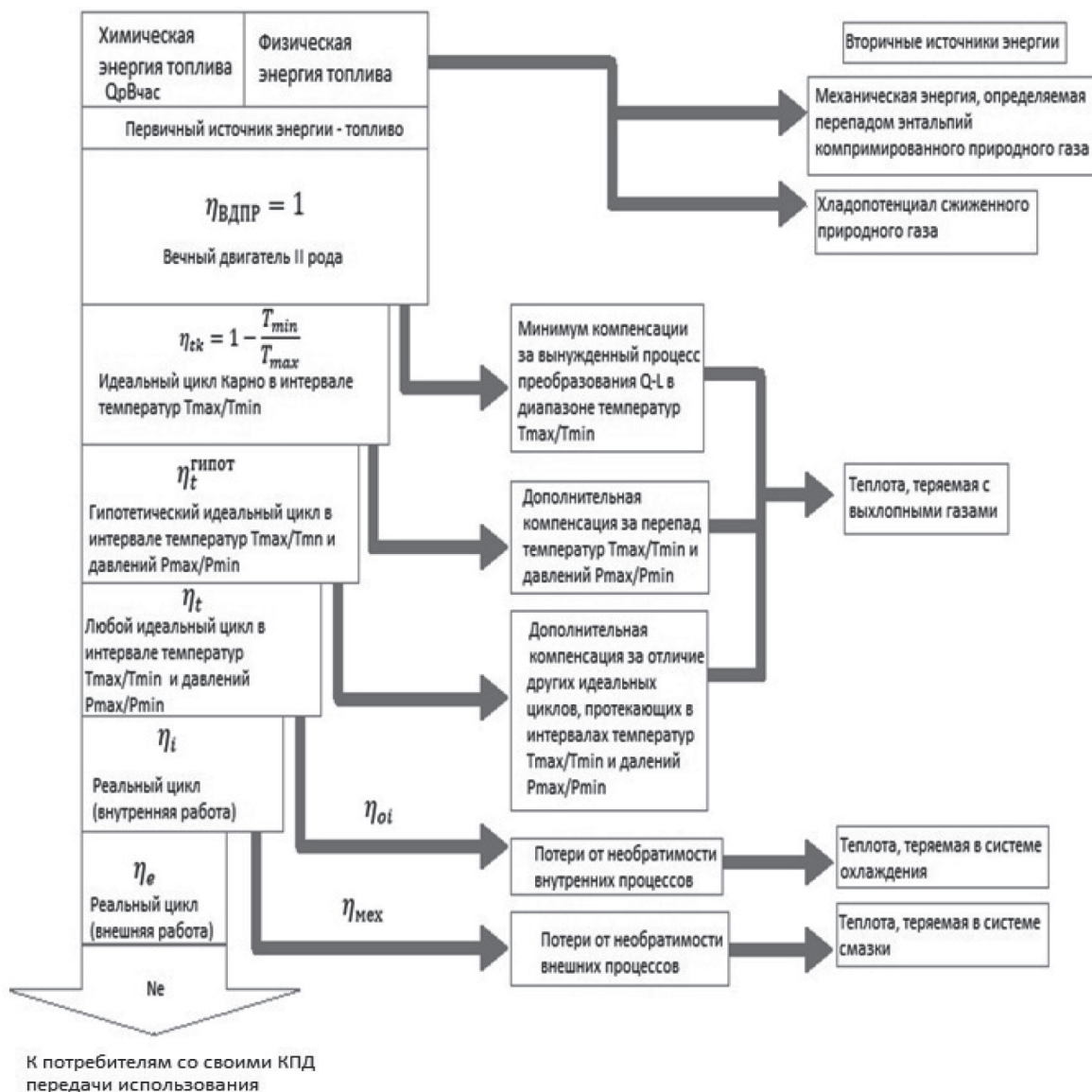


Рис. 1. Первичные и вторичные энергетические ресурсы теплового двигателя

Методы

В действующих в настоящее время энергетических установках эта физическая энергия не используется: в случае применения в качестве топлива КПГ происходит дросселирование газа, а при использовании СПГ — подогрев газа различными источниками теплоты. В работе [10] были высказаны предложения по включению этой физической энергии во вторичные энергетические ресурсы, более подробно исследован процесс получения «сухого льда» (твёрдой фазы CO_2) за счет использования «хладопотенциала» СПГ. Перевод работы тепловых двигателей на природный газ улучшает энергоэкологические показатели двигателя в связи с минимальным значением конверсионного показателя [11] по сравнению с другими топливами (меньше углерода в топливе), а получение «сухого льда» за счет «хладопотенциала» СПГ эти показатели улучшает существенно.

Количественное рассмотрение вторичных энергетических ресурсов теплового двигателя при использовании химической энергии топлива удобно производить по тепловому балансу, который определяется в расчете на 1 ч работы двигателя. В традиционной форме абсолютный тепловой баланс ДВС представляется уравнением

$$Q_p^H B_{\text{ч}} = 3600 N_e + Q_{\text{газ}} + Q_{\text{охл}} + Q_{\text{м}} + Q_{\text{ост}},$$

где $B_{\text{ч}}$ — часовой расход топлива, кг/ч; N_e — эффективная мощность двигателя, кВт; $Q_{\text{газ}}$ — потери теплоты с отработавшими газами, кДж/ч; $Q_{\text{охл}}$ — потери теплоты с охлаждающей жидкостью, кДж/ч; $Q_{\text{м}}$ — потери теплоты с маслом, кДж/ч; $Q_{\text{ост}}$ — остаточный член, кДж/ч.

Для удобства анализа тепловой баланс записывается в относительных величинах:

$$1 = \eta_e + q_{\text{газ}} + q_{\text{охл}} + q_{\text{м}} + q_{\text{ост}},$$

где η_e — эффективный КПД двигателя, равный доле теплоты, преобразованной в полезную работу и определяемый по формуле $\eta_e = \frac{3600}{Q_p^H g_e}$; $g_e = \frac{B_{\text{ч}}}{N_e}$; $q_{\text{газ}}$, $q_{\text{охл}}$, $q_{\text{м}}$ — доли потерь теплоты соответственно с отработавшими газами, охлаждающей жидкостью, маслом, определяемые по формулам:

$$q_{\text{газ}} = \frac{Q_{\text{газ}}}{Q_p^H B_{\text{ч}}}; \quad q_{\text{охл}} = \frac{Q_{\text{охл}}}{Q_p^H B_{\text{ч}}}; \quad q_{\text{м}} = \frac{Q_{\text{м}}}{Q_p^H B_{\text{ч}}}.$$

К числу вторичных энергетических ресурсов (ВЭР), в зависимости от их величин, можно отнести потери теплоты с отработавшими газами, теплоносителем системой охлаждения и моторным маслом.

После преобразования получим:

$$Q_{\text{газ}} = Q_p^H B_{\text{ч}} q_{\text{газ}} = \frac{3600 N_e}{\eta_e} q_{\text{газ}} = 3600 N_e \frac{q_{\text{газ}}}{\eta_e};$$

$$Q_p^H \frac{3600 N_e}{Q_p^H B_{\text{ч}}} = \eta_e;$$

$$B_{\text{час}} = \frac{3600 N_e}{Q_p^H \eta_e};$$

$$Q_{\text{охл}} = 3600 N_e \frac{q_{\text{охл}}}{\eta_e};$$

$$Q_{\text{м}} = 3600 N_e \frac{q_{\text{м}}}{\eta_e}.$$

Рассмотрим возможности получения механической энергии, например, в утилизационном турбогенераторе. Количество теплоты и получаемой электроэнергии определяется в кДж/ч по следующей формуле:

$$3600 N_e^{\text{ути}} = Q_{\text{газ}} \eta_i^{\text{ути}} \eta_{\text{ое}}^{\text{ути}} \eta_{\text{ген}},$$

где $\eta_i^{\text{ути}}$ — термический КПД утилизационного турбогенератора; $\eta_{\text{ое}}^{\text{ути}}$ — относительный эффективный КПД турбогенератора; $\eta_{\text{ое}} = \eta_{\text{oi}} \eta_{\text{мех}}$; η_{oi} — внутренний относительный КПД; $\eta_{\text{мех}}$ — механический КПД турбогенератора; $\eta_{\text{ген}}$ — КПД электрогенератора.

Тогда доля дополнительной механической энергии, получаемой от вторичных энергетических ресурсов — отработавших газов определяется как

$$\frac{N_e^{\text{ути}}}{N_e^{\text{гд}}} = \frac{q_{\text{газ}}^{\text{гд}}}{\eta_e^{\text{гд}}} \eta_i^{\text{ути}} \eta_{\text{ое}}^{\text{ути}} \eta_{\text{ген}} \psi,$$

где ψ — коэффициент использования газов, не допускающий их охлаждения ниже температуры точки росы; $\eta_e^{\text{гд}}$ — КПД главного двигателя.

Доля механической энергии получаемой от утилизации теплоты системы охлаждения главного двигателя подсчитывается по аналогичной формуле

$$\frac{N_e^{\text{ути}}}{N_e^{\text{гд}}} = \frac{q_{\text{охл}}^{\text{гд}}}{\eta_e^{\text{гд}}} \eta_i^{\text{ути}} \eta_{\text{ое}}^{\text{ути}} \eta_{\text{ген}} \psi.$$

Если направление и пределы повышения эффективного КПД главного двигателя подробно рассматривалось в [12 и др.], то возможности использования вторичных энергетических ресурсов для получения электроэнергии с помощью различных, в том числе и органических рабочих тел, будут рассмотрены далее.

Вторичные энергетические ресурсы могут быть использованы для получения не только механической энергии, но и для нужд теплофикации — получения теплоты для различных технологических нужд, в том числе для отопления. При этом для повышения температурного уровня систем охлаждения и смазки, которая редко превышает 80 – 90 °С, могут быть использованы тепловые насосы.

В случае комбинированного использования любых вторичных энергетических ресурсов энергетическая эффективность установки может быть оценена как

$$g_e^{\text{уст}} = \frac{B_q}{N_e^{\text{гд}} + \sum_{i=1}^{i=n} N_{ei}^{\text{ут}} + Q_{\text{тепл}}}, \text{ кг топлива/(\text{кВт} \cdot \text{ч})};$$

$$Q_{\text{тепл}} = \frac{\sum_{i=1}^{i=n} Q_{\text{ВЭР}} \xi_i}{3600},$$

где $Q_{\text{тепл}}$ — теплота, подаваемая на нужды теплофикации, кВт; ξ_i — коэффициент использования теплоты вторичных энергетических ресурсов на нужды теплофикации; $Q_{\text{ВЭР}}$ — теплота вторичных энергетических ресурсов.

Повышение энергетической эффективности установки за счет использования ВЭР определяется по двум показателям:

а) *абсолютное изменение*

$$\Delta g_e = g_e^{\text{гд}} - g_e^{\text{уст}}, \text{ кг топлива/(\text{кВт} \cdot \text{ч})},$$

где $g_e^{\text{гд}}$ — энергетическая эффективность главного двигателя;

б) *относительное изменение*

$$\delta = \frac{g_e^{\text{гд}} - g_e^{\text{уст}}}{g_e^{\text{гд}}} 100 \, \%.$$

При использовании в установках (двигателях) в качестве топлива природного газа следует дополнить приведенное повышение эффективности энергетической установки расчетом снижения выбросов парникового газа CO_2 в связи с уменьшением наличия углерода в топливе, что учитывается упомянутым конверсионным показателем [11]. При работе на сжиженном природном газе (СПГ) использование его «хладопотенциала» для получения «сухого льда» — твердой фазы CO_2 — не только повышается энергетическая и экологическая эффективность установки, но и производится продукт, имеющий высокую товарную стоимость.

Результаты

Рассмотрим примеры количественного возрастания энергетической эффективности теплового двигателя. Примем состав теплового баланса для дизеля эффективной мощностью $N_e = 100$ кВт с умеренным наддувом: $\eta_e^{\text{гд}} = 0,40$; $q_{\text{газ}} = 0,30$; $q_{\text{охл}} = 0,20$; $q_{\text{м}} = 0,05$; $q_{\text{ост}} = 0,05$, а параметры отечественного турбогенератора МСК 92-4: КПД генератора $\eta_{\text{ген}} = 0,90$; КПД турбины (правильный — относительный эффективный) $\eta_{\text{оe}} = 0,51$; давление водяного пара и температура перед турбиной $P_1 = 0,45$ МПа и $t_1 = 250$ °С; давление пара за турбиной $P_2 = 6$ кПа.

Утилизационные турбогенераторы работают, как известно, по прямому циклу Ренкина, а тепловые насосы — по обратному циклу Ренкина. Для дальнейших вычислений необходимо определить величину термического КПД цикла Ренкина по формуле

$$\eta_{\text{тп}} = \frac{i_1 - i_2}{i_1 - i_2'} = \frac{2950 - 2280}{2950 - 151,5} = 0,24,$$

где $i_1 = 2950$ кДж/кг — удельная энтальпия пара перед турбиной; $i_2 = 2280$ кДж/кг — удельная энтальпия пара за турбиной; $i_2' = 151,5$ кДж/кг — удельная энтальпия начала кипения при $P_2 = 6$ кПа.

Значение удельной энтальпии определялось по источнику [13]. Максимальный коэффициент использования теплоты выпускных газов примем $\psi_{\max} = 0,64$. При указанных параметрах

$$\frac{N_e^{\text{УТГ}}}{N_e^{\text{ГД}}} = \frac{q_{\text{газ}}^{\text{ГД}}}{\eta_e^{\text{ГД}}} \eta_t^{\text{УТГ}} \eta_{oi}^{\text{УТГ}} \eta_{\text{мех}}^{\text{УТГ}} \eta_{\text{ген}}^{\text{УТГ}} \psi = \frac{0,30}{0,40} \cdot 0,24 \cdot 0,51 \cdot 0,9 \cdot 0,64 = 0,06,$$

т. е. мощность, вырабатываемая утилизационным турбогенератором, составляет 6 % от мощности главного двигателя $N_e^{\text{ГД}}$.

При изменении параметров пара до и после турбины величина термического КПД цикла Ренкина меняется незначительно (на 1 – 2 %), заметнее влияют внутренний и внешний относительные КПД и КПД генератора. Приведенные параметры турбогенератора МСК-90-4 относятся к 1970 – 1980 гг. Технический прогресс турбо- и двигателестроения позволил предположить некоторое возрастание указанных КПД. Так, в [14], [15] указывается, что внутренний относительный КПД винтовых паровых турбин ПВМ составляет 67 – 70 %. Таким образом, достижения технического прогресса позволяют ожидать

$$\frac{q_{\text{газ}}^{\text{ГД}}}{\eta_e^{\text{ГД}}} \eta_t^{\text{УТГ}} \eta_{oi}^{\text{УТГ}} \eta_{\text{мех}}^{\text{УТГ}} \eta_{\text{ген}}^{\text{УТГ}} \psi = \frac{0,30}{0,40} \cdot 0,24 \cdot 0,7 \cdot 0,95 \cdot 0,95 \cdot 0,64 = 0,09,$$

т. е. при использовании наиболее современного утилизационного оборудования дополнительная мощность, получаемая за счет использования вторичных энергетических ресурсов в утилизационном турбогенераторе, может быть увеличена до 9 %.

Более высокие показатели могут быть получены при иных соотношениях q_r и η_e теплового баланса, например, для газотурбинных установок. Примером реализации возможностей использования ВЭР газов для получения механической энергии могут служить бинарные циклы парогазовых установок.

Определим возможность и целесообразность использования в утилизационном турбогенераторе (УТГ) с органическим рабочим телом (теплоносителем) системы охлаждения, определив предварительно величину термического КПД цикла Ренкина по формуле

$$\frac{N_e^{\text{УТГ}}}{N_e^{\text{ГД}}} = \frac{q_{\text{газ}}^{\text{ГД}}}{\eta_e^{\text{ГД}}} \eta_t^{\text{УТГ}} \eta_{oi}^{\text{УТГ}} \eta_{\text{мех}}^{\text{УТГ}} \eta_{\text{ген}}^{\text{УТГ}} \psi.$$

На рис. 2 представлен прямой цикл Ренкина в координатах «натуральный логарифм давления – энтальпия ($\ln p - i$)» при реальных для систем охлаждения параметрах источников теплоты.



Рис. 2. Цикл паровой турбины (прямой цикл Ренкина):

q_1, q_2 — количество подведенной и отведенной теплоты;

Δt — перепад температур между источником теплоты и рабочим телом;

$t_{\text{ист}}$ — температура источника теплоты; $t_{\text{пр}}$ — температура приемника теплоты

Приемником теплоты обычно служит окружающая среда. Температура источника теплоты может быть повышена в системах высокотемпературного охлаждения двигателей до 130 °С и выше. Задавшись перепадом температур между источником теплоты и рабочим телом Δt , можно получить исходные параметры рабочего тела для вычисления КПД цикла Ренкина.

При относительно малых температурах источника теплоты вряд ли целесообразно использовать в качестве рабочего тела воду и водяной пар, так как в этом случае цикл должен протекать при давлении ниже атмосферного (в вакууме). Целесообразно рассмотреть использование низкокипящих органических рабочих тел. В таблице приведены результаты расчетов по производству электроэнергии за счет утилизации теплоты, отводимой через систему охлаждения теплового двигателя при работе цикла с различными органическими теплоносителями (фреон R134, фтордихлорметан R21, аммиак R717) [13]. Эти результаты показывают возможность производства электроэнергии за счет утилизации теплоты систем охлаждения до 5 % от мощности теплового двигателя, что представляется достаточно перспективным в связи с более высоким качеством механической энергии по сравнению с тепловой энергией.

**Параметры идеальных циклов Ренкина
и возможности получения электроэнергии за счет утилизации ВЭР систем охлаждения**

Рабочее тело	Температура пара перед турбиной, t_1 , °С	Давление пара перед турбиной, P_1 , бар	Давление пара за турбиной, P_2 , бар	Удельная энтальпия пара перед турбиной, i_1 , кДж/кг	Удельная энтальпия пара за турбиной, i_2 , кДж/кг	Работа цикла, $l_{ц}$, кДж/кг	Термический КПД цикла Ренкина, $\eta_{пр}$	$\frac{N_e^{утг}}{N_e^{гд}} \cdot 100 \%$
R134	85	30	8	430	410	20	0,11	0,04
		20		450	435	15	0,08	0,03
		10		474	467	7	0,03	–
	125	30		495	460	35	0,14	0,05
		20		500	475	25	0,10	0,033
		10		512	504	8	0,03	–
R21	85	10	2	495	457	38	0,15	0,05
		7		490	462	38	0,14	0,05
		5		490	475	15	0,06	0,05
	125	10		515	475	40	0,15	0,05
		7		520	480	40	0,15	0,05
		5		520	500	20	0,07	0,05
R717	155	60	16	2000	1800	200	0,16	5,34
	250	20	12	2300	2150	150	0,09	3

На рис. 3 представлен обратный цикл Ренкина для теплового насоса, работающего с низкокипящим органическим рабочим телом.

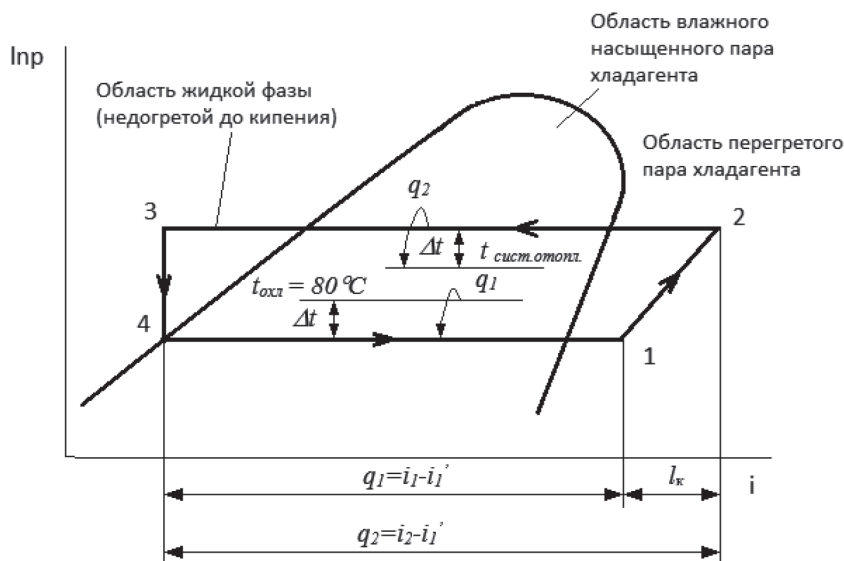


Рис. 3. Идеальный цикл теплового насоса (обратный цикл Ренкина):
 q_1, q_2 — количество подведенной и отведенной теплоты;
 Δt — перепад температур между источником теплоты и рабочим телом;
 $t_{\text{сист. отопл}}$ — температура среды в системе отопления;
 $t_{\text{пр}}$ — температура среды в системе охлаждения

Энергетическая эффективность теплового насоса оценивается отопительным коэффициентом

$$\psi = \frac{q_1}{l_k} = \frac{i_2 - i_1'}{i_2 - i_1},$$

где l_k — работа компрессора.

Количество теплоты, подводимое к рабочему телу от систем охлаждения двигателя:

$$Q_1 = Q_{\text{охл}} \xi = B_{\text{ч}}^{\text{ГД}} Q_{\text{р}}^{\text{н}} q_{\text{охл}} \xi, \text{ кДж/ч.}$$

Количество теплоты, передаваемое рабочим телом в систему отопления (на нужды теплофикации):

$$Q_{\text{отопл}} = \frac{\psi}{\psi - 1} B_{\text{ч}}^{\text{ГД}} Q_{\text{р}}^{\text{н}} q_{\text{охл}} \xi, \text{ кДж/ч.}$$

Количество теплоты, производимое автономным котлом для системы отопления (теплофикации):

$$Q_{\text{отопл}} = B_{\text{ч}}^{\text{котла}} Q_{\text{р}}^{\text{н}} \eta_{\text{котла}},$$

где $B_{\text{ч}}^{\text{котла}}$ — часовой расход топлива для котла, кг/ч; $\eta_{\text{котла}}$ — КПД котла.

Относительная экономия топлива от замены теплотой системы охлаждения двигателя:

$$\frac{B_{\text{ч}}^{\text{котла}}}{B_{\text{ч}}^{\text{ГД}}} = \frac{\psi}{\psi - 1} \cdot \frac{q_{\text{охл}}}{\eta_{\text{котла}}} \xi \cdot 100 \%,$$

а коэффициент топливоиспользования:

$$\eta_{\text{топл}} = \frac{3600 N_e^{\text{ГД}} + Q_{\text{т}}}{B_{\text{ч}}^{\text{ГД}} Q_{\text{р}}^{\text{н}}} = \eta_e^{\text{ГД}} + \frac{\psi}{\psi - 1} q_{\text{охл}} \xi.$$

Рассмотрим пример расчета возможности замены автономного котла системы подогрева груза тепловым насосом, использующим в качестве рабочего тела органическое вещество R113, а в качестве источника теплоты ВЭР системы охлаждения двигателя с $t_{\text{охл}} = 80^\circ \text{C}$. Температура среды в системе отопления $t_{\text{сист. отопл}} = 160^\circ \text{C}$.

Задаемся величиной $\Delta t = 5 \text{ }^{\circ}\text{C}$, получим:

$$t_{s1} = 80 - 5 = 75 \text{ }^{\circ}\text{C} \text{ при } P_1 = 2,5 \text{ бар};$$

$$t_{s2} = 160 + 5 = 165 \text{ }^{\circ}\text{C} \text{ при } P_2 = 18 \text{ бар};$$

$$i'_1 = 270 \text{ кДж/кг}; i_1 = 440 \text{ кДж/кг}; i_2 = 470 \text{ кДж/кг}.$$

Отопительный коэффициент теплового насоса

$$\psi = \frac{470 - 270}{470 - 440} = 6,67.$$

Относительная экономия топлива для подобного замещения

$$\frac{B_{\text{ч}}^{\text{котла}}}{B_{\text{ч}}^{\text{ГД}}} = \frac{\psi}{\psi - 1} \cdot \frac{q_{\text{охл}}}{\eta_{\text{котла}}} \xi \cdot 100 \% = 24 \ %.$$

Повышение КПД топливоиспользования

$$\eta_{\text{топл}} = \eta_e + \frac{\psi}{\psi - 1} q_{\text{охл}} \xi = 0,61.$$

Обсуждение

В ряде случаев вторичные энергетические ресурсы систем охлаждения теплового двигателя оказывается целесообразно использовать не для получения электроэнергии, а для нужд теплофикации, например, в системах подогрева груза на судах, замещая автономные котлы, предназначенные для обеспечения этих систем. При этом необходимо поднять температурный уровень теплоты, изымаемой из системы охлаждения, что и может быть обеспечено тепловыми насосами.

С использованием описанной методики можно оценить повышение энергетической эффективности в результате использования и других вторичных энергетических ресурсов, например, потерь теплоты, отводимой с моторным маслом, в том случае, если эти потери окажутся достаточно значительными.

При выборе устройств и методов использования вторичных энергетических ресурсов тепловых двигателей необходимо прежде всего ориентироваться на потенциального потребителя тепловой, механической или электрической энергии и выбирать методы, позволяющие получить наиболее востребованный в конкретной установке вид энергии.

Выводы

Использование вторичных энергетических ресурсов — одно из перспективных направлений повышения энергетической эффективности установок с тепловыми двигателями.

Для оценки эффективности мероприятий по повышению энергоэффективности тепловых двигателей целесообразно использовать не только анализ теплового баланса, но и анализ изменения энтальпии источников вторичных энергетических ресурсов.

Применение таких устройств утилизации вторичных энергетических источников, как паровые утилизационные турбины и тепловые насосы позволяет повысить коэффициент использования топлива на 3 – 9 %.

При переводе тепловых двигателей на газовое топливо появляются дополнительные возможности повышения их энергоэффективности за счет использования механической энергии топлива и хладопотенциала газового топлива.

Выбор методов повышения энергетической эффективности должен быть увязан с наличием потребностей конкретного энергетического объекта в дополнительной механической энергии и теплоте.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Медников А. Управляем энергоэффективностью / А. Медников, А. Савранский // Морской флот. — 2013. — № 3. — С. 60–61.
2. Тузов Л. В. Идеальный термодинамический цикл ДВС с изохорным и изобарным способами подвода теплоты / Л. В. Тузов, Н. Б. Ганин, А. С. Пряхин // Двигателестроение. — 2015. — № 1. — С. 3–6.
3. Ерофеев В. Л. Пределы повышения энергетической эффективности топливоиспользования поршневого ДВС / В. Л. Ерофеев, Н. Б. Ганин, А. С. Пряхин // Двигателестроение. — 2015. — № 2. — С. 33–38.
4. Живлюк Г. Е. Состояние и перспективы совершенствования систем топливоподачи Common Rail. / Г. Е. Живлюк, А. П. Петров // Вестник Государственного университета морского и речного флота имени адмирала С. О. Макарова. — 2016. — № 1 (35). — С. 108–123. DOI: 10.21821/2309-5180-2016-8-1-108-123.
5. Радченко Н. И. Рациональные параметры тригенерационных контуров судовых среднеоборотных дизелей / Н. И. Радченко, А. А. Сирота, Д. В. Коновалов // Двигатели внутреннего сгорания. — 2007. — № 2. — С. 136–141.
6. Гацуц А. Г. Совершенствование технической эксплуатации судовых энергетических установок / А. Г. Гацуц // Двигатели внутреннего сгорания. — 2011. — № 2. — С. 137–141.
7. Андреев А. А. Экологическая и энергетическая целесообразность утилизации низкопотенциальной теплоты на судах с помощью теплового насоса / А. А. Андреев, И. В. Калинин // Техногенна безпека: Наукові праці МДГУ ім. П. Могили. — 2008. — Т. 85. — Вип. 72. — С. 23–27.
8. Волынец А. В. Утилизация тепловых ресурсов главного судового двигателя посредством использования теплонасосной установки / А. В. Волынец, А. Н. Соболенко // Вестник Государственного университета морского и речного флота имени адмирала С. О. Макарова. — 2016. — № 5 (39). — С. 144–150. DOI: 10.21821/2309-5180-2016-8-5-144-150.
9. Безюков О. К. Энергосбережение: энергетическая эффективность водного транспорта: монография. / О. К. Безюков, В. Л. Ерофеев, Е. В. Ерофеева, А. С. Пряхин. — СПб.: Изд-во ГУМРФ им. адм. С. О. Макарова, 2016. — 284 с.
10. Ерофеев В. Л. Использование перспективных топлив в судовых установках / В. Л. Ерофеев. — Л.: Судостроение, 1989. — 80 с.
11. MERC.1 / Circ. 684 от 17.08.2008 г. Руководящие принципы добровольного использования действующего (эксплуатационного) показателя (индикатора) энергетической эффективности судна.
12. Ерофеев В. Л. Неточность термодинамических определений и терминов — путь к вечному двигателю второго рода / В. Л. Ерофеев, В. А. Жуков, А. С. Пряхин // Вестник Государственного университета морского и речного флота имени адмирала С. О. Макарова. — 2016. — № 6 (40). — С. 140–149. DOI: 10.21821/2309-5180-2016-8-6-140-149.
13. Термодинамические диаграммы i - $\ln p$ для хладагентов. — М.: АВИСАНКО, 2003. — 50 с.
14. Энергетическое оборудование электростанций. Промышленная группа «Генерация». [Электронный ресурс]. — Режим доступа: <http://generation.ru/> (дата обращения: 10.02.2017).
15. Энергосберегающие решения. ЗАО «Эко-энергетика». [Электронный ресурс]. — Режим доступа: <http://eco-energetika.com/> (дата обращения: 10.02.2017).

REFERENCES

1. Mednikov, A., and A. Savranskii. "Upravlyaem energoeffektivnost'yu." *Morskoi flot* 3 (2013).
2. Tuzov, L.V., N.B. Ganin, and A.S. Pryakhin. "Ideal Thermodynamic Cycle for Reciprocating Engine with Isochoric and Isothermal Heat Supply." *Dvigatelistroyeniye* 1 (2015): 3–6.
3. Erofeev, V. L., N. B. Ganin, and A. S. Prjahnin. "Predely povysheniya jenergeticheskoy jeffektivnosti toplivoispolzovaniya porshneвого DVS." *Dvigatelistroyeniye* 2 (2015): 33–38.
4. Zhivlyuk, Gregory Evgenyevich, and Aleksandr Pavlovich Petrov. "Status and prospects of perfection of fuel supply system Common Rail." *Vestnik Gosudarstvennogo universiteta morskogo i rechnogo flota imeni admirala S.O. Makarova* 1(35) (2016): 108–123. DOI: 10.21821/2309-5180-2016-8-1-108-123.
5. Radchenko, N. I., A. A. Sirota, and D. V. Konovalov. "Ratsional'nye parametry trigeneratsionnykh konturov sudovykh sredneoborotnykh dizelei." *Internal Combustion Engines* 2 (2007): 136–141.
6. Gatsuts, A. G. "Improvement of technical maintenance of ship's power plant." *Internal Combustion Engines* 2 (2011): 137–141.

7. Andreev, A. A., and I. V. Kalinichenko. "Ekologicheskaya i energeticheskaya tselesoobraznost' utilizatsii nizkopotentsial'noi teploty na sudakh s pomoshch'yu teplovogo nasosa." *Tekhnogenna bezpeka: Naukovi pratsi MDGU im. P.Mogili* 85.72 (2008): 23–27.
8. Volintsev, Aleksandr Vladislavovich, and Anatolij Nikolaevich Sobolenko. "Utilization of main ship engine heat resources by means of heat pump installation usage." *Vestnik Gosudarstvennogo universiteta morskogo i rechnogo flota imeni admirala S.O. Makarova* 5(39) (2016): 144–150. DOI: 10.21821/2309-5180-2016-8-5-144-150.
9. Bezyukov, O. K., V. L. Erofeev, E. V. Erofeeva, and A. S. Pryakhin. *Energosberezhenie: energeticheskaya effektivnost' vodnogo transporta*. SPb.: Izdatel'stvo GUMRF imeni admirala S.O. Makarova, 2016.
10. Erofeev, V. L. *Ispol'zovanie perspektivnykh topliv v sudovykh ustanovkakh*. L.: Sudostroenie, 1989.
11. MERC.1 / Circ. 684 ot 17.08.2008 g. Rukovodyashchie printsipy dobrovol'nogo ispol'zovaniya deistviyushchego (ekspluatatsionnogo) pokazatelya (indikatora) energeticheskoi effektivnosti sudna.
12. Erofeev, Valentin Leonidovich, Vladimir Anatolevich Zhukov, and Alexander Sergeyevich Pryakhin. "Inexactitude of thermodynamical definition sand terms is a way to the perpetual engine of the second kind." *Vestnik Gosudarstvennogo universiteta morskogo i rechnogo flota imeni admirala S.O. Makarova* 6(40) (2016): 140–149. DOI: 10.21821/2309-5180-2016-8-6-140-149.
13. *Termodinamicheskie diagrammy i-lnp dlya khladogentov*. M.: AVISANKO, 2003.
14. Energeticheskoe oborudovanie elektrostantsii. Promyshlennaya gruppa «Generatsiya». Web. 10 Feb. 2017 <<http://generation.ru/>>.
15. Energosberegayushchie resheniya. ZAO «Eko-energetika». Web. 10 Feb. 2017 <<http://eco-energetika.com/>>.

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

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

Жуков Владимир Анатольевич —
доктор технических наук, доцент
ФГБОУ ВО «ГУМРФ имени
адмирала С. О. Макарова»
198035, Российская Федерация, г. Санкт-Петербург,
ул. Двинская, 5/7
e-mail: va_zhukov@rambler.ru, zhukovva@gumrf.ru

Мельник Олеся Владимировна —
кандидат технических наук
ФГБОУ ВО «ГУМРФ имени
адмирала С. О. Макарова»
198035, Российская Федерация, г. Санкт-Петербург,
ул. Двинская, 5/7
e-mail: olvmelnik@gmail.com

INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Erofeev, Valentin 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: kaf_sdvs@gumrf.ru

Zhukov, Vladimir 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: va_zhukov@rambler.ru, zhukovva@gumrf.ru

Melnik, Olesya V. —
PhD
Admiral Makarov State University of Maritime
and Inland Shipping
5/7 Dvinskaya Str., St. Petersburg 198035,
Russian Federation
e-mail: olvmelnik@gmail.com

Статья поступила в редакцию 15 мая 2017 г.
Received: May 15, 2017.

DOI: 10.21821/2309-5180-2017-9-3-581-596

FEATURES OF THE DEVELOPMENT OF ENVIRONMENTALLY SAFE MODERN DIESEL POWER PLANTS

G. E. Zhivljuk, A. P. Petrov

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

Currently, the development of the global engine manufacturing is impossible without taking into account modern requirements of environmental safety requirements for marine power plants. The article review the main trends in the development and design of internal combustion engines to meet environmental standards. It is asserted that the problems of ensuring environmental safety are becoming a priority for the leading manufacturers, and this direction begins to occupy the leading position in the main directions of the development of modern engine building. Among the main directions of the authors are identified and analyzed: improving the flow in-cylinder processes; development of designs of the peripheral systems and technologies, influencing the toxicity of exhaust gases; the use of alternative fuels from the standpoint of reducing the harmful effects of the engine on the environment. It is emphasized that the conditions for the organization of the working process determine the intensity of the formation of harmful substances controlled by environmental safety requirements. The influence of cleaning devices and the bypass of exhaust gases on the growth of environmental safety indicators of a modern diesel engine is considered. The authors analyze the features of the use of natural gas and methanol in dual-fuel and gas engines. Examples of designs by leading engine manufacturers demonstrated the possibility of achieving high environmental parameters through the implementation and development of these areas. The main conclusions of the article are based on the 28 Congress of the International Council on combustion engines (CIMAC Congress), held in Helsinki in June 2016.

Keywords: internal combustion engine, environmental safety, fuel injection, Miller cycle, exhaust gases, exhaust gas recirculation, selective catalytic reduction, scrubber, alternative fuels, injector.

For citation:

Zhivljuk, Grigorij E., and Aleksandr P. Petrov. "Features of the development of environmentally safe modern diesel power plants." *Vestnik Gosudarstvennogo universiteta morskogo i rechnogo flota imeni admirala S.O. Makarova* 9.3 (2017): 581–596. DOI: 10.21821/2309-5180-2017-9-3-581-596.

УДК 621.431.074

ОСОБЕННОСТИ РАЗВИТИЯ ЭКОЛОГИЧЕСКИ БЕЗОПАСНЫХ СОВРЕМЕННЫХ ДИЗЕЛЬНЫХ ЭНЕРГЕТИЧЕСКИХ УСТАНОВОК

Г. Е. Живлюк, А. П. Петров

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

В настоящее время развитие мирового двигателестроения невозможно без учета современных требований экологической безопасности, предъявляемых к судовым энергетическим установкам. В статье рассматриваются основные тенденции разработок и конструирования двигателей внутреннего сгорания в обеспечение требований экологических стандартов. Проблемы обеспечения экологической безопасности становятся приоритетными для ведущих производителей, и данное направление начинает занимать главенствующее положение в основных направлениях развития современного двигателестроения. В числе главных направлений авторами выделяются и анализируются: совершенствование протекания внутрицилиндровых процессов; развитие конструкций периферийных систем и технологий, влияющих на токсичность отработавших газов; использование альтернативных видов топлив с позиций сокращения вредного воздействия двигателя на окружающую среду. Подчеркивается, что условия организации рабочего процесса определяют интенсивность образования вредных веществ, контролируемых требованиями экологической безопасности. Рассмотрено влияние устройств очистки и перепуска отработавших газов на рост показателей экологической безопасности современного дизельного двигателя. Анализируются особенно-

сти применения природного газа и метанола в двухтопливных и газовых двигателях. На примерах конструкций ведущих производителей двигателей продемонстрированы возможности достижения высоких экологических параметров благодаря реализации и развитию выделенных направлений. Основные выводы по статье базируются на материалах 28 Конгресса Международного совета по двигателям внутреннего сгорания (CIMAC Congress), состоявшегося в Хельсинки в июне 2016 г.

Ключевые слова: двигатель внутреннего сгорания, экологическая безопасность, впрыск топлива, цикл Миллера, отработавшие газы, рециркуляция отработавших газов, селективное каталитическое восстановление, скруббер, альтернативные виды топлива, форсунка.

Для цитирования:

Живлюк Г. Е. Особенности развития экологически безопасных современных дизельных энергетических установок / Г. Е. Живлюк, А. П. Петров // Вестник Государственного университета морского и речного флота имени адмирала С. О. Макарова. — 2017. — Т. 9. — № 3. — С. 581–596. DOI: 10.21821/2309-5180-2017-9-3-581-596.

Введение

Неизменно в течение многих десятилетий главными тенденциями развития мирового двигателестроения являлись повышение топливной экономичности, сокращение массо-габаритных характеристик при одновременном росте удельных мощностных показателей новых агрегатов, обеспечение высоких ресурсных показателей, снижение себестоимости производства. Условия конкуренции формировали такой технический облик двигателя, который, в первую очередь, позволял в целом минимизировать экономические затраты потребителя в процессе эксплуатации и получать максимальные прибыли производства.

В современном мире дизелестроения вектор направленности новых разработок неуклонно смещается в направлении достижения наибольшей экологической безопасности создаваемых конструкций двигателя. Постоянное повышение требований экологических стандартов вынуждает производителей двигателей обеспечивать эти требования, невзирая на возможные потери в топливной экономичности и увеличение стоимости, размеров и веса агрегатов. Эта тенденция достаточно явно прослеживается в материалах 28 конгресса СИМАК, состоявшегося в Хельсинки 6 – 10 июня 2016 г.

Разработки в области достижения высоких экологических параметров современных двигателей инициированы целым рядом нормативных документов, таких как EU Stage 4, EPA Tier 4 и др. Развитие технологий сокращения вредных выбросов в воздушный бассейн с отработавшими газами двигателей судового назначения было ускорено в связи с введением регулирования Международной морской организации ИМО Tier III [1]. Регулирование предусматривает поэтапное сокращение выбросов:

- с 2013 г. парниковых газов путем введения индекса энергоэффективности — Energy Efficiency Design Index (EEDI), [2];

- с 2015 г. оксидов серы в районах контроля — SECA (SO_x Emission Control Areas);

- с 2016 г. оксидов азота в зонах контроля NECA (NO_x Emission Control Areas);

- одновременно ужесточаются требования на ограничение выбросов твердых частиц.

Находясь под жестким прессом регулирования и контроля выбросов вредных веществ, производители двигателей и поставщики комплектующих изделий и систем вынуждены предпринимать соответствующие меры по достижению требований экологических стандартов своей продукцией. На основе анализа деятельности основных производителей в рассматриваемой области выделяется ряд основных направлений совершенствования конструкции двигателей для обеспечения экологических параметров, из которых важнейшими являются:

- совершенствование протекания внутрицилиндровых процессов, включая точное автоматическое управление процессом сгорания — тепловыделения посредством формирования требуемого закона топливоподачи и обеспечение специальных условий протекания процессов сгорания в камере сгорания;

- развитие конструкций периферийных устройств и технологий для очистки отработавших газов;

– создание конструкций двигателя, предусматривающих использование альтернативных видов топлив с целью обеспечения максимального сокращения вредного воздействия на окружающую среду.

В настоящей статье рассматриваются изложенные тенденции развития конструкций и на примерах публикаций ведущих производителей двигателей внутреннего сгорания (ДВС) отслеживаются возможности достижения требуемых параметров экологической безопасности энергетических установок. В этой связи, в первую очередь, необходимо упомянуть о ходе выполнения программы HERCULES [3] – [5], представляющей комплексный научно-исследовательский проект по созданию высокоэффективных и экологически безопасных судовых двигателей. Этот проект осуществляется с 2004 г. по настоящее время при активном участии фирм *MAN u Wärtsilä* и поддержке со стороны Европейского Союза. Его цели иллюстрируются рис. 1.

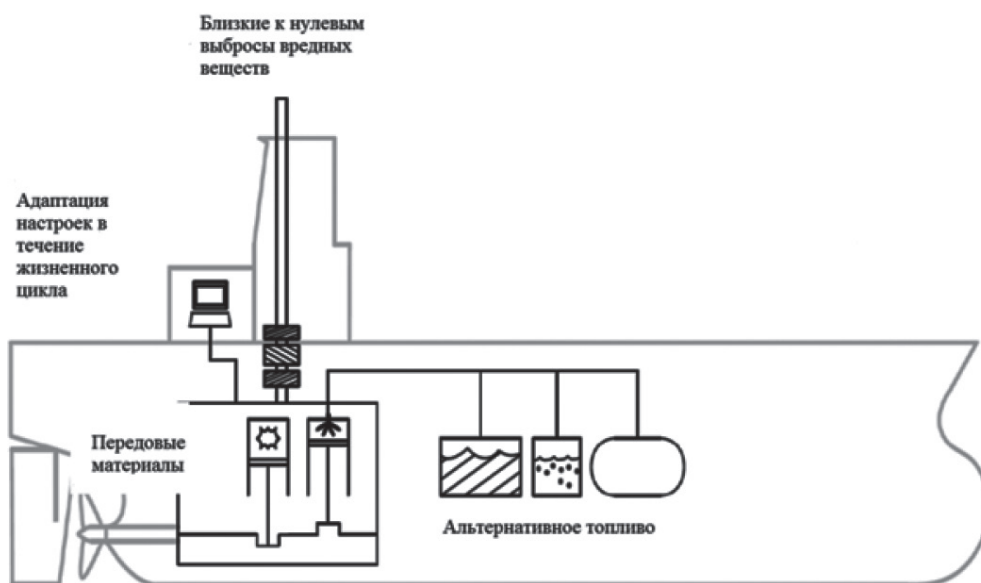


Рис. 1. Основные направления реализации проекта HERCULES

Промежуточные итоги выполнения проекта были подведены в 2014 г. В качестве главных достижений отмечается увеличение на 3 % КПД двигателя и снижение выбросов NO_x — на 80 %. Кроме того, было достигнуто рекордное значение максимального давления в цилиндре в 30 МПа на прототипе экспериментального двигателя *R&D*.

Совершенствование протекания внутрицилиндровых процессов

Наиболее логичным, эффективным и технически обоснованным путем решения проблем экологической безопасности двигателя является специальная доводка его рабочего процесса. Условия протекания внутрицилиндровых процессов определяют интенсивность образования вредных веществ, контролируемых требованиями экологической безопасности.

Выбросы твердых частиц инициируются процессами образования сажи, на поверхности которой абсорбируются вредные вещества, являющиеся продуктами неполного сгорания топлива. Поскольку механизм образования сажи в камере сгорания дизельного двигателя представляется как высокотемпературный крекинг капель распыленного топлива, сокращение выбросов твердых частиц может быть достигнуто в основном путем увеличения дисперсности распыливания топлива за счет повышения давления впрыска и более равномерного распределения топлива в объеме камеры сгорания, избегая повышенных концентраций в пристеночных областях. Вторым нормируемым вредным продуктом в отработавших газах дизельного двигателя являются оксиды азота NO_x , образование которых также напрямую связано с условиями протекания процесса сгорания. Стремление к сокращению удельного расхода топлива приводит к повышению динамичности процесса тепловыделения

и, как следствие, к росту максимальных температур в цикле, уровень которых, как известно, определяет термический КПД цикла. При этом быстрый рост температур рабочего тела до достижения максимума в цилиндре поршневого ДВС определяет количественную характеристику образования оксидов азота, а резкое снижение температур газа на такте расширения не оставляет времени на протекание реакций восстановления NOx. Что касается содержания в отработавших газах оксидов серы, то их количество зависит только от состава топлива, и сокращение SOx не может быть достигнуто путем влияния на протекание внутрицилиндровых процессов.

Таким образом, при рассмотрении особенностей организации малотоксичных внутрицилиндровых процессов в первую очередь встает задача точного управления законом подачи топлива, определяющим динамику процесса тепловыделения. Эту задачу позволяют успешно решать электронно-управляемые аккумуляторные системы подачи Common Rail Systems (CRS), способные за счет формирования многоступенчатого впрыска топлива реализовать практически любой закон тепловыделения [6]. Заслуженное первенство в разработке и массовом внедрении таких систем принадлежит *Robert Bosch Diesel Systems*. Основываясь на более чем 20-летнем опыте производства и эксплуатации систем электронного управления впрыском на двигателях автотранспортного назначения, специалисты фирмы активно выходят на рынок больших размеров двигателей (в том числе — судовых) с цилиндровой мощностью более 560 кВт [7], которые уже сегодня, способны обеспечивать требования EU Stage 4 и EPA Tier 4. Специальными разработками CRS для двигателей судового назначения заняты фирмы *L'Orange GmbH* [8], *Ganser CRS AG* [9] и др.

Одновременно со специализированными фирмами разработками в области электронно-управляемого впрыска топлива заняты ведущие производители двигателей. Фирма *MAN Diesel & Turbo SE*, имеющая большой опыт разработки и производства CRS для среднеоборотных двигателей, проводит работы по созданию новой модульной системы MCRS 2.2 с давлением в рампе до 220 МПа [10], [11] на смену предыдущей системе MCRS 1.6 (рис. 2). Благодаря её использованию в конструкции двигателя 6L 32/44 достигается снижение дымности и сокращение выбросов оксидов азота во всем мощностном диапазоне работы двигателя (рис. 3).

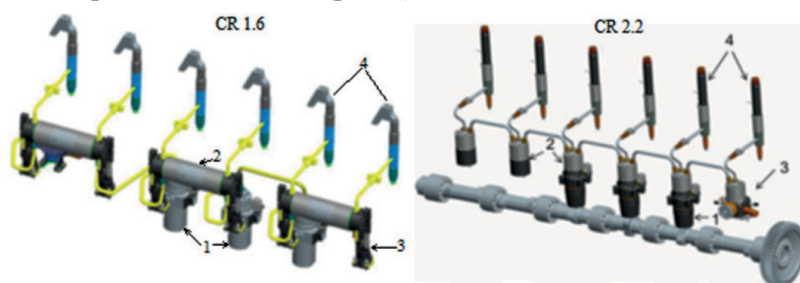


Рис. 2. Системы Common Rail MAN Diesel & Turbo SE:
1 — топливный насос высокого давления; 2 — аккумулятор давления;
3 — блок клапанов; 4 — топливные форсунки

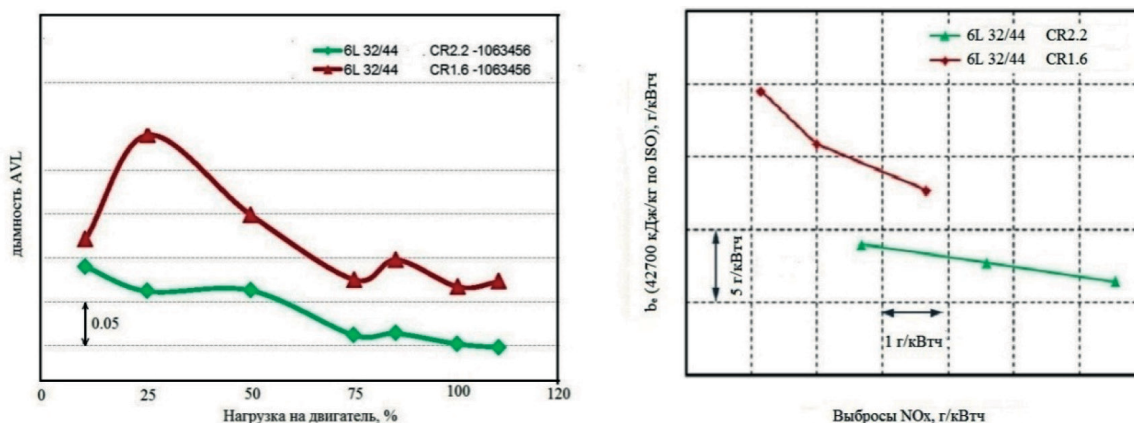


Рис. 3. Характеристики двигателя фирмы MAN по дымности и выбросам оксидов азота

Аналогичные работы проводит мировой лидер в производстве судовых двигателей — фирма *Wärtsilä*. В 2013 г. фирма установила двигатели W46 с топливоподачей под управлением системы Common Rail первого поколения — CR1 на 14 круизных судах. К середине 2015 г. суммарная наработка двигателей составила свыше 3 млн ч. Основываясь на благоприятных результатах эксплуатации, фирма *Wärtsilä* предпринимает усилия по созданию нового поколения оборудования — CR2, которое в полном объеме предполагается использовать на новом двигателе W31 (рис. 4) [12].

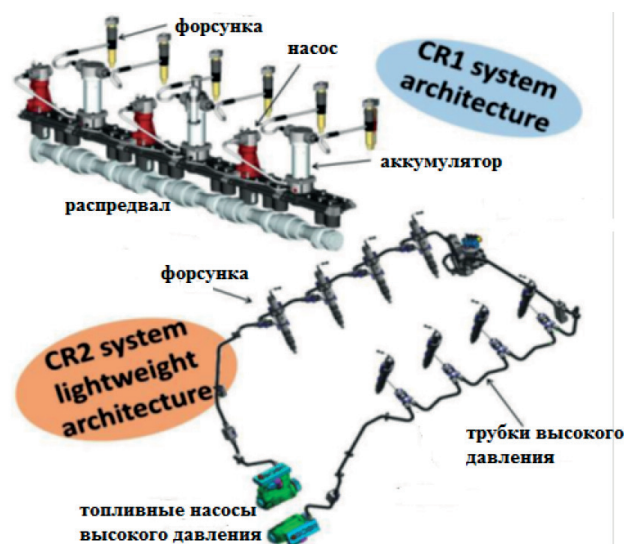


Рис. 4. Конструктивные отличия систем CR1 и CR2, разработанных фирмой *Wärtsilä*

Как видно из рис. 4, система Common Rail второго поколения оказывается более простой по конструкции. Так, вместо индивидуальных насосов и отдельных аккумуляторов топлива для форсунок в системе используются блочные насосы высокого давления, а управление впрыском производится не управляющим маслом (серво маслом) а непосредственно топливом, что значительно увеличивает быстродействие системы, повышает возможности по управлению впрыском и дополнительно упрощает конструкцию. Кроме того, аккумулирующие объемы топлива в системе второго поколения дополнительно организованы непосредственно в форсунках (рис. 5). Как отмечает разработчик, благодаря использованию новой конструкции системы достигается значительное сокращение комплектующих деталей, в частности, конструкция форсунки CR2 имеет приблизительно на 30 комплектующих единиц меньше, чем форсунка CR1.

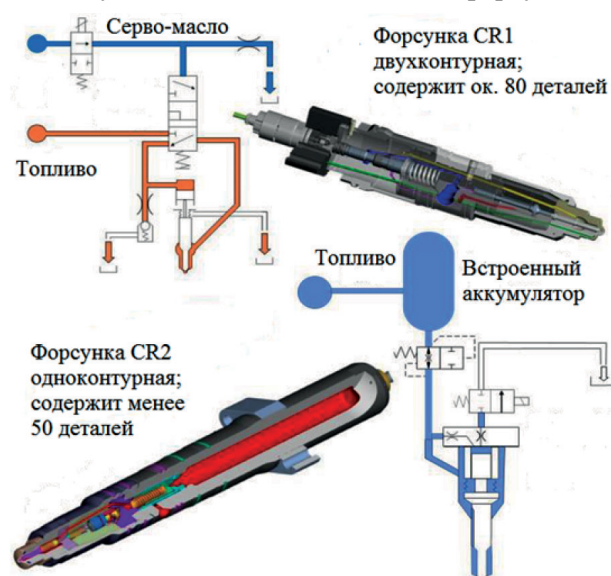


Рис. 5. Особенности исполнения форсунок

Диапазон использования CRS расширен и в отечественном производстве. Так, Уральский дизель-моторный завод (УДМЗ) в представленном новом семействе двигателей ДМ-185 с системой электронного управления обеспечивает достижение требований EU IIIA / IMO2 без использования периферийных систем доочистки отработавших газов [13].

Не менее важным аспектом организации рабочего процесса низкотоксичного дизельного двигателя, на который обращено пристальное внимание разработчиков, является обеспечение специальных условий протекания сгорания цикловой подачи топлива в камере сгорания. Поскольку образование оксидов азота является высокотемпературным процессом, становится актуальным использование методов сдерживания роста температур рабочего тела в цилиндре. По мнению специалистов MTU [14], эффективным способом сокращения выбросов оксида азота является использование внутрицилиндрового охлаждения свежего заряда (цикла Миллера) в сочетании с двухступенчатым наддувом. Дальнейшее развитие двигателей MTU серии 4000 – «Model Type 05» предусматривает использование ряда ключевых технологий, включая упомянутые, для преодоления противостояния между жесткими требованиями стандарта выхлопа (EU Stage IIIB, EPA Tier 4 и IMO 3) и сокращением эксплуатационных затрат.

Очень близкой к идеологии MTU концепции придерживается и флагман отечественного двигателестроения ОАО «Коломенский завод» в разработке новой платформы для конструкций двигателей Д500. На рис. 6 показано влияние различной эффективности зарядки цилиндра (интенсивность реализации цикла Миллера) на температуры заряда цилиндра в реперных точках цикла, необходимое давление наддувочного воздуха для компенсации потери заряда и сокращение эмиссии оксидов азота по данным Коломенского завода [15].

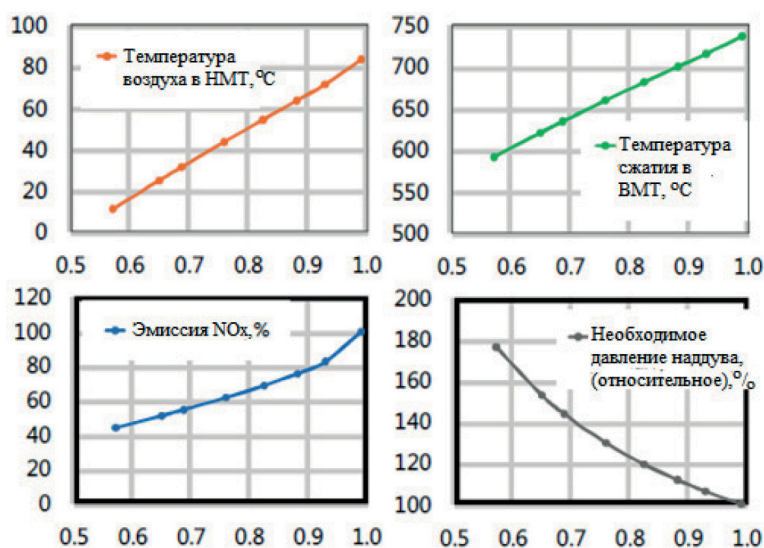


Рис. 6. Эффект от использования цикла Миллера

Для более глубокой адаптации характеристик двигателя ко всем режимам работы оказываются уместным внедрение в его конструкцию системы электронного управления [10] изменением фаз газораспределения — Variable Valve Timing (VVT). Электронное управление процессом газообмена в дизельном двигателе позволяет улучшить очистку цилиндра от отработавших газов и наполнение цилиндра свежим зарядом для всего скоростного и мощностного диапазона работы. Попутно могут решаться проблемы реализации цикла Миллера и вопросы оптимизации условий работы агрегата газотурбинного наддува.

Примером разработок в этой области является конструкция нового двигателя фирмы *Anglo Belgian Co.* Новый высокоэкономичный двигатель D36 мощностью 650 кВт/цикл при 750 об/мин, оснащенный, в том числе, системой изменения фаз газораспределения, отвечает всем современным требованиям по выбросам вредных веществ [16]. Использование изменения фаз газораспре-

деления предусматривается в конструкции своих судовых дизелей фирмами *YANMAR CO, LTD* [17], *Hyundai Heavy Industries* [18] (рис. 7 и 8). На рис. 7, благодаря использованию в конструкции привода клапанов передаточного звена в виде управляемого гидроцилиндра, показана реализация возможности изменения времени открытия клапана в зависимости от давления масла, создаваемого в полости под верхним плунжером. Управляющее воздействие на клапан 3 формируется исходя из параметров состояния и режима работы двигателя.

Наиболее просто и эффективно система изменения фаз газораспределения реализуется в случае применения двухраспредвальной конструкции механизма [19], когда каждый кулачковый вал управляет своей группой клапанов — впускных и выпускных. Механизм изменения фаз в такой системе газораспределения смонтирован в конструктивном элементе привода распределительного вала. Это позволяет обеспечить управляемый поворот любого из распределительных валов относительно приводного шкива (шестерни) на требуемый угол (см. рис. 7).

Такая схема реализована на большинстве высокооборотных двигателей автотранспортного назначения и достаточно хорошо зарекомендовала себя в эксплуатации, включая применение системы DVVT (Dual Variable Valve Timing), позволяющей плавно изменять фазы газораспределения в зависимости от условий работы двигателя. Это достигается путем поворота и впускного и выпускного распределительных валов относительно приводной звездочки в диапазоне 40 – 60 ° угла поворота коленчатого вала.

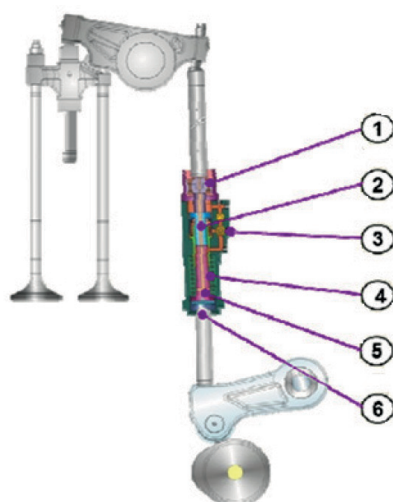


Рис. 7. Конструкция системы изменения фаз газораспределения фирмы *Hyundai Heavy Industries*:
1 — сферическая опора верхней штанги толкателя; 2 — верхний плунжер; 3 — клапан подачи масла;
4 — возвратная пружина; 5 — нижний плунжер; 6 — сферическая опора нижней штанги

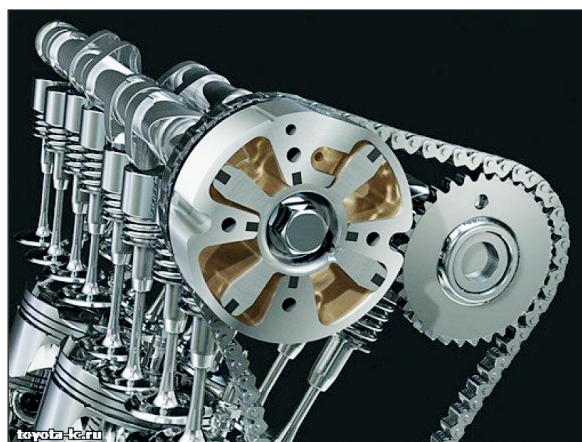


Рис. 8. Конструктивное исполнение системы VVTi на двухраспредвальном двигателе (управление только впускными клапанами, торцевая крышка механизма снята)

Развитие конструкций периферийных устройств и технологий для очистки отработавших газов

Уверенное долгосрочное достижение требований ИМО Tier III и тем более ИМО Tier IV, оказывается практически невозможным без использования в конструкции агрегата периферийных устройств, обеспечивающих дополнительный рост показателей экологической безопасности современного коммерческого дизельного двигателя. Периферийные устройства, во-первых, позволяют изменять состав свежего заряда цилиндра в обеспечение достижения максимальной экологической безопасности внутрицилиндровых процессов и, во-вторых, производят дополнительную очистку отработавших газов от вредных компонентов перед выбросом в атмосферу.

Широкое распространение в конструкциях двигателя получают системы рециркуляции отработавших газов Exhaust Gas Recirculation (EGR) с электронно-программным управлением. Благодаря смешиванию свежего воздуха, подаваемого в цилиндр, с отработавшими газами происходит снижение концентрации свободного кислорода O_2 и увеличивается масса углекислого газа CO_2 в свежем заряде цилиндра. Совместное влияние этих двух факторов вызывает понижение максимальной температуры в камере сгорания как за счет снижения скорости горения из-за низкой концентрации O_2 , так и за счет высокой теплоемкости CO_2 . В результате обеспечивается сокращение концентрации термического NO_x в отработавших газах двигателя. Однако эффективность системы EGR ограничивается режимами работы, на которых коэффициент избытка воздуха значительно превышает минимально необходимый для обеспечения организации процесса сгорания.

Кроме того, в самых простых системах EGR высокого давления, которые получили широкое распространение в двигателях автомобильного класса, существенной проблемой является осаждение слоя твердых частиц продуктов неполного сгорания на поверхностях впускного тракта. Смешиваясь с масляным туманом, неизбежно поступающим из системы вентиляции картера, твердые частицы образуют на стенках впускных каналов и поверхностях впускных клапанов постоянно нарастающий слой отложений. Уплотненный слой отложений не только уменьшает сечение каналов, но и, в случае отрыва его отдельных фрагментов потоком газа, способен привести к серьёзным авариям двигателя при попадании под клапаны и препятствуя их полному закрытию.

В отличие от предельно жестко скомпонованных двигателей автомобильного класса, габариты больших стационарных и судовых двигателей позволяют развить объемы системы EGR и избежать рисков накопления отложений во впускных каналах. В то время как на автомобильном двигателе, в лучшем случае, может устанавливаться охладитель отработавших газов, подаваемых в систему рециркуляции, в судовом двигателе представляется возможным задействовать в этой системе скруббер и произвести очистку газов системы рециркуляции. Схемы систем EGR, предлагаемые для реализации *Mitsubishi Heavy Industries Marine Machinery & Engine Co. Ltd. (MHI-MME)* в малооборотном двигателе 6UEC45LSE-Eco-B2, работающем на тяжелом топливе, представлены на рис. 9 [20].

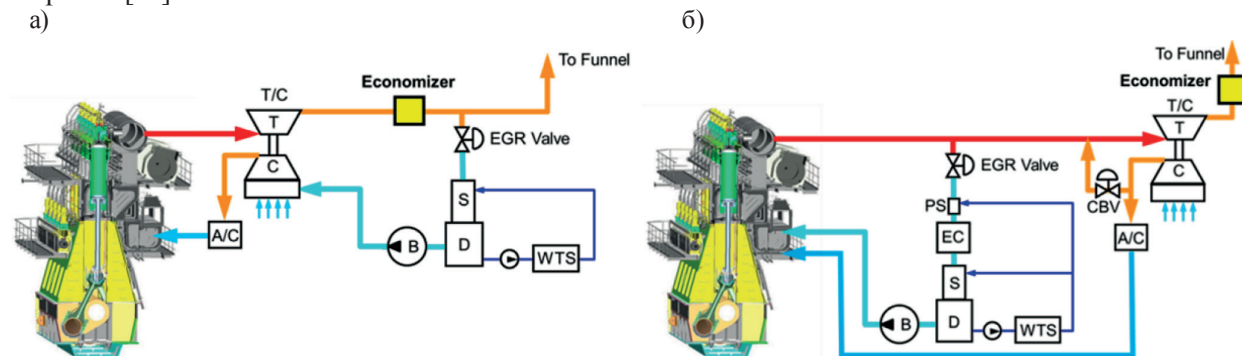


Рис. 9. Схема систем рециркуляции отработавших газов:

а — низкого давления; б — высокого давления; T/C — турбокомпрессор; C — компрессор; T — турбина; A/C — охладитель воздуха; CBV — клапан байпаса; EGR Valve — клапан перепуска отработавших газов; PS — предскруббер; EC — охладитель перепускаемых газов; S — скруббер; D — влагоотделитель; WTS — система очистки влаги; B — нагнетатель EGR; To Funnel — в дымовую трубу

Из приведенных на рис. 9 схем системы EGR специалисты МНН-ММЕ отдают предпочтение системе низкого давления (LP-EGR), отмечая, что, невзирая на большие объемы системы, система LP-EGR выгодно отличается простотой конструкции скруббера и пониженной температурой газа. Кроме того, на турбине срабатывает полный объем газа, покинувшего цилиндр. Результаты испытаний адаптированного двигателя 6UEC45LSE-Eco-B2 с системой LP-EGR, показавшие достижение значительного сокращения (свыше 80 %) эмиссии NO_x, представлены на рис. 10.

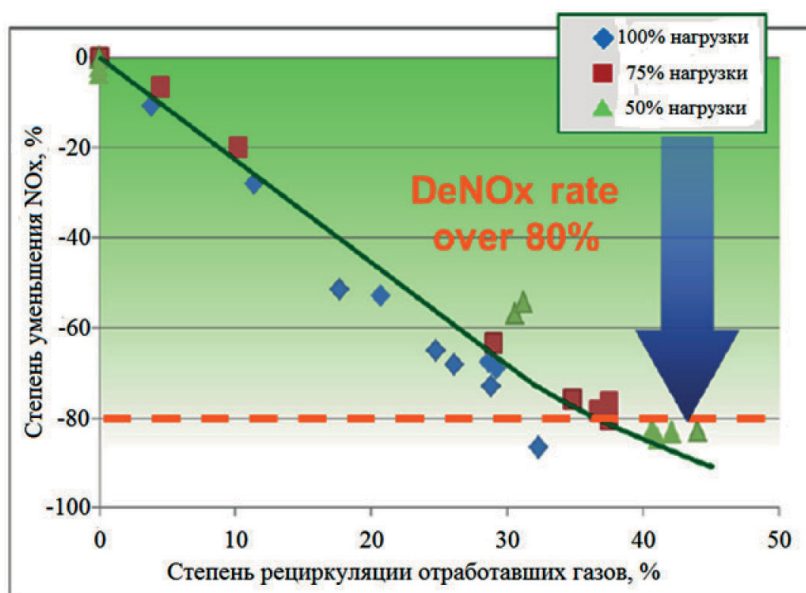
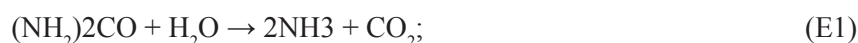


Рис. 10. Сокращение выбросов NO_x на различных режимах работы двигателя 6UEC45LSE-Eco-B2 с системой LP-EGR в зависимости от степени рециркуляции отработавших газов

В отечественной промышленности системой EGR оборудован высокооборотный двигатель нового семейства «Пульсар», разрабатываемый на ОАО «Звезда» совместно с *AVL List GmbH Austria* [21].

Как уже отмечалось ранее, по очевидным причинам эффективная работа системы EGR на всех режимах работы двигателя оказывается труднодостижимой по причине снижения фактического коэффициента избытка воздуха в камере сгорания. Поэтому параллельно с рециркуляцией отработавших газов в конструкции большеразмерных двигателей все более активно используется широко апробированные в автомобильной промышленности с 1999 г. устройства селективного каталитического восстановления — Selective Catalytic Reduction (SCR) [22]. Система SCR предусматривает использование катализатора на основе каталитически активных соединений металлов переходной валентности (например, пентаоксида ванадия V₂O₅) на керамических носителях кристаллической структуры и реализует протекание двух основных реакций E1 и E2 с образованием азота и воды:



Необходимо отметить, что до последнего времени SCR и скрубберы рассматривались как дополнительные внешние опции к энергетическим установкам. В настоящее время эти агрегаты очистки отработавших газов глубоко интегрированы в конструкцию двигателя и являются его неотъемлемой частью. Из всего многообразия компоновочных решений следует выделить разработки фирмы *MAN Diesel & Turbo*, которая развивает систему, названную авторами по аббревиатуре фирмы MDT [23] — рис. 11.

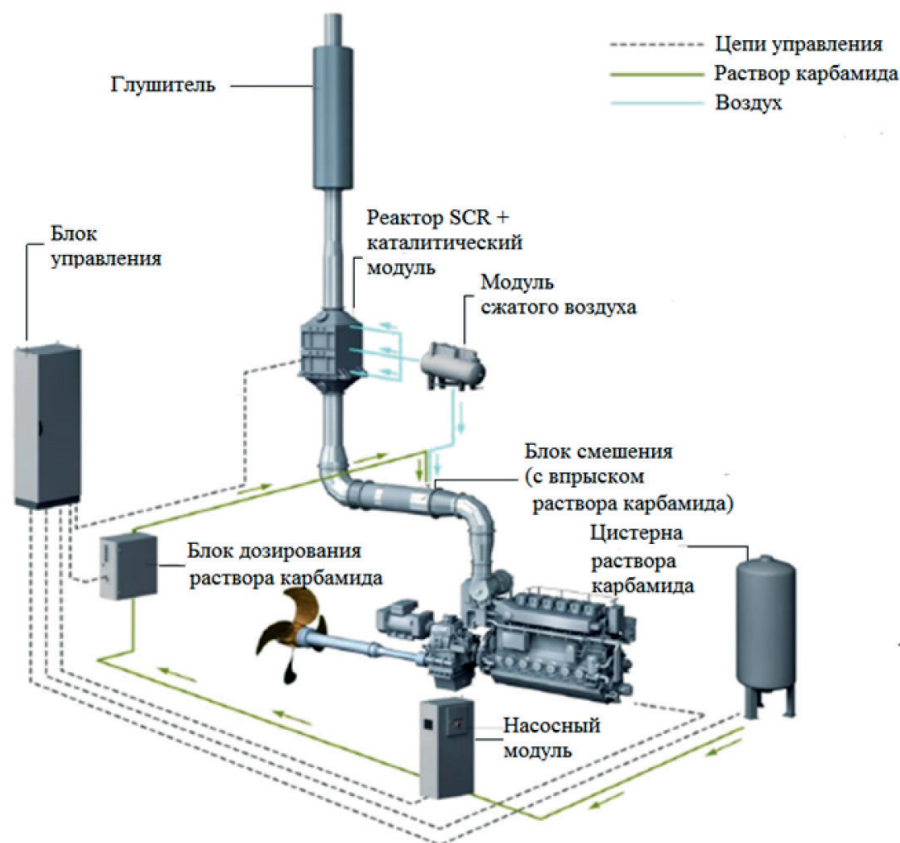


Рис. 11. Система MDT и её компоненты

Отдельный интерес вызывают работы, проводимые специалистами фирмы *Wärtsilä* [24], рассматривающие возможность установки каталитических устройств между ступенями турбины в двухступенчатом наддуве с целью повышения температуры газа и улучшения управляемости процессов в SCR.

Сокращение эмиссии соединений серы с отработавшими газами дизельных двигателей также является важной задачей, которая традиционно решается установкой скрубберов [23].

Использование альтернативных видов топлива

Альтернативные топлива для тепловых двигателей традиционно рассматривалось с позиций сокращения эксплуатационных расходов или в плане использования возобновляемых источников тепловой энергии. Новый взгляд на альтернативные топлива продиктован требованиями экологии. Исходя из этого, большинство производителей рассматривают природный газ как экологически чистое топливо, способное обеспечить требования по выбросам:

- оксидов серы по причине отсутствия серы в природном газе;
- углекислого газа за счет малого содержания углерод-углеродных связей в топливе, при сгорании которого конечные продукты сгорания смещаются к образованию паров воды;
- несгоревших углеводородов и твердых частиц.

Этим предопределяется возросший интерес к разработкам двухтопливных и газовых двигателей. Разработками в области использования газового топлива заняты как специализированные фирмы, занимающиеся конструированием, доводкой и производством топливной аппаратуры (*L'Orange GmbH*, *Robert Bosch Diesel Systems* и др.), так и ведущие производители двигателей. Значительный опыт в разработке газодизельных систем подачи топлива накоплен с 1989 г. специалистами фирмы *L'Orange GmbH* [8]. Успешное коммерческое внедрение получают как двухтопливные системы низкого давления газа (LP-Gas), реализующие гомогенный процесс сгорания топлива (рис. 12), так и системы газа высокого давления (HP-Gas) со сгоранием гетерогенной смеси (рис. 13).

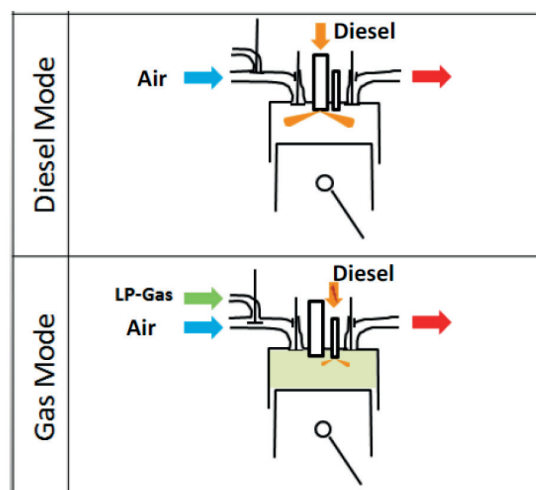


Рис. 12. Принцип действия двухтопливной системы в двух вариантах (Diesel Mode и Gas Mode) с газом низкого давления (LP-Gas)

Внешний вид топливоподающих форсунок фирмы *L'Orange GmbH*, разработанных для двухтопливных двигателей *Wärtsilä Corporation* представлен на рис. 14. При этом разработчик отмечает высокую сложность конструкции системы в плане необходимости конструктивного обеспечения полной подачи топлива при работе двигателя только на жидком топливе и малой подачи запального (пилотного) топлива при работе газодизеля по двухтопливной схеме.

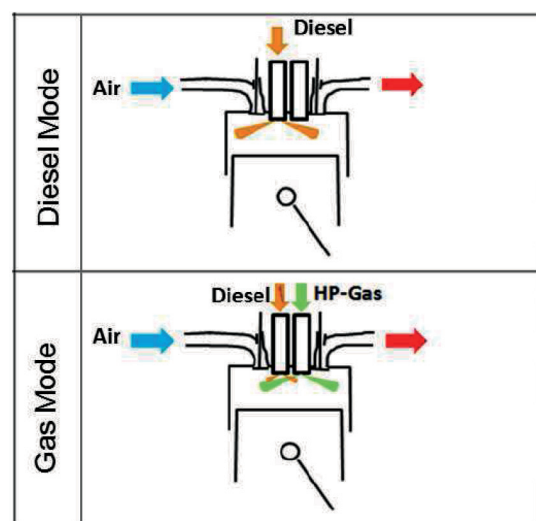


Рис. 13. Принцип действия двухтопливной системы в двух вариантах (Diesel Mode и Gas Mode) с газом высокого давления ((LP-Gas, до 35 МПа)

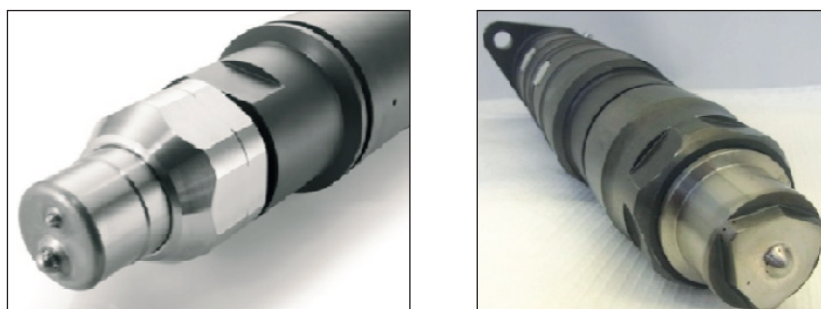


Рис. 14. Форсунки фирмы *L'Orange GmbH* двухтопливного двигателя для газодизельных систем низкого и высокого давления

Преимущество газовых двигателей перед дизельными по эмиссии вредных компонентов демонстрирует фирма *Yanmar Co. LT* [25] на примере двигателя EYG 26L (рис. 15).

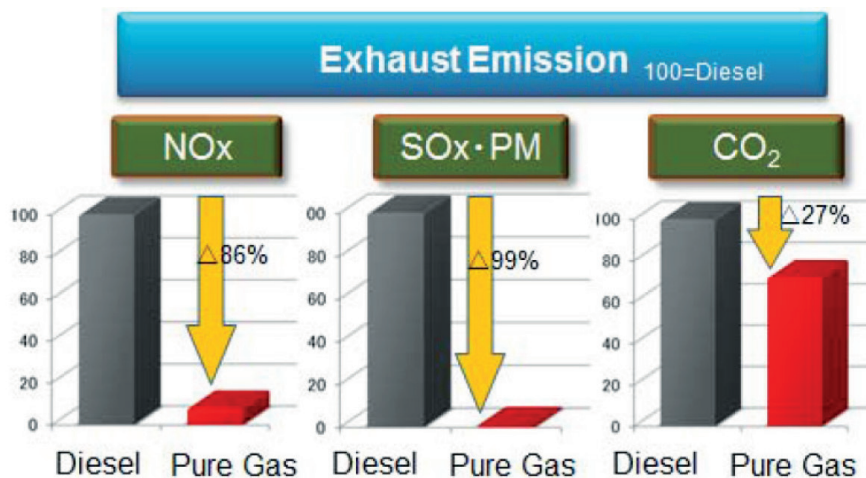


Рис. 15. Сокращение вредных веществ в отработавших газах газового двигателя EYG 26L по сравнению с дизельной модификацией:

Exhaust Emission — выбросы вредных веществ; *PM* — твердые частицы; *Pure Gas* — только газ

Разработкой двухтопливных модификаций линейки своих дизельных двигателей заняты практически все ведущие производители. Так, инженеры фирмы *Daihatsu Diesel Mfg. Co., Ltd.* создали двухтопливный двигатель DE28DF, который прошёл сертификацию и допущен к морскому применению [26]. Два типа газовых двигателей разработала фирма *Kawasaki Heavy Industries, Ltd.* [27], [28], демонстрируя возможности по снижению эмиссии вредных веществ и достижения более высокой энергетической эффективности по сравнению с дизельным двигателем на примере серии двигателей KG-V мощностью от 5 до 7,8 МВт в 12- и 18-ти цилиндровом исполнении. Фирма *MAN B&W* дополнительно запустила в производство двигатель G90ME-C10.5, способный работать на сжатом природном газе [29] и т. д.

Определенный интерес проявляется также к другим видам «неископаемого» топлива. Так, *Wärtsilä Corporation* запатентовала систему впрыска метанола и внедрила его на двигателе для пассажирского парома «Stena Germanica» [30]. Специалисты фирмы *Wärtsilä* отмечают, что добавление водорода к газовому топливу создает предпосылки к увеличению КПД двигателя и снижению суммарного вреда, наносимого окружающей среде. Серьезные исследования в этой области выполнены японскими учеными университетов Осаки и Киото, фирмы *Osaka Gas* (Япония) [31].

Заключение

На основании выполненного в настоящей работе анализа технологий и конструкций, разработанных для повышения экологической безопасности современных дизельных энергетических установок, можно сделать следующие выводы.

1. Постоянно ужесточающиеся международные требования экологических стандартов сформировали и выделили в отдельное направление развития двигателестроения обеспечение экологической безопасности современных дизельных двигателей. При этом проблемы обеспечения экологической безопасности становятся приоритетными для ведущих производителей, а сформированное направление начинает занимать главенствующее положение в основных направлениях развития современного двигателестроения.

2. В общем объеме работ по созданию экологически безопасного двигателя можно проследить отдельные области исследований, к которым, в первую очередь, следует отнести: специальную организацию рабочего процесса двигателя; разработку периферийных устройств, обеспечи-

вающих достижение требований экологических стандартов и внедрение таких устройств в конструкцию двигателя; создание конструкций двигателя, способных использовать нетрадиционные виды топлив.

3. Интерес производителей в области организации и доводки рабочего процесса экологически безопасного дизельного двигателя в основном сфокусирован на точном управлении законом подачи топлива в камеру сгорания и создании специальных температурных условий для свежего заряда цилиндра, способных обеспечить достижение требований действующих экологических стандартов.

4. Достижению соответствия экологическим нормам и правилам способствует развитие и внедрение в конструкцию современного поршневого двигателя периферийных устройств обеспечения сокращения выбросов вредных веществ с отработавшими газами. Особое внимание в этой области уделяется разработкам систем рециркуляции отработавших газов — EGR, и систем селективного каталитического восстановления — SCR.

5. Использование в качестве топлива природного газа и метанола рассматривается ведущими производителями не только с позиций сокращения эксплуатационных расходов потребителем, но и как возможность обеспечения соответствия разрабатываемых конструкций экологическим нормам.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Латухов С. В. Проблемы экологической безопасности судоходства: монография / С. В. Латухов, В. А. Никитин, В. Н. Окунев [и др.]. — СПб., 2015. — 160 с.
2. Иванченко А. А. Энергетическая эффективность судов и регламентация выбросов парниковых газов / А. А. Иванченко, А. П. Петров, Г. Е. Живлюк // Вестник Государственного университета морского и речного флота имени адмирала С. О. Макарова. — 2015. — № 3 (31). — С. 103–112. DOI: 10.21821/2309-5180-2015-7-3-103-112.
3. Мельник Г. В. Вопросы экологии на конгрессе CIMAC-2007 / Г. В. Мельник // Двигателестроение. — 2007. — № 4. — С. 45–50.
4. Kyrtatos N. The 10-Year ‘HERCULES’ R&D Program on Marine Engines / N. Kyrtatos // Marine Engineering. — 2012. — Vol. 47. — No. 3. — Pp. 305–310. DOI: 10.5988/jime.47.305.
5. Kyrtatos N. P. From Hercules ABC to Hercules-2: Cutting Edge R&D in Ship Engines / N. P. Kyrtatos // Transportation Research Procedia. — 2016. — Vol. 14. — Pp. 1581–1590. DOI: 10.1016/j.trpro.2016.05.123.
6. Живлюк Г. Е. Состояние и перспективы совершенствования систем топливоподачи Common Rail / Г. Е. Живлюк, А. П. Петров // Вестник Государственного университета морского и речного флота имени адмирала С. О. Макарова. — 2016. — № 1 (35). — С. 108–123. DOI: 10.21821/2309-5180-2016-8-1-108-123.
7. Kendlbacher C. The challenge of EU Stage 5 emissions - Are current injection systems sufficient for future large engine emission limits / C. Kendlbacher, M. Fenner, C. Barba, M. Bernhaupt, H. Giessauf, P. Haider // Ship & Offshore | Schiff&Hafen. — June 2016. — Special. — Pp. 74.
8. Senghaas C. Simplified High Performance Injection Systems for Dual-fuel Engines / C. Senghaas, M. Willmann, H. J. Koch // MTZ industrial. — 2016. — Vol. 6. — Is. 3. — Pp. 32–39. DOI: 10.1007/s40353-016-0024-4.
9. Zimmermann K. New Common Rail Injector and Engine Application Performances / K. Zimmermann, P. Ghorbani, R. Haefeli, M. Ganser // Ship & Offshore | Schiff&Hafen. — June 2016. — Special. — Pp. 90.
10. Wloka J. The new modular MAN Common-Rail System for future HFO-applications / J. Wloka, T. Klaua, W. Wagner, A. Weber, S. Kern, C. Friedrich, L. Eric, A. Hauschild, L. Maier // Ship & Offshore | Schiff&Hafen. — June 2016. — Special. — Pp. 13.
11. Петров А. П. Развитие электронных систем управления судовыми двигателями внутреннего сгорания / А. П. Петров, Г. Е. Живлюк // Вестник Государственного университета морского и речного флота имени адмирала С. О. Макарова. — 2015. — № 5 (33). — С. 152–169. DOI: 10.21821/2309-5180-2015-7-5-152-169.
12. Jay D. Development of CR technology in the last decade – 4 Stroke Wartsila engines / D. Jay, A. Järvi, D. Delneri, F. Cavressi, S. Saario // Ship & Offshore | Schiff&Hafen. — June 2016. — Special. — Pp. 12.

13. Mütther M. UDMZ's New DM-185 diesel engine family / M. Mütther // Ship & Offshore | Schiff&Hafen. — June 2016. — Special. — Pp. 4.
14. Развитие модельного ряда двигателей ПАО «Звезда» и ООО УДМЗ (материалы конгресса CIMAC 2016) // Двигателестроение. — 2016. — № 3. — С. 32–55.
15. Harscher S. The new MTU series 4000 with advanced technological concepts for EU Stage IIIB, EPA Tier 4 and IMO 3 emission legislations / S. Harscher // Ship & Offshore | Schiff&Hafen. — June 2016. — Special. — Pp. 4.
16. Jacoby P. Turbocharging system optimization for Kolomna D500 newly designed engine platform / P. Jacoby, M. Laaksonen, V. Ryzhov, V. Kneltz // Ship & Offshore | Schiff&Hafen. — June 2016. — Special. — Pp. 66.
17. Vervaeke L. Update on the extended engine portfolio of Anglo Belgian Corporation / L. Vervaeke // Ship & Offshore | Schiff&Hafen. — June 2016. — Special. — Pp. 10.
18. Fukui Y. Development of Low Fuel Consumption Technology for Medium Speed Diesel Engines / Y. Fukui, S. Hamaoka, Y. Takahata, P. Tremuli // Ship & Offshore | Schiff&Hafen. — June 2016. — Special. — Pp. 17.
19. Park T. HiMSEN Engine's solution for engine starting and low-load operation / T. Park, K. Kim, S. Cho, S. Kim // Ship & Offshore | Schiff&Hafen. — June 2016. — Special. — Pp. 53.
20. Ueda T. Development of Low Pressure Exhaust Gas Recirculation System for Exhaust Gas Emission Control of Mitsubishi UE Diesel Engine/ T. Ueda // Marine Engineering. — 2015. — Vol. 50. — No. 6. — Pp. 726–730. DOI: 10.5988/jime.50.726.
21. Kling W. The new ZVEZDA's multi-purpose high speed diesel engine family “PULSAR - M150” / W. Kling, S. Khilchenko, A. Arkhipov, A. Toth, C. Fuchs, M. Ronchetti, A. Ludu // Ship & Offshore | Schiff&Hafen. — June 2016. — Special. — Pp. 4.
22. Vejlggaard-Laursen M. Controlling Tier III technologies / M. Vejlggaard-Laursen, H. R. Olesen // Ship & Offshore | Schiff&Hafen. — June 2016. — Special. — Pp. 51.
23. Döring A. The MAN SCR system – more than just fulfilling IMO Tier III / A. Döring, M. Bugsch, J. Hetzer, I. Bader, D. Struckmeier, M. Baydak, R. Losher, G. Stiesch // Ship & Offshore | Schiff&Hafen. — June 2016. — Special. — Pp. 69.
24. Korpi H. Development of exhaust gas aftertreatment systems applied to modern high efficiency four-stroke medium-speed engines / H. Korpi, G. Hellén, L. O. Liavåg, A. D. Miceli // Ship & Offshore | Schiff&Hafen. — June 2016. — Special. — Pp. 68.
25. Issei O. New marine gas engine development in YANMAR / O. Issei, K. Nishida, K. Hirose // Ship & Offshore | Schiff&Hafen. — June 2016. — Special. — Pp. 36.
26. Kawase K. Development of the new DAIHATSU 2MW class dual-fuel engine for marine use / K. Kawase, T. Yamada, A. Okada // Ship & Offshore | Schiff&Hafen. — June 2016. — Special. — Pp. 36.
27. Sakai Y. This Operational experience and new development for high performance of Ka-wasaki Green Gas Engine / Y. Sakai, T. Sugimoto, T. Horie, H. Iwasaki, M. Enomoto, K. Fujihara // Ship & Offshore | Schiff&Hafen. — June 2016. — Special. — Pp. 64.
28. Nonaka Y. Development of Kawasaki Green Gas Engine for marine, L30KG series / Y. Nonaka, S. Fujihara, T. Hirayama // Ship & Offshore | Schiff&Hafen. — June 2016. — Special. — Pp. 71.
29. Kindt S. MAN B&W two-stroke engines latest design development within engine types, Tier III and multiple gas fuels / S. Kindt // Ship & Offshore | Schiff&Hafen. — June 2016. — Special. — Pp. 26.
30. Stojcevski T. Operation experience of world's first methanol engine in a ferry installation / T. Stojcevski, D. Jay // Ship & Offshore | Schiff&Hafen. — June 2016. — Special. — Pp. 10.
31. Tanaka H. Impacts of Minor Components on Knock Tendency of Methane-based Fuels / H. Tanaka, K. Kobayashi, T. Sako, K. Kuwahara, H. Kawanabe, T. Ishiyama // Ship & Offshore | Schiff&Hafen. — June 2016. — Special. — Pp. 84.

REFERENCES

1. Latuhov, S. V., V. A. Nikitin, V. N. Okunev, O. V. Soljakov, and P. G. Himich. *Problemy jekologicheskoy bezopasnosti sudohodstva: monografiya*. SPb., 2015.
2. Ivanchenko, A. A., A. P. Petrov, and G. E. Zhivljuk. “Energy efficiency of ships and regulation of greenhouse gas emissions.” *Vestnik Gosudar-stvennogo universiteta morskogo i rechnogo flota imeni admirala S. O. Makarova* 3(31) (2015): 103–112. DOI: 10.21821/2309-5180-2015-7-3-103-112.

3. Mel'nik, G. V. "Voprosy jekologii na kongresse CIMAC-2007." *Dvigatelsestroenie* 4 (2007): 45–50.
4. Kyrtatos, Nikolaos. "The 10-Year 'HERCULES' R&D Program on Marine Engines." *Marine Engineering* 47.3 (2012): 305–310. DOI: 10.5988/jime.47.305.
5. Kyrtatos, Nikolaos P. "From Hercules A-B-C to Hercules-2: Cutting Edge R&D in Ship Engines." *Transportation Research Procedia* 14 (2016): 1581–1590. DOI: 10.1016/j.trpro.2016.05.123.
6. Zhivlyuk, Gregory Evgenyevich, and Aleksandr Pavlovich Petrov. "Status and prospects of perfection of fuel supply system common rail." *Vestnik Gosudarstvennogo universiteta morskogo i rechnogo flota imeni admirala S. O. Makarova* 1(35) (2016): 108–123. DOI: 10.21821/2309-5180-2016-8-1-108-123.
7. Kendlbacher, C., M. Fenner, C. Barba, M. Bernhaupt, H. Giessauf, and P. Haider. "The challenge of EU Stage 5 emissions - Are current injection systems sufficient for future large engine emission limits." *Ship & Offshore | Schiff&Hafen Special* (2016): 74.
8. Senghaas, Clemens, Michael Willmann, and Hans-Joachim Koch. "Simplified High Performance Injection Systems for Dual-Fuel Engines." *MTZ industrial* 6.3 (2016): 32–39. DOI: 10.1007/s40353-016-0024-4
9. Zimmermann, K., P. Ghorbani, R. Haefeli, and M. Ganser. "New Common Rail Injector and Engine Application Performances." *Ship & Offshore | Schiff&Hafen Special* (2016): 90.
10. Wloka, J., T. Klaua, W. Wagner, A. Weber, S. Kern, C. Friedrich, L. Eric, A. Hauschild, and L. Maier. "The new modular MAN Common-Rail System for future HFO-applications." *Ship & Offshore | Schiff&Hafen Special* (2016): 13.
11. Petrov, A. P., and G. E Zhivlyuk. "Development of electronic control systems of internal combustion engines." *Vestnik Gosudarstvennogo universiteta morskogo i rechnogo flota imeni admirala S.O. Makarova* 5(33) (2015): 152–169. DOI: 10.21821/2309-5180-2015-7-5-152-169.
12. Jay, D., A. Järvi, D. Delneri, F. Cavressi, and S. Saario. "Development of CR technology in the last decade – 4 Stroke Wartsila engines." *Ship & Offshore | Schiff&Hafen Special* (2016): 12.
13. Muther, M. "UDMZ's New DM-185 diesel engine family." *Ship & Offshore | Schiff&Hafen Special* (2016): Pp. 4.
14. "Razvitie model'nogo rjada dvigatelej PAO «Zvezda» i OOO UDMZ (materialy kongressa CIMAC 2016)." *Dvigatelsestroenie* 3 (2016): 32–55.
15. Harscher, S. "The new MTU series 4000 with advanced technological concepts for EU Stage IIIB, EPA Tier 4 and IMO 3 emission legislations." *Ship & Offshore | Schiff&Hafen Special* (2016): Pp. 4.
16. Jacoby, P., M. Laaksonen, V. Ryzhov, and V. Kneltz. "Turbocharging system optimization for Kolomna D500 newly designed engine platform." *Ship & Offshore | Schiff&Hafen Special* (2016): Pp. 66.
17. Vervaeke, L. "Update on the extended engine portfolio of Anglo Belgian Corporation." *Ship & Offshore | Schiff&Hafen Special* (2016): 10.
18. Fukui, Y., S. Hamaoka, Y. Takahata, and P. Tremuli. "Development of Low Fuel Consumption Technology for Medium Speed Diesel Engines." *Ship & Offshore | Schiff&Hafen Special* (2016): 17.
19. Park, T., K. Kim, S. Cho, and S. Kim. "HiMSEN Engine's solution for engine starting and low-load operation." *Ship & Offshore | Schiff&Hafen Special* (2016): 53.
20. Ueda, Takashi. "Development of Low Pressure Exhaust Gas Recirculation System for Exhaust Gas Emission Control of Mitsubishi UE Diesel Engine." *Marine Engineering* 50.6 (2015): 726–730. DOI: 10.5988/jime.50.726.
21. Kling, Wolfgang, Sergey Khilchenko, Alexander Arkhipov, Attila Toth, Christian Fuchs, Michael Ronchetti, and Andrei Ludu. "The new ZVEZDA's multi-purpose high speed diesel engine family "PULSAR - M150"." *Ship & Offshore | Schiff&Hafen Special* (2016): 4.
22. Vejlggaard-Laursen, M., and H. R. Olesen. "Controlling Tier III technologies." *Ship & Offshore | Schiff&Hafen Special* (2016): 51.
23. Döring, A., M. Bugsch, J. Hetzer, I. Bader, D. Struckmeier, M. Baydak, R. Losher, and G. Stiesch. "The MAN SCR system – more than just fulfilling IMO Tier III." *Ship & Offshore | Schiff&Hafen Special* (2016): 69.
24. Korpi, H., G. Hellén, L. O. Liavåg, and A. D. Miceli. "Development of exhaust gas aftertreatment systems applied to modern high efficiency four-stroke medium-speed engines." *Ship & Offshore | Schiff&Hafen Special* (2016): 68.
25. Issei, O., K. Nishida, and K. Hirose. "New marine gas engine development in YANMAR." *Ship & Offshore | Schiff&Hafen Special* (2016): Pp. 36.
26. Kawase, K., T. Yamada, and A. Okada. "Development of the new DAIHATSU 2MW class dual-fuel engine for marine use." *Ship & Offshore | Schiff&Hafen Special* (2016): 36.

27. Sakai, Y., T. Sugimoto, T. Horie, H. Iwasaki, M. Enomoto, and K. Fujihara. "This Operational experience and new development for high performance of Ka-wasaki Green Gas Engine." *Ship & Offshore | Schiff&Hafen Special* (2016): 64.

28. Nonaka, Y., S. Fujihara, and T. Hirayama. "Development of Kawasaki Green Gas Engine for marine, L30KG series." *Ship & Offshore | Schiff&Hafen Special* (2016): 71.

29. Kindt, S. "MAN B&W two-stroke engines latest design development within engine types, Tier III and multiple gas fuels." *Ship & Offshore | Schiff&Hafen Special* (2016): 26.

30. Stojcevski, T., and D. Jay. "Operation experience of world's first methanol engine in a ferry installation." *Ship & Offshore | Schiff&Hafen Special* (2016): 10.

31. Tanaka, H., K. Kobayashi, T. Sako, K. Kuwahara, H. Kawanabe, and T. Ishiyama. "Impacts of Minor Components on Knock Tendency of Methane-based Fuels." *Ship & Offshore | Schiff&Hafen Special* (2016): 84.

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

Живлюк Григорий Евгеньевич —

кандидат технических наук, доцент

ФГБОУ ВО «ГУМРФ имени

адмирала С.О. Макарова»

198035, Российская Федерация, Санкт-Петербург,

ул. Двинская, 5/7

e-mail: spb-engine-prof@mail.ru, kaf_dvs@gumrf.ru

Петров Александр Павлович —

кандидат технических наук, доцент

ФГБОУ ВО «ГУМРФ имени

адмирала С.О. Макарова»

198035, Российская Федерация, Санкт-Петербург,

ул. Двинская, 5/7

e-mail: app.polab@inbox.ru, kaf_dvs@gumrf.ru

INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Zhivljuk, Grigorij E. —

PhD, associate professor

Admiral Makarov State University of Maritime

and Inland Shipping

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

Russian Federation

e-mail: spb-engine-prof@mail.ru, kaf_dvs@gumrf.ru

Petrov, Aleksandr P. —

PhD, associate professor

Admiral Makarov State University of Maritime

and Inland Shipping

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

Russian Federation

e-mail: app.polab@inbox.ru, kaf_dvs@gumrf.ru

Статья поступила в редакцию 6 апреля 2017 г.

Received: April 6, 2017.

DOI: 10.21821/2309-5180-2017-9-3-597-602

NUMERICAL SIMULATION OF TEMPERATURE FIELDS IN TENT-SHELTER FOR DRYING SHIP HULL PARTS

P. V. Yakovlev¹, I. S. Prosvirina²

¹Astrakhan State Technical University, Astrakhan, Russia Federation

² Astrakhan State University of Architecture and Civil Engineering,
Astrakhan, Russia Federation

The advantages of numerical simulation before the experimental measurements on the example of modeling the temperature fields in tent-shelter for drying marine metal parts. In the winter time at negative temperatures of external air painting and drying of the finished products is advantageously carried out in a specially equipped tent on the premises with an artificially maintained temperature, as the deviation from the recommended temperature regimes leads to uneven and slow drying of the paint. Most often the painted ship body parts have a complex geometrical form, therefore, under the given boundary conditions of the distribution pattern of temperature and flow speed can be obtained only by numerical methods. The aim of this work is to obtain a numerical model of the drying chamber with large painted detail on the platform of Solid Work. Adding in the numerical model boundary conditions to obtain the distribution of temperature and velocity of the fluid, and temperature of a solid body at any point. In the tent-shelter there is a complex heat transfer, which describes the boundary condition of the 3rd kind, and the air temperature sets the boundary conditions of the 1st kind, in the exhaust holes of the air is atmospheric pressure. The speed at the inlet is determined by the pressure loss in the air passage, in this regard, the border is set to the main characteristic of the fan. Control of the heating system by varying the temperature of the supply air and its flow. In combination with the feature of the geometric dimensions of the chamber and drying of the parts, all this inevitably affects the temperature distribution on the surface of the part. The use of numerical models allows to solve the problem of selection of heater for temporary shelter type tent with providing the required parameters of the workpiece surface, ensuring the quality of production shipyards.

Keywords: numerical model, temperature field, boundary conditions, velocity, fluid, heater.

For citation:

Yakovlev, Pavel V., and Irina S. Prosvirina. "Numerical simulation of temperature fields in tent-shelter for drying ship hull parts." *Vestnik Gosudarstvennogo universiteta morskogo i rechnogo flota imeni admirala S.O. Makarova* 9.3 (2017): 597–602. DOI: 10.21821/2309-5180-2017-9-3-597-602.

УДК 629.128

ЧИСЛЕННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ТЕМПЕРАТУРНЫХ ПОЛЕЙ В ШАТРОВОМ УКРЫТИИ ДЛЯ СУШКИ СУДОВЫХ КОРПУСНЫХ ДЕТАЛЕЙ

П. В. Яковлев¹, И. С. Просвирина²

¹ ФГБОУ ВО «Астраханский государственный технический университет»,
Астрахань, Россия

² ГАОУ АО ВО «Астраханский государственный архитектурно-строительный
университет», Астрахань, Россия

Рассмотрены преимущества численного моделирования перед экспериментальными измерениями на примере моделирования температурных полей в шатровом укрытии для сушки судовых металлических деталей. В зимнее время, при отрицательных температурах наружного воздуха, окрасочные работы и сушку готовых изделий целесообразно проводить в специально оборудованных тентовых помещениях с искусственно поддерживаемой температурой, так как отклонение от рекомендуемых температурных режимов приводит к неравномерному и медленному высыханию краски. Чаще всего окрашиваемые судовые корпусные детали имеют сложную геометрическую форму, поэтому при заданных граничных условиях картины распределения температурных и скоростных потоков можно получить только численными методами. Целью работы является получение численной модели сушильной камеры с крупногабаритной окрашенной деталью на платформе Solid Work. Добавив в численную модель граничные условия, можно

получить картины распределения температур и скорости текучей среды, а также температур твердого тела в любой точке. В шатровом укрытии присутствует сложный теплообмен, который описывается граничным условием 3-го рода, а температура воздуха задается граничными условиями 1-го рода, в выпускных отверстиях воздух имеет атмосферное давление. Скорость на входе определяется потерями давления в воздушном тракте, в связи с этим на границе задается главная характеристика вентилятора. Управление системой подогрева осуществляется изменением температуры подаваемого воздуха и его расходом. В сочетании с особенностью геометрических размеров камеры и высушиваемых деталей всё это неизбежно отражается на распределении температур на поверхности детали. Использование численной модели позволяет решить задачу подбора тепловентилятора для временного укрытия шатрового типа с обеспечением требуемых параметров поверхности детали, обеспечивая качество изготовления продукции судостроительных предприятий.

Ключевые слова: численная модель, температурные поля, граничные условия, скорость, текучая среда, тепловентилятор.

Для цитирования:

Яковлев П. В. Численное моделирование температурных полей в шатровом укрытии для сушки судовых корпусных деталей / П. В. Яковлев, И. С. Просвирина // Вестник Государственного университета морского и речного флота имени адмирала С. О. Макарова. — 2017. — Т. 9. — № 3. — С. 597–602. DOI: 10.21821/2309-5180-2017-9-3-597-602.

Введение

На судостроительных заводах в зимний период года, когда температура наружного воздуха опускается ниже 0 °С, технология сушки окрашенных судовых корпусных деталей затрудняется. Эта проблема решается размещением над сохнувшей конструкцией временного шатрового укрытия, которое не требует построения фундамента и занимает минимальное количество времени для установки. Положительная температура внутри шатра поддерживается тепловентилятором, расположенным снаружи и через нагнетательный патрубок подающим теплый воздух непосредственно в укрытие.

Численное моделирование

Зачастую окрашиваемые детали имеют сложную геометрическую форму, поэтому при заданных граничных условиях картины распределения температурных и скоростных потоков можно получить только численными методами. Методы численного моделирования представляют собой альтернативу экспериментальным измерениям и содержат реальные данные о геометрических характеристиках, свойствах материалов и граничных условиях объекта исследования [1]. Для численного решения практических задач, связанных с распределением температурных полей и течением воздуха, требуется, как правило, интегрирование системы нелинейных дифференциальных уравнений в частных производных по пространственным координатам и времени [2] – [4]. Исходными дифференциальными уравнениями в решении задачи формирования температурных полей в шатровом укрытии для сушки судовых корпусных деталей являются уравнение сохранения энергии, учитывающее свободную конвекцию, уравнение движения с гравитационной составляющей и уравнение неразрывности.

Исходные дифференциальные уравнения имеют вид [5]:

$$\frac{d\vec{w}}{d\tau} = -\vec{g}\beta\Delta t - \frac{1}{\rho}\nabla p + \nu \left(\frac{\partial^2 w_x}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 w_y}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 w_z}{\partial z^2} \right); \quad (1)$$

$$\frac{\partial w_x}{\partial x} + \frac{\partial w_y}{\partial y} + \frac{\partial w_z}{\partial z} = 0; \quad (2)$$

$$\frac{\partial t}{\partial \tau} + w_x \frac{\partial t}{\partial x} + w_y \frac{\partial t}{\partial y} + w_z \frac{\partial t}{\partial z} = a \left(\frac{\partial^2 t}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 t}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 t}{\partial z^2} \right), \quad (3)$$

где w — скорость, м/с; τ — время, с; g — ускорение свободного падения, м/с²; β — коэффициент объёмного расширения, К⁻¹; ν — коэффициент кинематической вязкости, м²/с; ρ — плотность, кг/м³; p — давление, Па; x, y, z — координаты, м; a — коэффициент температуропроводности, м²/с.

Система уравнений (1) – (3) дополняется условиями однозначности: начальными и граничными условиями.

Ввиду того, что поверхность тента имеет практически такую же температуру, что и наружный воздух, вблизи ограждающей конструкции возникает свободная конвекция, поднимающая теплые потоки внутреннего воздуха вверх. Нагрев воздуха происходит с помощью тепловентилятора, который создает в помещении вынужденную конвекцию. Таким образом, в шатровом укрытии присутствует сложный теплообмен, который можно описать граничным условием 3-го рода — заданием коэффициента теплопередачи с учетом теплопроводности материала тента, составляющего 15 Вт/(м²·К). Температура воздуха задается граничными условиями 1-го рода и составляет, по рекомендациям технологии сушки, 20 °С [6], в выпускных отверстиях воздух имеет атмосферное давление.

Скорость на входе определяется потерями давления в воздушном тракте, в связи с чем на границе может быть задана только главная характеристика самого вентилятора [7]. Главная характеристика осевого вентилятора ВО06-300 № 5 приведена на рис. 1.

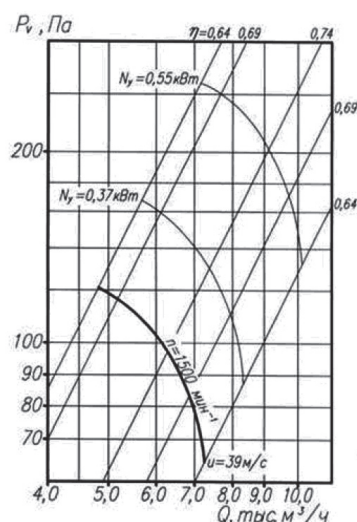


Рис. 1. Аэродинамические характеристики осевого вентилятора ВО06-300 № 5

Граничные условия поверхностей детали и стенок камеры принимаются исходя из условия равенства нулю скорости воздушного потока [8] – [10]. Один из вариантов численной модели при размерах шатрового укрытия 30×20×21,5 м и размерах окрашенной детали 24×14×10 м, исследованный в программе Solid Work, представлен на рис. 2.

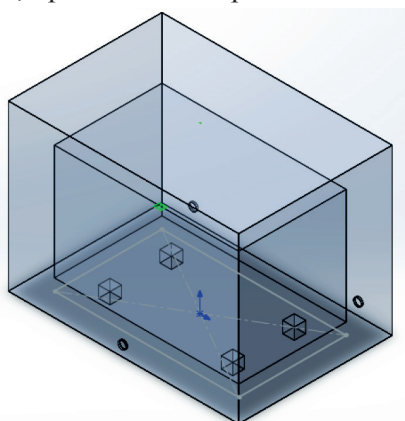


Рис. 2. Численная модель исследуемого объекта

Добавив в численную модель перечисленные граничные условия, можно получить картины распределения температур (рис. 3) и скорости текучей среды (рис. 4), а также температур твердого тела в любой точке (рис. 5).

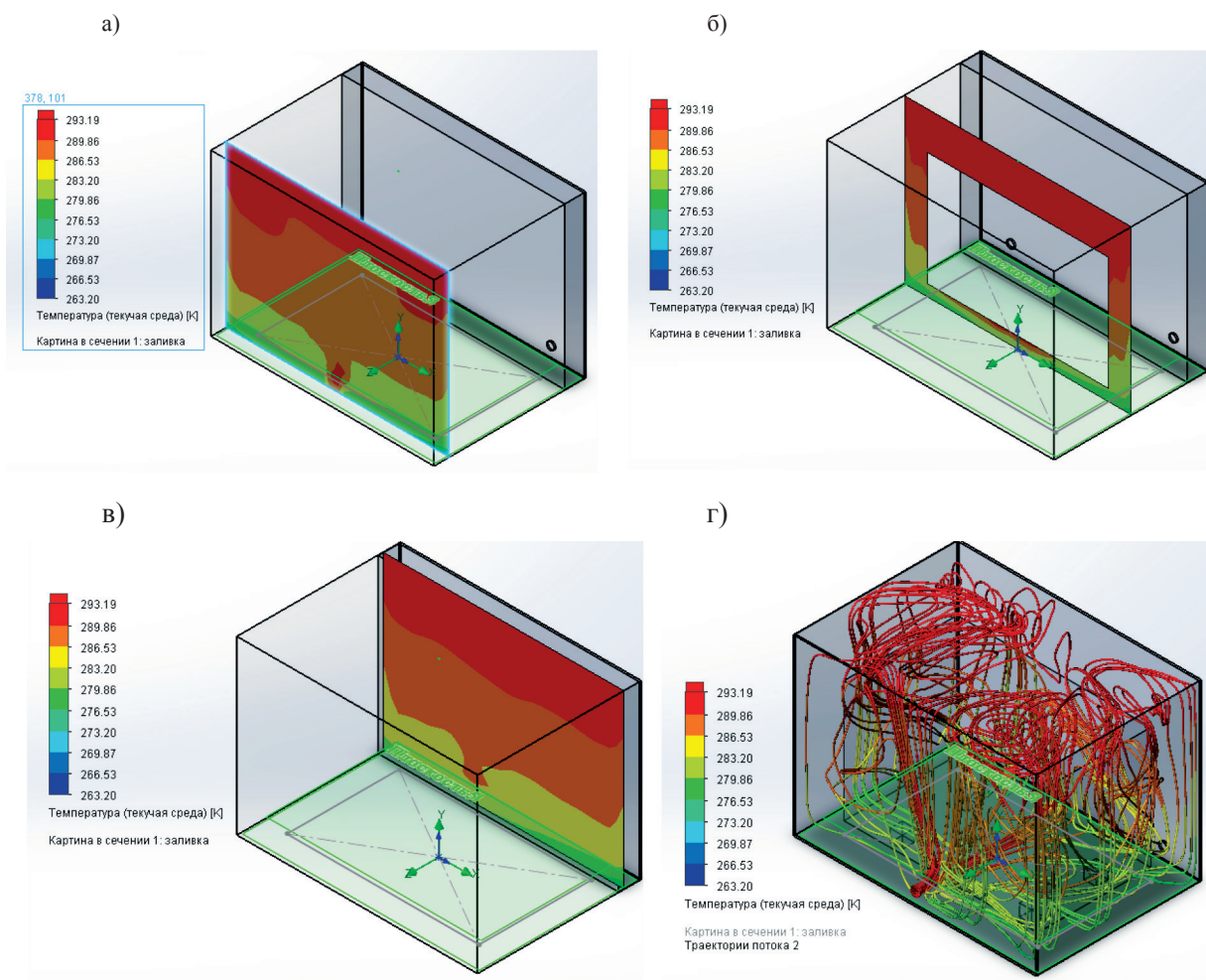


Рис. 3. Картины и траектории распределения температур текучей среды:

- а — поле температур в плоскости перед окрашенной деталью;
б — поле температур в районе мидельного сечения детали; в — поле температур за деталью;
г — линии тока с распределением температур в объеме камеры

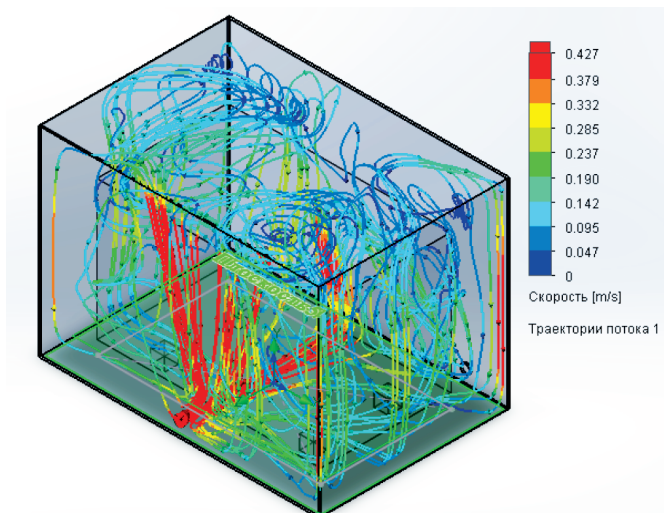


Рис. 4. Траектории движения и распределения скоростей воздуха в объеме камеры

Наиболее ценной является информация о температурных полях на поверхности высушиваемого лакокрасочного покрытия, так как основной целью камеры является обеспечение качества окраски. На рис. 5 представлены графики изменения температур передней, относительно места установки калорифера, и задней граней судокорпусной детали. Как видно из графиков, наиболее проблемной, с позиции неравномерности распределения температур, является передняя грань. В зоне подачи нагретого воздуха деталь перегревается, в нашем случае — почти на 4 °С.

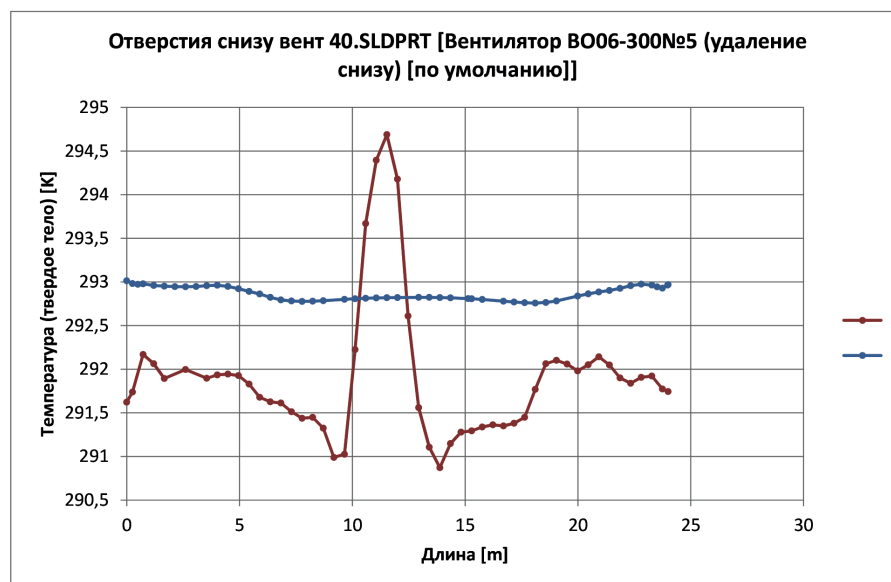


Рис. 5. Графики распределения температур по длине передней (красная) и задней (синяя) граней исследуемой детали

Учитывая разнообразие климатических условий, можно сказать, что количество подводимого в камеру тепла может изменяться в широком диапазоне. Управление системой подогрева осуществляется изменением температуры подаваемого воздуха и его расходом. В сочетании с особенностью геометрических размеров камеры и высушиваемых деталей всё это неизбежно отражается на распределении температур по поверхности детали.

Вывод

Использование численной модели позволяет решить задачу подбора калориферов для временного укрытия шатрового типа с обеспечением требуемых параметров поверхности детали, обеспечивая качество изготовления продукции судостроительных предприятий. Вместе с тем в судостроительной практике разработка моделей для значительного разнообразия геометрических, климатических и технологических условий нерациональна и затратна. В связи с этим представляется необходимой разработка упрощённых методик подбора параметров климатического оборудования для нужд судостроительных предприятий. Для решения этой задачи необходимо проведение исследований данной проблемы с последующим обобщением результатов с помощью теории подобия.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Ши Д. Численные методы в задачах теплообмена: пер. с англ / Д. Ши. — М.: Мир, 1988. — 544 с.
2. Лыков А. В. Тепломассообмен: справочник / А. В. Лыков. — М.: Энергия, 1978. — 480 с.
3. Пасконов В. М. Численное моделирование процессов тепло- и массообмена / В. М. Пасконов, В. П. Полежаев, Л. А. Чудов. — М.: Наука, 1984. — 288 с.
4. Самарский А. А. Введение в численные методы / А. А. Самарский. — М.: Наука, 1982. — с. 269.
5. Патанкар С. Численные методы решения задач теплообмена и механики жидкости / С. Патанкар: пер. с англ. под ред. Е. Д. Виленского. — М.: Энергоатомиздат, 1984. — 152 с.

6. Судовые краски, краска для судов. [Электронный ресурс]. — Режим доступа: spesc-emal.ru (дата обращения — 20.12.2016).
7. Вентиляторы осевые низкого давления — ООО «Партнер» [док. внутреннего пользования]. — Пермь: ООО «Партнер», 2010. — 6 с.
8. Коптев А. В. Теоретическое исследование обтекания цилиндра потоком идеальной несжимаемой среды при наличии экранирующего эффекта / А. В. Коптев // Вестник Государственного университета морского и речного флота имени адмирала С. О. Макарова. — 2016. — № 2 (36). — С. 127–137. DOI: 10.21821/2309-5180-2016-8-2-127-137.
9. Яковлева А. П. Моделирование ветровой защиты морских нефтяных платформ / А. П. Яковлева, П. В. Яковлев // Вестник Астраханского государственного технического университета. Серия: Морская техника и технология. — 2013. — № 2. — С. 67–71.
10. Мартюшев С. Г. Численный анализ сопряженной термогравитационной конвекции и теплового поверхностного излучения в замкнутом кубе, заполненном диатермичной средой / С. Г. Мартюшев, И. В. Мирошниченко, М. А. Шерemet // Вестник Удмуртского университета. Математика. Механика. Компьютерные науки. — 2014. — № 2. — С. 111–120.

REFERENCES

1. Shi, D. *Chislennyye metody v zadachakh teploobmena: per. s angl.* M.: Mir, 1988.
2. Lykov, A. B. *Teplomassoobmen: Spravochnik.* M.: Energiya, 1978.
3. Paskonov, V. M., V. P. Polezhaev, and L. A. Chudov. *Chislennoe modelirovanie protsessov teplo- i massoobmena.* M.: Nauka, 1984.
4. Samarskii, A. A. *Vvedenie v chislennyye metody.* M.: Nauka, 1982.
5. Patankar, S. *Chislennyye metody resheniya zadach teploobmena i mekhaniki zhidkosti.* Edited by E. D. Vilenski. M.: Energoatomizdat, 1984.
6. Sudovye kraski, kraska dlya sudov. Web. 20 Dec. 2016 <spec-emal.ru>.
7. *Ventilyatory osevye nizkogo davleniya* — ООО «Partner». Perm': ООО «Partner», 2010.
8. Koptev, Aleksandr Vladimirovich. "Theoretical research of the flow around cylinder of an ideal incompressible medium in the presence of a shielding effect." *Vestnik Gosudarstvennogo universiteta morskogo i rechnogo flota imeni admirala S. O. Makarova* 2(36) (2016): 127–137. DOI: 10.21821/2309-5180-2016-8-2-127-137.
9. Yakovleva, Anna Pavlovna, and Pavel Victorovich Yakovlev. "Simulation of wind protection of marine oil platforms." *Vestnik of Astrakhan State Technical University. Series: Marine Engineering and Technologies* 2 (2013): 67–71.
10. Martyshev, Semen Grigor'evich, Igor' Valer'evich Miroshnichenko, and Mikhail Aleksandrovich Sheremet. "Numerical analysis of conjugate natural convection and thermal surface radiation in a cube filled with diathermanous medium." *The Bulletin of Udmurt University. Mathematics. Mechanics. Computer Science* 2 (2014): 111–120.

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

Яковлев Павел Викторович —
доктор технических наук, профессор
ФГБОУ ВО «Астраханский государственный
технический университет»
414056, Российская Федерация, г. Астрахань,
ул. Татищева, 16
e-mail: zvs01jak@rambler.ru

Просвирина Ирина Сергеевна —
старший преподаватель
ГАОУ АО ВО «Астраханский государственный
архитектурно-строительный университет»
414056, Российская Федерация, г. Астрахань,
ул. Татищева, 18
e-mail: lsp15@yandex.ru

INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Yakovlev, Pavel V. —
Dr. of Technical Sciences, professor
Astrakhan State Technical University
16 Tatishcheva Str., Astrakhan, 414056,
Russian Federation
e-mail: zvs01jak@rambler.ru

Prosvirina, Irina S. —
Senior lecturer
Astrakhan State University of Architecture
and Civil Engineering
18 Tatishcheva Str., Astrakhan, 414056,
Russian Federation
e-mail: lsp15@yandex.ru

Статья поступила в редакцию 16 марта 2017 г.

Received: March 16, 2017.

DOI: 10.21821/2309-5180-2017-9-3-603-611

EXPERIMENTAL RATIONALE FOR THE ELECTION SIZE OF THE FINITE ELEMENT IN THE CALCULATION OF THE PISTON CROWNS

I. I. Kuleshov, V. M. Khodakovskiy

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

At present, the finite element method is widely used to determine the strength properties of a part to determine the stress-strain state of piston heads of small-turn diesel engines at the design stage. An important step in determining the stress-strain state of the detail is to choose the size of the largest side of the finite element. It is known that the size of the finite element affects the final result of the calculation. The analysis of works devoted to the finite element method showed that the choice of the size of the finite element is in the individual selection of the size. However, it remains unknown how reliable the data will be. In this paper, the experimental substantiation of the choice of the most acceptable size of finite element in determining the stress-strain state by the example of the piston head of the ship type L35MC was carried out. It has been practically established that during the action of the temperature field on the piston head with the bottom of the ship, the shape of the working surfaces of the piston grooves changes. Values of deformations of the piston grooves of the piston head are determined. On the basis of the experiment, a simulation of the stress-strain state of the piston head was performed using the parameters corresponding to the experimental conditions as boundary conditions. It is determined that when the model is divided, an error ε occurs, the permissible value of which is 10%. A regularity is derived in the form of an expression that allows us to determine the most acceptable size of the finite element for calculating the heads of pistons with a flat bottom. It is established that the shape of the change in the shape of the upper and lower working surfaces of the piston grooves has the form of conicity. The small contact area of the working surfaces of the groove and the ring is caused by the tilting moment in the cross-section of the ring from the action of the working pressure, which, in a compartment with the conicity of the groove from the action of thermal expansion, leads to considerable specific pressures both on the contacting area of the groove and the ring. Due to a violation of the mutual arrangement of the contact surfaces of the groove and the ring, they will be subject to increased wear.

Keywords: finite elements method, piston crown of the low speed propulsion marine diesel engine, the error in the discretization of the model, the conicity of the working surfaces of the piston grooves, the modeling of the strained state, the size of the finite element, flat bottom piston, the tipping moment, the height of the piston groove, thermal expansion.

For citation:

Kuleshov, Igor I., and Vladimir M. Khodakovskiy. "Experimental rationale for the election size of the finite element in the calculation of the piston crowns." *Vestnik Gosudarstvennogo universiteta morskogo i rechnogo flota imeni admirala S.O. Makarova* 9.3 (2017): 603–611. DOI: 10.21821/2309-5180-2017-9-3-603-611.

УДК 621.431.74:621.431.3

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ОБОСНОВАНИЕ ВЫБОРА РАЗМЕРА КОНЕЧНОГО ЭЛЕМЕНТА ПРИ РАСЧЁТЕ ГОЛОВОК ПОРШНЕЙ

И. И. Кулешов, В. М. Ходаковский

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

В настоящее время для определения напряжённо-деформированного состояния головок поршней судовых малооборотных дизелей на стадии проектирования широко используется метод конечных элементов как способ определения прочностных свойств детали. Известно, что размер конечного элемента влияет на результат расчёта. Анализ работ, посвящённых методу конечных элементов, показал, что выбор размера конечного элемента заключается в индивидуальном подборе размера. Однако остаётся неизвестным, насколько будут достоверными полученные данные. В данной работе выполнено экспериментальное обоснование выбора наиболее приемлемого размера конечного элемента при определении

напряжённно-деформированного состояния на примере головки поршня судового малооборотного дизеля типа L35MC. Практически установлено, что в процессе воздействия на головку поршня с опёртым днищем судового малооборотного дизеля температурного поля происходит изменение формы рабочих поверхностей поршневых канавок. Определены значения деформаций поршневых канавок головки поршня. На основе эксперимента проведено моделирование напряжённно-деформированного состояния головки поршня с применением в качестве граничных условий параметров, соответствующих экспериментальным. Определено, что при разбиении модели возникает погрешность ϵ , допустимое значение которой составляет 10 %. Выведена закономерность в виде выражения, которое позволяет определить наиболее приемлемый размер конечного элемента для расчёта головок поршней с опёртым днищем. Установлено, что характер изменения формы верхней и нижней рабочих поверхностей поршневых канавок имеет форму конусообразности. Малая площадь контактирования рабочих поверхностей канавки и кольца вызвана опрокидывающим моментом в сечении кольца от действия рабочего давления, что вкупе с конусообразностью канавки от действия тепловых расширений приводит к значительным удельным давлениям как на контактирующую площадь канавки, так и кольца. Вследствие нарушения взаимного расположения контактирующих поверхностей канавки и кольца, они будут подвержены повышенному износу.

Ключевые слова: метод конечных элементов, головка поршня, судовый малооборотный дизель, погрешность дискретизации модели, конусообразность поршневых канавок, моделирование напряжённно-деформированного состояния, размер конечного элемента, поршень с опёртым днищем, опрокидывающий момент, изменение высоты канавки, тепловое расширение.

Для цитирования:

Кулешов И. И. Экспериментальное обоснование выбора размера конечного элемента при расчёте головок поршней / И. И. Кулешов, В. М. Ходаковский // Вестник Государственного университета морского и речного флота имени адмирала С. О. Макарова. — 2017. — Т. 9. — № 3. — С. 603–611. DOI: 10.21821/2309-5180-2017-9-3-603-611.

Введение

Важным этапом конструирования судовых малооборотных дизелей (МОД) является расчёт головки поршня. Существующие методики расчёта головок поршней [1] – [3] рассматривают расчёт головки поршня как расчет упрощённой системы, находящейся на опорах и испытывающей рабочее давление. Методы расчёта поршней, приводимые в работах [4] и [5], позволяют произвести тепловой расчёт головок поршней. Однако данный расчёт сводится к определению общих тепловых деформаций. Данные методики позволяют определить напряжённно-деформированное состояние (НДС) головки поршня от действия либо механических нагрузок, либо тепловых. Расчёт прочностных характеристик поршня в зависимости от механического воздействия рабочего давления позволяет определять наиболее нагруженные места и вносить необходимые поправки на стадии проектирования детали. Тепловой расчёт позволяет определить теплопроводность головки, а также объёмные расширения головки в целом, вызванные воздействием теплового поля. Классические методики расчёта сводятся к приведению головки поршня к упрощённой форме и расчету основных её элементов, таких как днище, жаровый пояс, канавки. Однако в процессе выполнения расчёта с использованием данного подхода может возникнуть трудность при определении величины деформации перемычки поршневой канавки от действия рабочего давления в совокупности с воздействием теплового поля.

Для выполнения комплексного расчёта, а именно расчёта напряжённно-деформированного состояния (НДС) головок поршней от действия тепловых и механических нагрузок, может быть использован метод конечных элементов (МКЭ). Данный метод позволяет производить расчёт деталей любой сложности, также используя данный метод, можно строить различные схемы нагружения в зависимости от выбора граничных условий. МКЭ, применённый для расчёта деформаций головки поршня МОД, позволяет учесть влияние комплексной системы нагружения на НДС поршня в целом и отдельных его элементов в частности. Анализируя работы, посвящённые расчёту МКЭ [6] – [10], можно заключить, что при выполнении определения НДС рассчитываемых деталей конечный результат будет зависеть от размера конечного элемента (КЭ). Однако в этих работах нет чётких рекомендаций по выбору наиболее приемлемого размера КЭ. Имеющаяся информация сво-

дится к тому, что, чем меньше размер КЭ, тем точнее будет выполнен расчёт. Но будет ли данный расчёт согласован с действительным НДС детали в натуре, остаётся неопределённым до стадии изготовления опытного образца.

Методы и материалы

Целью данной работы являлось определение наиболее приемлемого размера КЭ при расчёте головок поршней судового МОД. Выбор размера КЭ выполнялся на основе данных, полученных в ходе эксперимента. Исследование проводилось в два этапа:

- проведение эксперимента, определение контролируемых параметров;
- компьютерное моделирование на основе экспериментальных данных.

Существуют различные варианты исполнения головок поршней судовых МОД. Из них можно выделить головки с опёртым (KZ, MC, LMC) и неопёртым днищем (головки поршней МОД типа VTBF) [3], а также головки с глухими сверлениями (головки поршней МОД типа RLA, RLB, RTA). Исследования выполнялись применительно к головке поршня судовых МОД серии L35MC с опёртым днищем как наиболее распространённой для современных длинноходовых МОД (рис. 1).

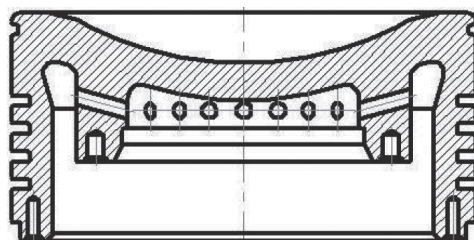


Рис. 1. Конструкция головки поршня МОД типа L35MC

Экспериментальная часть исследования заключалась в следующем. Головка поршня судового МОД типа L35MC нагревалась до достижения днищем головки температуры 380 °С, затем включалось воздушное охлаждение. Температура охлаждающего воздуха составляла 20 °С. В таком режиме головка поршня выдерживалась в течение 30 мин, до установления постоянного температурного поля, распределённого по головке поршня. После достижения установившегося режима выполнялись замеры величин высоты канавок, которые определялись как сумма концевой меры высоты (8 мм по ГОСТ 9038-90) и зазора между мерой и поршневой канавкой. Зазор между мерой и канавкой контролировался с использованием набора пластинчатых щупов (ГОСТ 882-75). Схема установки приведена на рис. 2. Установившийся режим характеризуется постоянным распределением температурного поля по головке поршня. Температуры установившегося режима головки поршня приведены на рис. 3. Схема выполнения обмеров приведена на рис. 4.

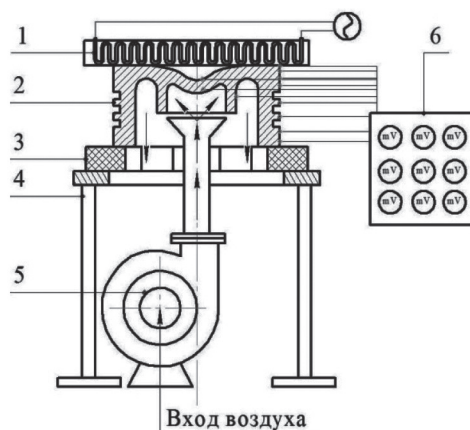


Рис. 2. Схема экспериментальной установки:

- 1 — нагревательный элемент; 2 — головка поршня; 3 — секция легковесного шамотного кирпича; 4 — металлическая стойка; 5 — воздуходувка; 6 — блок термопар (тип L (х/к) ГОСТ Р. 8.585-2001)

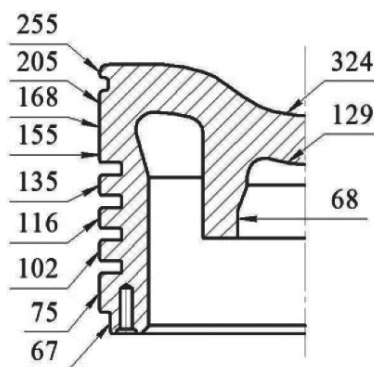


Рис. 3. Распределение температуры (°C) по головке поршня в ходе эксперимента

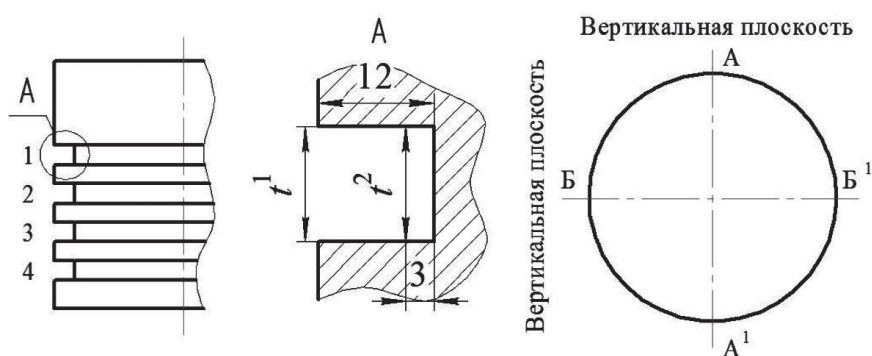


Рис. 4. Схема выполнения замеров

В процессе работы контролировалось изменение высоты канавки в двух сечениях в соответствии с рис. 4. Следует отметить, что головка поршня является цилиндрической симметричной деталью, и в процессе нагрева она будет иметь равное объемное расширение в противоположных сечениях. Следовательно, величины зазоров во взаимно перпендикулярных плоскостях будут равны. Исходя из этого, в работе приведены обмеры канавок в одной плоскости в одном сечении. Результаты обмеров приведены в табл. 1. Номинальная высота канавки составляет 8,25 мм [11].

Таблица 1

Результаты обмеров высоты канавки

Номер канавки	Сечение А ¹	
	t^1 , мм	t^2 , мм
1	8,21	8,23
2	8,23	8,24
3	8,24	8,25
4	8,24	8,25

Выполненный эксперимент позволил установить следующее:

- зависимость характера деформации поршневых канавок от действия температурного поля;
- зависимость величины деформаций головки поршня от действия температурного поля.

Результаты

В ходе эксперимента определено, что под воздействием температурного поля на головку поршня поршневые канавки, вследствие температурных расширений, приобретают деформацию,

имеющую некоторую конусообразность. Происходит своего рода «закрытие» канавок, т. е. высота канавки уменьшается от основания к периферии головки поршня. Вид деформированной канавки показан на рис. 5. Важно отметить, что верхняя поверхность первой поршневой канавки приобретает большее значение теплового расширения, чем нижняя, вследствие того, что высота жарового пояса больше, чем высота перемычки между канавками. Соответственно было определено, что при проведении эксперимента высота первой поршневой канавки на периферии головки (t^1) уменьшилась на 0,04 мм. Величина перемещения верхней поверхности первой поршневой канавки составила 0,025 мм.

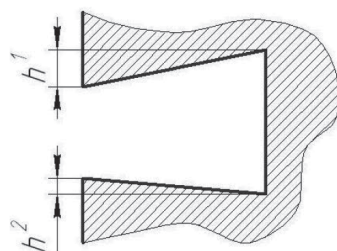


Рис. 5. Форма поршневой канавки в процессе теплового расширения:
 h^1 — величина деформации верхней поверхности поршневой канавки;
 h^2 — величина деформации нижней поверхности поршневой канавки

С целью подбора размера КЭ было проведено компьютерное моделирование НДС головки поршня, которое выполнялось с установлением в качестве граничных условий параметров, соответствующих практическому эксперименту (рис. 6). Моделирование выполнялось с использованием программного комплекса (ПО SolidWorks 2016. Лицензия № 9710-0044-1186-4231, правообладатель ФГБОУ ВО МГУ им. адм. Г. И. Невельского). После установления граничных условий производилась разбивка модели на сетку КЭ с целью подбора размера КЭ, при котором контролируемые деформации (в рассматриваемой случае — перемещения (δ) крайней точки верхней поверхности первой поршневой канавки) модели будут соответствовать полученным в ходе эксперимента данным. Разбивка модели на данном этапе выполнялась с изменением размера КЭ от 2 до 30 мм. Результаты моделирования приведены в табл. 2.

Таблица 2

Параметры разбиения модели

Размер КЭ, h , мм	2	3	3,5	4	6	10	15	20	30	40
Перемещения δ , мм	0,014	0,020	0,024	0,028	0,042	0,064	0,821	0,110	0,118	0,211

Используя полученные в табл. 2 данные, авторы построили график зависимости перемещений (δ) от размера КЭ (h), который приведён на рис. 6.



Рис. 6. График зависимости перемещений (δ) от размера КЭ (h)

Анализируя график (рис. 6), авторы установили, что зависимость рассматриваемых перемещений (δ) от размера КЭ (h) носит линейный характер, так как точки расположены вокруг прямой. Отклонение от прямой связано с погрешностью при дискретизации модели [8]. Данную погрешность (ϵ) можно определить как относительную погрешность по формуле

$$\epsilon = \frac{\delta_h - \delta_t}{\delta_t}, \quad (1)$$

где h — размер конечного элемента; t — толщина наиболее значимого при расчёте элемента детали.

Рассчитанные значения погрешности при увеличении размера КЭ приведены на графике (рис. 7).

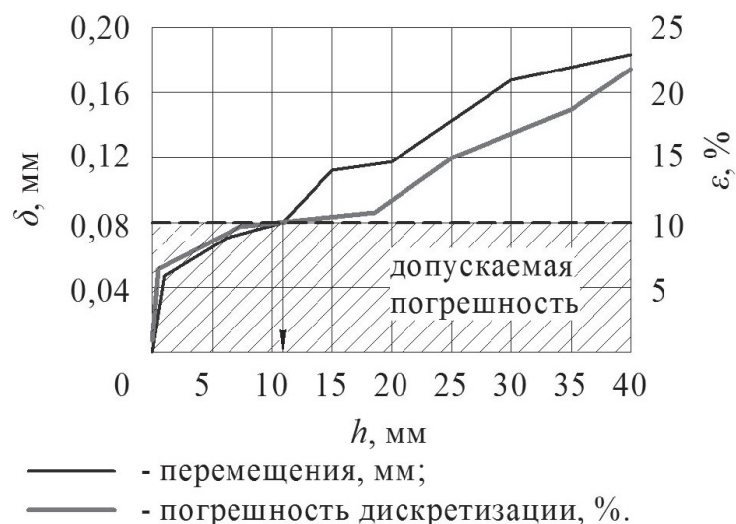


Рис. 7. График зависимости перемещений (δ) и погрешности (ϵ) размера КЭ (h)

Как видно из графика на рис. 7, величина погрешности с увеличением размера КЭ по отношению к величине возникающих перемещений возрастает соответственно. При определении величины погрешности (рис. 7) определена допускаемая погрешность в размере 10 %.

Обсуждение

В ходе эксперимента определены величины и характер деформации поршневых канавок (рис. 5). В работах [12] и [13] установлено, что в процессе работы от действия рабочего давления поршневое кольцо приобретает опрокидывающий момент в сечении. В результате значительно уменьшается площадь контактирующих площадей, что приводит к значительным величинам удельного давления на поверхность поршневой канавки.

Установлено, что деформация верхней поверхности первой поршневой канавки составила 0,025 мм. После этого было выполнено моделирование эксперимента с использованием программного комплекса, в ходе которого выполнялся индивидуальный подбор размера КЭ с целью установления значения перемещения (δ), которое наиболее соответствовало бы значению, определённое в ходе эксперимента. В результате определено, что размер КЭ, позволяющий наиболее приблизить смоделированное НДС головки поршня к экспериментальному, составляет 3,5 мм. Контролируемая деформация верхней поверхности первой поршневой канавки, полученная в ходе эксперимента, составила 0,025 мм, а перемещение (δ), полученное в ходе разбиения, составило 0,024 мм. Разница в результатах обосновывается погрешностью при дискретизации модели (ϵ) на сетку КЭ. При этом допустимая погрешность составляет 10 %, а полученная погрешность — 6 %. Следовательно, размер КЭ выбран правильно.

Важно отметить, что дальнейшее увеличение размера КЭ ведёт к тому, что перемещения, возникающие в модели, значительно превышают значения, полученные в ходе эксперимента

(табл. 2, $h = 4 \dots 40$ мм). Это обосновывается тем, что будет превышена допустимая погрешность при дискретизации модели. Следовательно, расчёт будет заведомо некорректен. В работе [8] приводится информация, что уменьшение размера КЭ до бесконечно малого значения ведёт к наиболее точному решению системы, однако при этом будет значительно увеличено время решения задачи. В ходе выполнения данной работы определено, что уменьшение размера КЭ ниже установленного значения ведёт к уменьшению контролируемого перемещения, что отдаляет результат от практически полученного значения.

В работах [6] – [8] описывается, что при выполнении расчётов МКЭ в качестве размера КЭ должен быть принят размер, сопоставимый с наименьшим размером рассматриваемой части модели. Также в работе [3] отмечено, что при выполнении расчётов головок поршней рекомендуется в качестве размера КЭ принимать величину, равную трети значимого при расчёте размера элемента детали.

При выполнении расчётов головок поршней конструктивным элементом, имеющим значимость, являются поршневые канавки. Ширина поршневой канавки для рассматриваемой в работе головки поршня судового МОД типа L35MC составляет 12 мм. Используя полученные данные, можно вывести закономерность для определения наиболее приемлемого размера КЭ, имеющую вид

$$h = \frac{H}{3} - \frac{H}{3} \cdot \varepsilon, \quad (2)$$

где h — размер стороны КЭ, мм; H — размер значимого элемента объекта расчёта, мм; ε — допустимая погрешность дискретизации модели.

В качестве приемлемого размера КЭ принят параметр, равный 3,6 мм.

На основании выведенной закономерности было выполнено повторное разбиение модели при установлении размера КЭ, равного 3,6 мм. В ходе данного разбиения величина перемещения δ составила 0,0252 мм. Данное значение не превысило допустимой погрешности ($\varepsilon = 5,7\%$), но уменьшило её. Следовательно, выражение (2) справедливо и может быть применено в качестве характеристики, наиболее точно определяющей размер КЭ при выполнении расчёта НДС головок поршней с опёртым днищем.

Заключение

В ходе практического эксперимента установлено, что в процессе воздействия на головку поршня с опёртым днищем судового МОД температурного поля происходит изменение формы рабочих поверхностей поршневых канавок. Определены значения деформаций поршневых канавок рассматриваемой головки поршня. На основе эксперимента проведено моделирование НДС головки поршня с применением в качестве граничных условий параметров, соответствующих экспериментальным. В ходе эксперимента определено, что при разбиении модели возникает погрешность ε , допустимое значение которой составляет 10 %.

Выведена закономерность (2), которая позволяет определить наиболее приемлемый размер КЭ для расчёта головок поршней с опёртым днищем. Установлено, что характер изменения формы верхней и нижней рабочих поверхностей поршневых канавок имеет форму конусообразности. Малая площадь контактирования рабочих поверхностей канавки и кольца вызвана опрокидывающим моментом в сечении кольца от действия рабочего давления, что вкупе с конусообразностью канавки от действия тепловых расширений приводит к значительным удельным давлениям как на контактирующую площадь канавки, так и кольца. Вследствие нарушения взаимного расположения контактирующих поверхностей канавки и кольца они будут подвержены повышенному износу.

Приведённый в работе метод определения размера КЭ был применён к головке поршня, представляющей собой конструкцию поршня с опёртым днищем. Существуют также конструкции поршней с неопёртым днищем и с глухими сверлениями. Для определения НДС головок поршней других конструкций требуются дальнейшие исследования.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Орлин А. С. Двигатели внутреннего сгорания / А. С. Орлин [и др.]. — М.: Машгиз, 1957. — Т. 1: Рабочие процессы в двигателях и их агрегатах. — 396 с.
2. Ваншейдт В. А. Конструирование и расчёты прочности судовых дизелей / В. А. Ваншейдт. — Л.: Судостроение, 1969. — 600 с.
3. Дьяченко Н. Х. Конструирование и расчёт двигателей внутреннего сгорания: учебник / Н. Х. Дьяченко, Б. А. Харитонов, В. М. Петров [и др.]; под ред. Н. Х. Дьяченко. — Л.: Машиностроение, 1979. — 392 с.
4. Овсянников М. К. Тепловая напряжённость судовых дизелей / М. К. Овсянников, Г. А. Давыдов. — Л.: Судостроение, 1975. — 260 с.
5. Танатар Д. Б. Дизели. Компонировка и расчёт / Д. Б. Танатар. — Л.: Морской транспорт, 1956. — 440 с.
6. Лагереv И. А. Влияние размера конечного элемента на точность статического расчёта несущей металлоконструкции мостового крана / И. А. Лагереv // Наука и современность. — 2014. — № 32-2. — С. 36–40.
7. Лагереv И. А. Расчёты грузоподъёмных машин методом конечных элементов: монография / И. А. Лагереv. — Брянск: Изд-во БГТУ, 2013. — 116 с.
8. Петров М. В. Определение оптимального размера конечного элемента. [Электронный ресурс] / М. В. Петров. — Режим доступа: <http://cae-cube.ru/opredeleniye-optimalnogo-razmera-konechnogo-elementa.html> (дата обращения: 10.12.2016).
9. Луцин Л. П. Метод конечных элементов в задачах динамики свободных конструкций / Л. П. Луцин, А. В. Шаранюк // Учёные записки ЦАГИ. — 2000. — Т. 31. — № 3–4.
10. Земцова О. Г. Метод конечных элементов в современных иностранных книгах / О. Г. Земцова, А. И. Шеин, О. В. Волкова // Современные научные исследования и инновации. — 2015. — № 3–1 (47). — С. 129–132.
11. УР 31-452-648-84. Технические условия на ремонт (Дизели типа ДКРН 35/105).
12. Загайко С. А. Имитационное моделирование изнашивания поршневого кольца двигателя внутреннего сгорания / С. А. Загайко // Вестник Уфимского государственного авиационного технического университета. — 2008. — Т. 11. — № 2. — С. 84–89.
13. Борисов А. О. Моделирование изнашивания поршневого кольца двигателей внутреннего сгорания / А. О. Борисов, С. А. Загайко // Ползуновский вестник. — 2006. — № 4–1. — С. 27–31.

REFERENCES

1. Orlin, Andrew S., D. N. Vyruhov, and G. G. Kalisz. *Dvigateli vnutrennego sgoraniya*. Vol. 1. M.: Mashgiz, 1957.
2. Vansheydt, V. A. *Konstruirovaniye i raschjot dvigatelej vnutrennego sgoraniya*. L.: Sudostroenie, 1969.
3. D'yachenko, N. Kh., B. A. Kharitonov, V. M. Petrov, et al. *Konstruirovaniye i raschet dvigatelei vnutrennego sgoraniya: uchebnik dlya vuzov*. Edited by N. Kh. D'yachenko. L.: Mashinostroenie. Leningr. otd-nie, 1979.
4. Ovsjannikov, Mikhail Konstantinovich, and Davydov German Aleksandrovich. *Teplovaja naprjazhennost' sudovyh dizelej*. L.: Sudostroenie, 1975.
5. Tanatar, D. B. *Dizeli. Komponovka i raschet*. L.: Morskoi trasnport, 1956.
6. Lagerev, I. A. "Vlijanie razmera konechnogo jelementa na tochnost' staticheskogo rascheta nesushhej metallokonstrukcii mostovogo kрана." *Nauka i sovremennost'* 32-2 (2014): 36–40.
7. Lagerev, I. A. *Raschety gruzopod'emnyh mashin metodom konechnykh jelementov: monografija*. Brjansk: Izd-vo BGTU, 2013.
8. Petrov, M. V. Opredelenie optimal'nogo razmera konechnogo jelementa. Web. 10 Dec. 2016 <<http://cae-cube.ru/opredeleniye-optimalnogo-razmera-konechnogo-elementa.html>>.
9. Lushhin, L. P., and A. V. Sharanjuk. "Metod konechnykh jelementov v zadachah dinamiki svobodnykh konstrukcij." *Uchjonye zapiski CAGI* 31.3-4 (2000).
10. Zemtsova, Olga Grigorevna, Alexander Ivanovich Shein, and Olga Vladimirovna Volkova. "The Finite Element Method in modern foreign books." *Modern scientific researches and innovations* 3-1(47) (2015): 129–132.
11. UR 31-452-648-84. Tehnicheskie uslovija na remont (Dizeli tipa DKRN 35/105).

12. Zagayko, S. A. "Simulation of internal combustion engine piston ring wear process." *Vestnik Ufimskogo gosudarstvennogo aviacionnogo tehničeskogo universiteta* 11.2 (2008): 84–89.

13. Borisov, A. O., and S. A. Zagajko. "Modelirovanie iznashivaniya porshneвого kol'ca dvigatelej vnutrennego sgoraniya." *Polzunovskij vestnik* 4-1 (2006): 27–31.

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

Кулешов Игорь Игоревич — аспирант
Научный руководитель:
Ходаковский Владимир Михайлович
Морской государственный университет
имени адмирала Г. И. Невельского
690003, Российская Федерация, г. Владивосток, ул.
Верхнепортовая, д. 50 а
e-mail: igor-igorevich.2011@bk.ru
Ходаковский Владимир Михайлович —
кандидат технических наук, доцент
Морской государственный университет
имени адмирала Г. И. Невельского
690003, Российская Федерация, г. Владивосток, ул.
Верхнепортовая, д. 50 а
e-mail: khodprim@mail.ru

INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Kuleshov, Igor I. — Postgraduate
Supervisor:
Khodakovskiy, Vladimir M.
Maritime State University named
after admiral G.I. Nevelskoi
50a Verkhneportovaya Str., Vladivostok, 690003,
Russian Federation
e-mail: igor-igorevich.2011@bk.ru
Khodakovskiy, Vladimir M. —
PhD, associate professor
Maritime State University named
after admiral G.I. Nevelskoi
50a Verkhneportovaya Str., Vladivostok, 690003,
Russian Federation
e-mail: khodprim@mail.ru

Статья поступила в редакцию 28 марта 2017 г.

Received: March 28, 2017.

CHARACTERISTICS OF OPERATIONAL PROCESSES OF AIR INDEPENDENT SINGLE-CIRCUIT MICRO GAS-TURBINE INSTALLATIONS FOR UNDERWATER TECHNOLOGY

V. T. Matviienko¹, V. A. Ocheretianyi², A. V. Dologlonyan³

¹ Nakhimov Black Sea Higher Naval School, Sevastopol, Russian Federation

² Sevastopol State University, Sevastopol, Russian Federation

³ Institute of nature-technical systems, Sevastopol, Russian Federation

In development of fields of the shelf of the seas and oceans the essential part is assigned to the underwater equipment which is carrying out both technology, and operational functions. Possibilities of the equipment more depend on power equipment of submersibles. Among different types of power plants of submersibles the airindependent gas turbine plants (AIGTP) capable to work in single-circuit option at organic types of fuel with an oxidizer – oxygen attract interest. Schemes of the closed single-circuit GTU using organic fuel where a working body is products of combustion of fuel at its connection with oxygen are chosen as a subject of consideration. As a working body mix of a carbon dioxide gas as main component and water vapor is used, therefore, that process of burning is similar to burning in the environment of air. Excesses of a working body in the form of CO₂ are removed from a cycle, in this case, by means of dissolution in outside water in the bubbler, the oxygen which is poorly dissolved in water returns to a cycle. Ways of increase in efficiency of the engine were considered at complication of cycle GTE using warmth regeneration, i.e. heating of a working body in front of the combustion chamber by warmth of exhaust gases of the engine, and also by use of the turbocompressor utilizer formed by the overexpansion turbine. In the work the analysis of thermodynamic characteristics of working cycles of AIGTP is carried out, optimal circuit solutions and their characteristics taking into account the reached technological capabilities are proposed. It is established that the efficiency of the closed GTE with a regenerator of warmth and the closed GTE with the turbine of overexpansion are approximately equal and, relatively, is 15 – 20 % higher, than in the closed GTE of a simple cycle. Therefore, owing to design features of microturbines it is reasonable to apply the closed GTE with warmth regeneration having smaller value of extent of pressure increase in the engine compressor.

Keywords: closed circuit gas-turbine power installation, microturbine, heat regeneration, overexpansion turbine.

For citation:

Matviienko, Valerii T., Volodymyr A. Ocheretianyi, and Andrey V. Dologlonyan. “Characteristics of operational processes of air independent single-circuit micro gas-turbine installations for underwater technology.” *Vestnik Gosudarstvennogo universiteta morskogo i rechnogo flota imeni admirala S.O. Makarova* 9.3 (2017): 612–618. DOI: 10.21821/2309-5180-2017-9-3-612-618.

УДК 621.438

ХАРАКТЕРИСТИКИ РАБОЧИХ ПРОЦЕССОВ ВОЗДУХОНЕЗАВИСИМЫХ ОДНОКОНТУРНЫХ МИКРОГАЗОТУРБИННЫХ УСТАНОВОК ДЛЯ ПОДВОДНОЙ ТЕХНИКИ

В. Т. Матвеев¹, В. А. Очеретяный², А. В. Дологлонян³

¹ Черноморское высшее военно-морское ордена Красной Звезды училище им. П. С. Нахимова, Севастополь, Российская Федерация

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

³ ФГБНУ «Институт природно-технических систем», Севастополь, Российская Федерация

В освоении месторождений шельфа морей и океанов существенная роль отводится подводной технике, выполняющей как технологические, так и эксплуатационные функции. Возможности техники в большой степени зависят от энергетической оснащенности аппаратов. Среди различных типов энергоустановок подводных аппаратов вызывают интерес воздухонезависимые газотурбинные установки, способные в одно-

контурном варианте работать на органических видах топлива с окислителем — кислородом. Предметом рассмотрения выбраны схемы замкнутых одноконтурных газотурбинных установок, работающих на органическом топливе, где рабочим телом являются продукты сгорания топлива при соединении его с кислородом. В качестве рабочего тела используется смесь углекислого газа как основного компонента и водяного пара таким образом, что процесс горения подобен горению в среде воздуха. Излишки рабочего тела в виде CO_2 удаляются из цикла, в данном случае посредством растворения в забортной воде в барботере; кислород, слабо растворяющийся в воде, возвращается в цикл. Способы повышения КПД двигателя рассматривались при усложнении цикла газотурбинных двигателей с применением регенерации теплоты, т. е. подогрева рабочего тела перед камерой сгорания за счет теплоты выхлопных газов двигателя, а также применения турбокомпрессорного утилизатора, образованного за счет турбины перерасширения. В работе проведен анализ термодинамических характеристик рабочих циклов воздухонезависимых газотурбинных установок, предлагаются оптимальные схемные решения и их характеристики с учетом достигнутых технологических возможностей. Установлено, что КПД замкнутого газотурбинного двигателя с регенератором теплоты и замкнутого газотурбинного двигателя с турбиной перерасширения примерно равны и на 15 – 20 % выше, чем в замкнутых газотурбинных двигателях простого цикла. Следовательно, в силу конструктивных особенностей микротурбин целесообразно применять замкнутые газотурбинные двигатели с регенерацией теплоты, имеющие меньшее значение степени повышения давления в компрессоре двигателя.

Ключевые слова: замкнутая газотурбинная энергетическая установка, микротурбина, регенерация теплоты, турбина перерасширения.

Для цитирования:

Матвеев В. Т. Характеристики рабочих процессов воздухонезависимых одноконтурных микротурбинных установок для подводной техники / В. Т. Матвеев, В. А. Очеретяный, А. В. Дологло-нян // Вестник Государственного университета морского и речного флота имени адмирала С. О. Макарова. — 2017. — Т. 9. — № 3. — С. 612–618. DOI: 10.21821/2309-5180-2017-9-3-612-618.

Введение

Большие запасы нефти и газа, а также других полезных ископаемых сконцентрированы на шельфе морей и океанического побережья. В разведке, обустройстве и дальнейшей эксплуатации месторождений, магистральных трубопроводов в Азово-Черноморском бассейне, на Балтике и Арктическом шельфе существенную роль будут играть автономные и обитаемые подводные аппараты, которые предназначены для выполнения широкого спектра технологических операций. В мире давно ведутся работы по созданию различных типов воздухонезависимых энергетических установок (ВНЭУ) для подводных объектов [1]. Оригинальна ВНЭУ на базе электрохимических генераторов, работающих на водороде и кислороде, в которой водород получают на борту лодки посредством риформинга углеводородного топлива. Создан ряд ВНЭУ на базе тепловых двигателей: замкнутый двигатель внутреннего сгорания (ДВС), двухконтурная установка с двигателем Стирлинга, двухконтурная паротурбинная установка MESMA. В патентах U. S. Patent № 4674463 [2] и RU № 2542166 [3] предлагаются замкнутые одноконтурные газотурбинные двигатели (ГТД), рабочим телом в которых является смесь продуктов сгорания органического топлива и кислорода. Перспективность ВНЭУ на базе ГТД обоснована в работе [4], поэтому целью исследования является определение термодинамических характеристик тепловых схем и их рабочих процессов в одноконтурных замкнутых ГТД, работающих на органическом топливе.

При горении органического топлива (C_nH_m) с окислителем-кислородом O_2 образуются основные продукты сгорания: диоксид углерода CO_2 и пары воды H_2O . Так как процесс горения топлива в камере сгорания ГТД происходит с определенным избытком кислорода и смешением рабочего тела с продуктами сгорания, то перед турбиной рабочее тело состоит из $\text{CO}_2 + \text{O}_2 + \text{H}_2\text{O}$ при заданной начальной температуре газа T_3 . После турбины при охлаждении смеси газов часть паров H_2O конденсируется и удаляется из цикла; добавляется кислород и перед компрессором рабочее тело состоит из $\text{CO}_2 + \text{O}_2 + \text{H}_2\text{O}$, где вода в виде пара находится около линии насыщения при температуре T_1 на входе в компрессор. После компрессора двигателя избыток CO_2 удаляется из цикла с возвратом кислорода на вход компрессора. Исследование горения органического топлива (в частности, метана CH_4) в среде $\text{CO}_2 + \text{O}_2$ показали, что при объемной доле O_2 , находящейся в диапазоне от 25 до 35 %, процесс горения подобен горению в среде воздуха [5]. Этот результат принят за ориентир.

Методы и материалы анализа параметров рабочих циклов замкнутых ГТД

Предметом рассмотрения выбраны схемы замкнутых одноконтурных ГТУ, работающих на органическом топливе, где рабочим телом являются продукты сгорания топлива при соединении его с кислородом. За основу замкнутой газотурбинной установки (ГТУ) принят ГТД простого цикла, схема которого приведена на рис. 1.

ГТД простого цикла — однофазный, обычно применяемый для привода электрогенераторов, топливо может быть жидким (дизельное топливо, керосин и т. д.), газообразным (метан, пропан-бутан и др.). В камере сгорания горение органического топлива происходит в сжатом в компрессоре рабочем теле, состоящем из газообразных $\text{CO}_2 + \text{O}_2 + \text{H}_2\text{O}$, при этом доля O_2 уменьшается, доля CO_2 и H_2O увеличивается. Отработав в турбине, газ охлаждается в охладителе газа (ОГ), в сепараторе удаляется сконденсировавшаяся влага (H_2O), далее рабочее тело в смесителе подпитывается газообразным кислородом и поступает в компрессор. Излишки рабочего тела в виде CO_2 удаляются из цикла, в данном случае посредством растворения в забортной воде в барботере (Б), кислород, слабо растворяющийся в воде, возвращается в цикл.

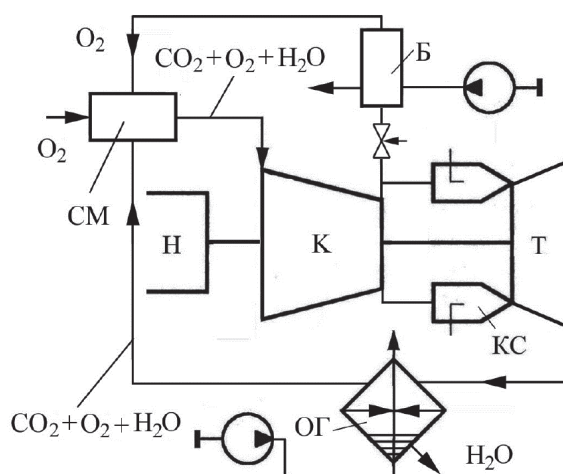


Рис. 1. Схема замкнутой ГТУ, работающей на органическом топливе:
К — компрессор; Т — турбина; КС — камера сгорания; ОГ — охладитель газа;
СМ — смеситель; Б — барботер; Н — нагрузка

Получить более высокий КПД двигателя можно за счет усложнения цикла ГТД. Традиционно в микротурбинах применяют регенерацию теплоты, т. е. подогрев рабочего тела перед камерой сгорания за счет теплоты выхлопных газов двигателя (схема представлена на рис. 2).

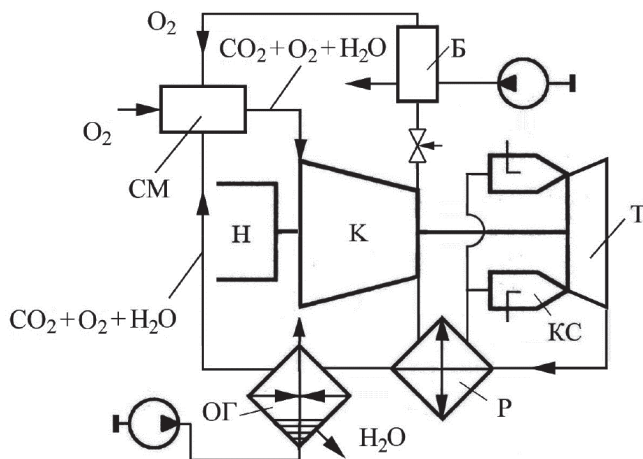


Рис. 2. Схема замкнутой ГТУ с регенерацией теплоты:
К — компрессор; Т — турбина; КС — камера сгорания; ОГ — охладитель газа; СМ — смеситель;
Б — барботер; Н — нагрузка; Р — регенератор

The diagram illustrates a gas turbine engine with an integrated oxygen cycle. Key components and flow paths include:

- Compressor (К):** Compresses incoming air (SM) and oxygen (O_2).
- Combustion Chamber (Т):** Receives compressed air and fuel ($CO_2 + O_2 + H_2O$) from the burner (Б). It is connected to the turbine (Т) and the gas generator (КГ).
- Gas Generator (КГ):** Receives exhaust from the combustion chamber and feeds it into the turbine (Т).
- Oxygen Cycle:**
 - Distillation Column (ДК):** Separates oxygen from the air stream.
 - Reboiler (ОГ):** Heats the oxygen stream using exhaust from the gas generator.
 - Condenser (ОГ(КУ)):** Cools the oxygen stream using cooling water (ВВ).
 - Pumps:** Circulate the oxygen and cooling water through the cycle.

На рис. 3 изображена схема ЗГТУ с турбиной перерасширения. Турбина перерасширения, соединенная валом с дожимающим компрессором и с охладителем газа, расположенным между ними, образует турбокомпрессорный утилизатор (ТКУ). Охладитель газа в ТКУ можно использовать как котел-утилизатор, необходимый для выработки теплоты для общесудовых целей.

При выборе параметров узлов микротурбинных установок необходимо учитывать масштабный фактор, влияющий на аэродинамические характеристики турбомашин. Так, КПД компрессора находится в пределах 80 %, КПД охлаждаемой турбинной ступени $\eta_t = 84 - 86$ %, КПД неохлаждаемой турбины достигает 88 – 90 % [6]. Начальная температура газа T_3 в микротурбине находится в пределах от 1173 до 1373 К, при этом турбина привода компрессора газогенератора может быть неохлаждаемой, а при более высокой начальной температуре газа охлаждаемой.

Для ЗГТУ характерно наличие теплообменных аппаратов, которые должны обеспечить необходимые параметры рабочего тела в цикле, и при этом иметь оптимальные габаритные размеры для микротурбинных установок. В микротурбинных установках, как правило, применяется регенератор (рекуператор), размеры которого существенно зависят от выбранной степени регенерации и конструкции теплообменной матрицы. Сегодня степень регенерации $\sigma = 0,8$ для микротурбины является достижимой и оптимальной.

Анализ параметров рабочих циклов ЗГТУ проводился с использованием физико-математических моделей и программного обеспечения, ранее апробированного при исследованиях на опытном газотурбогенераторе [6]. При анализе циклов одноконтурных ЗГТУ в имеющиеся математические модели были введены новые параметры рабочего тела (смеси газов), которые можно менять как по составу, так и по концентрации компонентов.

Анализ параметров циклов ЗГТД с регенерацией теплоты и для сравнения ЗГТД простого цикла производился при изменении степени повышения давления π_k в компрессоре двигателя, начальной температуры газа T_3 , состава рабочего тела и при прочих равных фиксированных параметрах элементов, характерных для микрогазотурбинных установок.

Результаты исследования параметров замкнутых микрогазотурбинных установок на органическом топливе

На рис. 4 изображены характеристики циклов ЗГТУ с регенерацией теплоты (Р) и простого цикла (П). Рабочим телом является смесь газов, состоящая из $\text{CO}_2 + \text{O}_2 + \text{H}_2\text{O}$, где удельная объемная составляющая кислорода 25 %. Начальная температура газа $T_3 = 1373 \text{ К}$ демонстрирует возможности ЗГТУ по экономичности, но предусматривает применение охлаждаемой турбинной ступени.

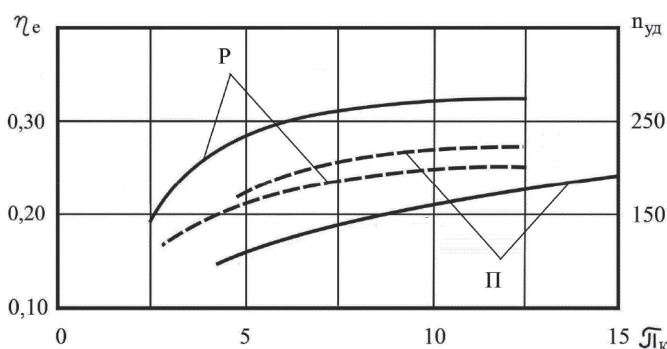


Рис. 4. Зависимости КПД η_e (сплошные линии) и удельной мощности $n_{уд}$ (пунктир) от π_k для ЗГТУ при $T_3 = 1373 \text{ К}$, $\sigma = 0,8$, рабочее тело: $\text{CO}_2 + \text{O}_2 + \text{H}_2\text{O}$

Величины эффективного КПД η_e и удельной мощности $n_{уд}$ получены при температуре газа на входе в компрессор двигателя $T_1 = 313 \text{ К}$, которую можно получить при нахождении аппарата в подводном положении. Из приведенных на рис. 4 зависимостей видно, что при относительно малых значениях π_k ЗГТД с регенерацией теплоты имеют наиболее высокие значения КПД (относительное увеличение примерно в 1,5 раза) по сравнению с КПД простого цикла.

Анализ параметров ЗГТУ с применением турбины перерасширения производился еще с учетом степени повышения давления в дожимающем компрессоре π_{dk} , обеспечивающем понижение давления за турбиной перерасширения. Ранее проведенные исследования и испытания опытного газотурбогенератора с ТКУ показали, что для ГТД простого цикла оптимальные значения $\pi_{dk} = 2,0 - 2,25$ [7], [8]. Характеристики ЗГТУ с турбиной перерасширения при начальной температуре газа $T_3 = 1373 \text{ К}$ и $\pi_{dk} = 2,25$ в зависимости от изменения степени повышения давления в компрессоре π_k в двигателе, также показаны на рис. 5.

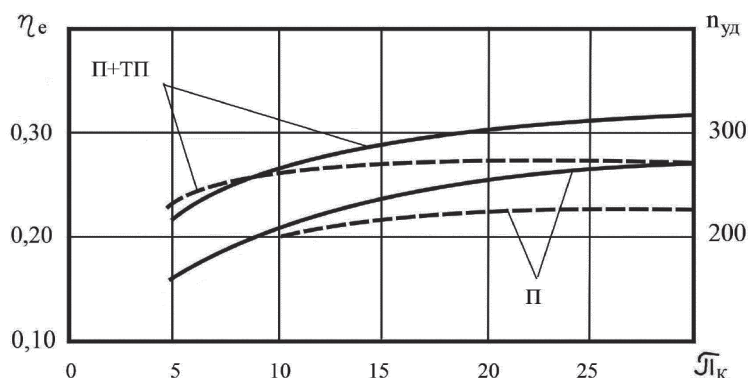


Рис. 5. Зависимости КПД η_e (сплошные линии) и удельной мощности $n_{уд}$ (пунктир) от π_k для ЗГТУ с ТП при $T_3 = 1373 \text{ К}$, $\pi_{dk} = 2,25$, рабочее тело: $\text{CO}_2 + \text{O}_2 + \text{H}_2\text{O}$

На рисунке видно, что применение в ЗГТУ турбины перерасширения позволяет повысить КПД двигателя примерно на 15 – 20 %; в такой же степени увеличивается удельная мощность смеси рабочего тела.

Необходимо отметить, что КПД ЗГТД с регенератором теплоты и ЗГТД с турбиной перерасширения примерно равны, однако для ЗГТД с ТП оптимальное значение $\pi_k = 20 - 30$, поэтому в силу конструктивных особенностей микротурбин, целесообразно применять ЗГТД с регенерацией теплоты, имеющие меньшее значением π_k в компрессоре двигателя. В ЗГТУ возможно применение количественного метода регулирования мощности (путем увеличения плотности рабочего тела поднятием давления в контуре), поэтому в ЗГТУ с регенерацией теплоты максимальные давления газа в цикле конструктивно приемлемы.

Таким образом, анализ термодинамических параметров циклов одноконтурных ЗГТД с регенерацией теплоты, где рабочим телом являются продукты сгорания органического топлива, показывает возможность создания воздухонезависимых микрогазотурбинных установок подводных объектов на базе элементов и двигателей, освоенных отечественными и зарубежными производителями, имеющими опытно-конструкторский задел и технологические возможности [1]. Дальнейшее повышение экономичности и общей энергоэффективности ЗГТУ для подводных объектов возможно за счет применения неохлаждаемых турбин газогенератора [9], выполненных из керамических материалов, и далее за счет усложнения рабочих циклов ГТД традиционными способами, в том числе — с применением турбины перерасширения [10].

Заключение

1. Параметры рабочих циклов замкнутых ГТД, работающих на продуктах сгорания органических топлив, близки по своим значениям к ГТД, работающим на воздухе, и могут быть построены по одноконтурной схеме.
2. Для замкнутых микрогазотурбинных установок на начальном этапе оптимальны схемы ГТД с регенерацией теплоты.
3. Для научно-технического задела и создания микрогазотурбинных установок для подводных объектов в настоящее время имеется элементная база и технологические возможности.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Чернышев Е. А. Развитие воздухонезависимых энергетических установок подводных лодок / Е. А. Чернышев, Е. А. Романова, А. Д. Романов // Вестник Государственного университета морского и речного флота имени адмирала С. О. Макарова. — 2015. — № 5 (33). — С. 140–152.
2. U.S. Patent № 4674463 Int. Cl. F02B 47/08 Internal combustion engines / David K. Duckwort, Frederick W. Morley; assignee Cosworth Engineering Limited, Northampton, United Kingdom, appl. No.: 910289; PCT Filed Mar.1,1984 [Электронный ресурс]. — Режим доступа: <http://www.google.ch/patents/US4674463> (дата обращения: 02.02.2017).
3. Пат. 2542166 Российская Федерация, МПК F 02 G 1/04. Энергетическая установка подводного аппарата / В. Ю. Дорофеев, В. В. Замуков, Д. В. Сидоренков; заявитель и патентообладатель ОАО «Санкт-Петербургское морское бюро машиностроения «Малахит». — № 2013153997/06; заяв. 04.12.2013; опубл. 20.02.2015, Бюл. № 5.
4. Замуков В. В. Выбор воздухонезависимой энергоустановки неатомных подводных лодок / В. В. Замуков, Д. В. Сидоренков // Судостроение. — 2012. — № 4. — С. 29–33.
5. Бабурин А. В. Стабилизация пламени метана при замене окислительной среды воздуха на смесь ($O_2 + CO_2$) / А. В. Бабурин // Технологии техносферной безопасности. — 2009. — № 3. — С. 1–6.
6. Манушин Э. А. Теория и проектирование газотурбинных и комбинированных установок / Э. А. Манушин, В. Е. Михальцев, А. П. Чернобровкин. — М.: Машиностроение, 1977. — 447 с.
7. Matviienko V. Variable Regimes Operation of Cogenerative Gas-Turbine Engine With Overexpansion Turbine / V. Matviienko, V. Ocheretianyi // ASME Turbo Expo 2010: Power for Land, Sea, and Air. — American Society of Mechanical Engineers, 2010. — Pp. 33–37. DOI: 10.1115/GT2010-22029.
8. Bianchi M. A Feasibility Study of Inverted Brayton Cycle for Gas Turbine Repowering / M. Bianchi, G. Negri di Montenegro, A. Peretto, P. R. Spina // Journal of Engineering for Gas Turbines and Power. — 2005. — Vol. 127. — Is. 3. — Pp. 599–605. DOI:10.1115/1.1765121.

9. Watt J. Microturbine Development At Ingersoll-Rand Energy System / J. Watt // Proceeding of ASME Turbo Expo GT 2005-69158. — 2005.

10. Матвеев В. Т. Перспективы повышения эффективности высокотемпературного газотурбинного двигателя усложнением цикла Брайтона / В. Т. Матвеев, В. А. Очеретяный, А. Г. Андриец // Вестник СевГТУ: сб. науч. тр. — 2009. — Вып. 97. — С. 113–115.

REFERENCES

1. Chernyshov, Evgeny Aleksandrovich, Elena Anatolievna Romanova, and Aleksey Dmitrievich Romanov. "Development of air independent power stations of submarines." *Vestnik Gosudarstvennogo universiteta morskogo i rechnogo flota imeni admiral S.O. Makarova* 5(33) (2015): 140–152.

2. U.S. Patent № 4674463 Int. Cl. F02B 47/08 Internal combustion engines / David K. Duckworth, Frederick W. Morley; assignee Cosworth Engineering Limited, Northampton, United Kingdom, appl. No.: 910289; PCT Filed Mar.1, 1984. Web. 2 Feb. 2017 <<http://www.google.ch/patents/US4674463>>.

3. Dorofeev, V. Yu., V. V. Zamukov, and D. V. Sidorenkov. RU 2 542 166 C1, IPC F 02 G 1/04. Russian Federation, assignee. Publ. 20 Feb. 2015.

4. Zamukov, V. V., and D. V. Sidorenkov. "Selection of air-independent power plant for non-nuclear submarines." *Shipbuilding* 4 (2012): 29–33.

5. Baburin, A. V. "Stabilization of the methane flame in course of replacing the air oxidation medium for synthetic mixture ($O_2 + CO_2$)." *Tekhnologii tekhnosfernoi bezopasnosti* 3 (2009): 1–6.

6. Manushin, E. A., V. E. Mikhail'tsev, and A. P. Chernobrovkin. *Teoriya i proektirovanie gazoturbinnikh i kombinirovannykh ustanovok*. M.: Mashinostroenie, 1977.

7. Matviienko, V., and V. Ocheretianyi. "Variable Regimes Operation of Cogenerative Gas-Turbine Engine With Overexpansion Turbine." *ASME Turbo Expo 2010: Power for Land, Sea, and Air*. American Society of Mechanical Engineers, 2010: 33–37. DOI: 10.1115/GT2010-22029.

8. Bianchi, M., G. Negri di Montenegro, A. Peretto, and P. R. Spina. "A Feasibility Study of Inverted Brayton Cycle for Gas Turbine Repowering." *Journal of Engineering for Gas Turbines and Power* 127.3 (2005): 599–605. DOI:10.1115/1.1765121.

9. Watt, J. "Microturbine Development At Ingersoll-Rand Energy System." *Proceeding of ASME Turbo Expo GT 2005-69158* (2005).

10. Matveenko, V. T., V. A. Ocheretianyi, and A. G. Andriets. "Perspektivy povysheniya effektivnosti vysokotemperaturnogo gazoturbinnogo dvigatelya uslozhneniem tsikla Braitona." *Vestnik SevGTU. Sb. nauchn. trudov* 97 (2009): 113–115.

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

Матвеев Валерий Тимофеевич —

доктор технических наук, профессор
Черноморское высшее военно-морское ордена
Красной Звезды училище имени П. С. Нахимова
299028, Российская Федерация, г. Севастополь,
ул. Дыбенко Павла 1, корп. А
e-mail: mvt3900@mail.ru

Очеретяный Владимир Анатольевич —

кандидат технических наук, доцент
ФГАОУ ВО «Севастопольский
государственный университет»
299053, Российская Федерация, г. Севастополь,
ул. Университетская, 33
e-mail: ocheret-1961@rambler.ru

Дологлонян Андрей Вартазарович —

кандидат технических наук, доцент
ФГБНУ «Институт природно-технических систем»
299011, Российская Федерация, г. Севастополь,
ул. Ленина, 28
e-mail: dologlonyan@mail.ru

INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Matviienko, Valerii T. —

Dr. of Technical Sciences, professor
Nakhimov Black Sea Higher Naval School
1-A, Dybenko Pavla Str., Sevastopol, 299028,
Russian Federation
e-mail: mvt3900@mail.ru

Ocheretianyi, Volodymyr A. —

PhD, associate professor
Sevastopol State University
33, Universitetskaia Str., Sevastopol, 299053,
Russian Federation
e-mail: ocheret-1961@rambler.ru

Dologlonyan, Andrey V. —

PhD, associate professor
Institute of nature-technical systems
28, Lenina Str., Sevastopol, 299011,
Russian Federation
e-mail: dologlonyan@mail.ru

Статья поступила в редакцию 20 апреля 2017 г.

Received: April 20, 2017.

ЭЛЕКТРОТЕХНИЧЕСКИЕ КОМПЛЕКСЫ И СИСТЕМЫ

DOI: 10.21821/2309-5180-2017-9-3-619-627

PROSPECTS OF INTRODUCING UNMANNED NAVIGATION ON INLAND WATERWAYS OF THE RUSSIAN FEDERATION

V. V. Karetnikov, I. V. Pashchenko, A. I. Sokolov

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

The article examines the potential for the implementation of robotic water transport facilities (RWTF) on the inland waterways of the Russian Federation. In addition, the article reviews the infocommunication technologies of the industry, which can be used in the implementation of the RWTF. Logistics is an essential expense item for many companies. Reducing of logistics costs can significantly improve the profitability of the business, so leading retailers and transport service providers are working to create autonomous logistics systems, a new direction is the creation of unmanned river vessels that can affect business much more than other systems.

Unmanned river vessels are vehicles that can drive in an autonomous or semi-autonomous mode. Such vessels do not need a crew, cabins, crew life support systems and high superstructures, which impair the fuel efficiency of the vessel. The future, which a decade ago seemed like science fiction, today is the business of the next few years. At present, unmanned vessels are already being tested and, according to experts, they will be used in inland navigation in the next 5 years. In international navigation, this is a prospect of 10 – 15 years, since it will be necessary to develop relevant international legislation, which will take time.

In the basic variant, it is planned to remove the bridge, superstructures, crew accommodation, water distribution, sewerage and air conditioning systems, as well as power supply equipment. Due to this, remotely controlled vessels of similar sizes will be approximately five percent lighter than ships with crew. The same vessels will consume less fuel, and due to the release of additional space they will be able to transport more cargo. In order to ensure high reliability, many control and monitoring systems of the surrounding space will need to be duplicated. The ideas of creating soup-free civil courts have been voiced for a long time, but the first practical steps in this direction were taken only a few years ago.

Keywords: robotic facilities of water transport, GNSS GLONASS, inland waterways, monitoring system, control and correction station, differential field, safety of navigation.

For citation:

Karetnikov, Vladimir V., Ivan V. Pashchenko, and Andrei I. Sokolov. "Prospects of introducing unmanned navigation on inland waterways of the Russian Federation." *Vestnik Gosudarstvennogo universiteta morskogo i rechnogo flota imeni admirala S. O. Makarova* 9.3 (2017): 619–627. DOI: 10.21821/2309-5180-2017-9-3-619-627.

УДК 656.62/629.783/621.396.932

ПЕРСПЕКТИВЫ ВНЕДРЕНИЯ БЕЗЭКИПАЖНОГО СУДОХОДСТВА НА ВНУТРЕННИХ ВОДНЫХ ПУТЯХ РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ

В. В. Каретников, И. В. Пашченко, А. И. Соколов

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

В статье рассматриваются потенциальные возможности внедрения на внутренних водных путях Российской Федерации роботизированных объектов водного транспорта. Кроме того, в статье проведен обзор эксплуатируемых в отрасли инфокоммуникационных технологий, которые могут быть использованы при внедрении роботизированных объектов водного транспорта. Логистика является существенной статьей расходов для многих компаний. Снижение логистических расходов может существенно повы-

силь рентабельность бизнеса, поэтому ведущие ритейлеры и поставщики транспортных услуг работают над созданием автономных логистических систем. Одним из новых направлений является создание беспилотных речных судов, которые могут повлиять на бизнес намного больше других систем.

Беспилотные речные суда — это транспорт, который может осуществлять движение в автономном или полуавтономном режиме. На таких судах не нужен экипаж, каюты, системы жизнеобеспечения экипажа и высокие надстройки, ухудшающие топливную эффективность судна. В настоящее время ведутся испытания безэкипажных судов, и, по прогнозам специалистов, они начнут эксплуатироваться во внутреннем плавании в ближайшие пять лет. В международном плавании — это перспектива 10 – 15 лет, поскольку потребуется выработка соответствующего международного законодательства, на что понадобится время.

В базовом варианте с судов планируется убрать капитанский мостик, надстройки, жилые помещения для экипажа, системы водораспределения, канализации и кондиционирования, а также оборудование электроснабжения. Благодаря этому дистанционно управляемые суда при схожих размерах будут примерно на 5 % легче кораблей с экипажем, станут потреблять меньше топлива, и, благодаря освобождению дополнительного пространства, смогут перевозить больше грузов. При этом для обеспечения высокой надежности потребуется продублировать многие системы управления и контроля окружающего пространства. Идеи создания безэкипажных гражданских судов высказываются уже давно, однако первые практические шаги в эту сторону были предприняты лишь несколько лет назад.

Ключевые слова: роботизированный объект водного транспорта, ГНСС ГЛОНАСС, внутренние водные пути, система мониторинга, контрольно-корректирующая станция, дифференциальное поле, безопасность мореплавания.

Для цитирования:

Каретников В. В. Перспективы внедрения безэкипажного судоходства на внутренних водных путях Российской Федерации / В. В. Каретников, И. В. Пашенко, А. И. Соколов // Вестник Государственного университета морского и речного флота имени адмирала С. О. Макарова. — 2017. — Т. 9. — № 3. — С. 619–627. DOI: 10.21821/2309-5180-2017-9-3-619-627.

Введение

В настоящее время у специалистов внутреннего водного транспорта (ВВТ) значительный интерес вызывают вопросы, связанные с разработкой роботизированных объектов водного транспорта (РОВТ), с последующим их внедрением и эксплуатацией. При внедрении таких объектов на ВВТ особое значение имеет наличие необходимой инфраструктуры, которая должна обеспечить непрерывный контроль и управление РОВТ. Кроме того, все участники транспортного процесса на внутренних водных путях (ВВП) РФ должны обладать достаточной информацией о перемещении РОВТ, это необходимо для обеспечения высокого уровня безопасности судоходства. Таким образом, логичным может считаться объединение инфокоммуникационных потоков как от береговой инфраструктуры, так и от участников транспортного процесса [1] – [3]. Подобное объединение на морском транспорте осуществляется в соответствии с концепцией e-Navigation, которая подразумевает создание единой информационной среды.

Методы и материалы

Установка современных средств навигации и связи на речных судах уже сейчас является одним из обязательных требований безопасности, без соблюдения которых ни одно судно не имеет права совершать рейсы и заходить в порты. Вероятно, в перспективе список таких требований расширится за счет широкомасштабного внедрения инструментальных методов навигации на ВВП РФ, основанных на использовании электронных навигационных карт ВВП РФ и высокоточного режима местоопределения ГНСС ГЛОНАСС.

Внедрение РОВТ на ВВП РФ потребует развития как средств обработки и распределения информации, так и развития береговых инфокоммуникационных систем в целом, что в сочетании с необходимостью применения цифровых технологий передачи данных и внедрением средств вычислительной техники для обработки информации в процессе ее передачи обуславливает необходимость применения современных систем связи для организации обмена информацией в интересах решения прикладных задач ВВТ [3] – [5]. Результатом такого взаимодействия является

интеграция и конвергенция существующих систем связи и информатизации ВВТ в телекоммуникационные и, соответственно, в инфокоммуникационные системы. Указанные мероприятия, вероятно, позволят сформировать на ВВП РФ полноценную береговую инфраструктуру, которая может быть использована для обеспечения работы РОВТ различного назначения [5], [6].

Кроме того, использование элементов концепции e-Navigation обеспечит возможность унификации РОВТ как при работе на ВВП, так и в морских районах. Здесь необходимо отметить, что на ВВП РФ ведутся работы по внедрению элементов указанной концепции, где предусмотрено развертывание речных автоматизированных систем управления движением судов (АСУДС) с центрами управления движением судов (ЦУДС) [7] – [9]. Структура речной АСУДС при взаимодействии с РОВТ представлена на рис. 1. В этом случае источниками информации о судоводной обстановке являются системы УКВ / КВ-радиосвязи, береговые радиолокационные станции (БРЛС), базовые станции автоматизированной информационной системы (АИС), система видеонаблюдения. Определение местоположения судов, как правило, обеспечивается с помощью глобальной навигационной спутниковой системы (ГНСС) GPS/ГЛОНАСС и ее функциональных дополнений [10].

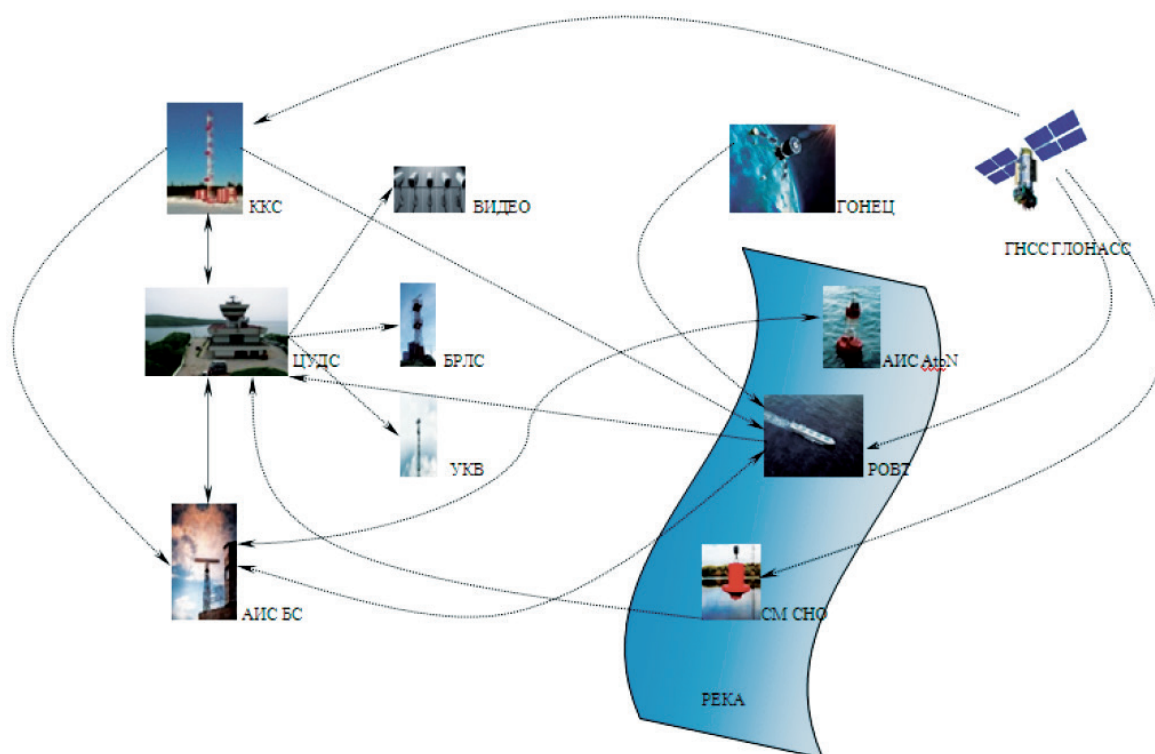


Рис. 1. Структура речной АСУДС

Обсуждение

Основу инфокоммуникационной системы, способной обеспечивать функционирование РОВТ, будет составлять АСУДС, которая должна осуществлять мониторинг РОВТ на всем протяжении ВВП РФ (см. рис. 1). Местоопределение РОВТ должно производиться автоматически с точностью не более 1 м. В данный момент на ВВП РФ функционирует дифференциальная система, обеспечивающая точность определения не более 5 м на расстоянии от контрольно-корректирующей станции (ККС) до 500 км. В настоящее время на ВВП РФ на базе ККС, работающих в СВ-диапазоне, построена достаточно обширная сеть ЛДПС ГНСС ГЛОНАСС/GPS, формирующая для нужд ВВТ высокоточное радионавигационное поле дифференциальной поправки ГНСС ГЛОНАСС [11].

Для формирования такого поля на единой глубоководной системе Европейской части ВВП РФ внедрены следующие ККС: ККС «Шепелево»; ККС «Шексна»; ККС «Ростов на Дону»;

ККС «Нижний Новгород»; ККС «Волгоград»; ККС «Казань»; ККС «Самара»; ККС «Саратов»; ККС «Астрахань». Их зоны действия показаны на рис. 2. Как отмечалось ранее, АСУДС производит мониторинг движения судов в зоне своей ответственности в том числе с использованием АИС. АИС обеспечивает автоматический обмен навигационной и иной информацией, связанной с безопасностью мореплавания, между судовыми и другими станциями АИС по специальному УКВ-каналу радиосвязи.

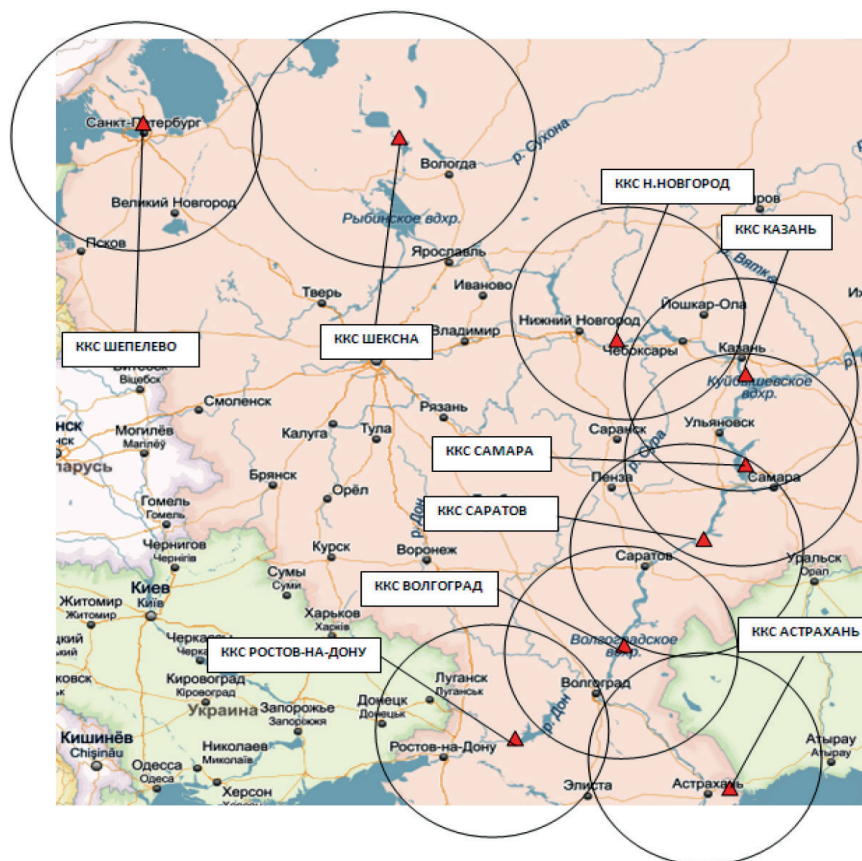


Рис. 2. Актуальное дифференциальное поле
Единой глубоководной системы европейской части РФ

В целях обеспечения унификации и стандартизации АИС в Регламенте Радиосвязи морской подвижной службы (МПС) закреплено для использования в АИС два международных канала: AIS-1 (87В — 161,975 МГц) и AIS-2 (88В — 162,025 МГц), которые должны использоваться повсеместно, за исключением регионов с особым частотным регулированием [12]. Указанные каналы используются и на ВВП РФ. Таким образом достигается унификация технологии АИС для морских районов и районов ВВП РФ, что особенно актуально для судов «река — море» плавания. Дальность распространения УКВ-радиоволн на ВВП РФ обычно не превышает 30 – 50 км. В случае, если зона ответственности АСУДС больше, можно использовать приемопередающие ретрансляторы, связанные между собой оптоволоконной или радиорелейной связью.

Результаты

Обеспечение эффективности мониторинга РОВТ в АСУДС возможно только с использованием береговых радиолокационных систем (БРЛС). В таком случае в состав АСУДС должна входить, по меньшей мере, одна БРЛС. Понятно, что в идеале радиолокационное наблюдение с помощью БРЛС должно быть реализовано на всем протяжении магистральных участков ВВП РФ [13]. Это возможно путем установки цепи БРЛС, связанных с АСУДС. Понятно, что использование только наземных каналов УКВ-связи не всегда обеспечит необходимую надежность системы. В ка-

честве дублирующих каналов связи может быть использована GSM-связь, которая обеспечивает широкополосный доступ передачи информации. Основным недостатком этого канала является необходимость оплаты предоставления услуг связи. Однако по своим техническим возможностям данный канал связи весьма привлекателен [14].

Введенная в эксплуатацию отечественная многофункциональная система персональной спутниковой связи (МСПСС) «Гонец-Д1М» представляется необходимым сегментом для построения современной инфокоммуникационной системы. МСПСС «Гонец Д1М» в настоящее время обеспечивает покрытие европейской части ВВП РФ и создает возможность передачи данных. Недостатком является требование оплаты трафика. Возможность применения МСПСС «Гонец-Д1М» для использования в качестве резервного канала связи с РОВТ подтверждается результатами натурных испытаний, проведенных на борту теплохода «река — море» «Вадим Тюрнев», в период плавания. МСПСС «Гонец-Д1М» способна обеспечить при работе с РОВТ на ВВП РФ:

- обмен сообщениями с абонентами сетей общего пользования;
- доставку на суда и другим пользователям метеорологической информации;
- возможность отслеживать перемещение судов и других мобильных объектов посредством передачи их координат в диспетчерские центры средствами системы «Гонец»;
- связь между судами и другими абонентами на ВВП РФ;
- возможность отправки сигналов бедствия;
- связь с береговыми службами;
- сбор и передача различных телеметрических данных с судов (скорость хода, запас горючего и т. д.) и различных отраслевых объектов;
- экстренное оповещение регионов при угрозе ЧС [15].

При мониторинге движения РОВТ в некоторых случаях необходимо задействование каналов для передачи видеoinформации. Данная потребность может быть реализована только через канал связи GSM. Кроме мониторинга система должна осуществлять управление движением судов. Перед выходом РОВТ в рейс должна быть произведена загрузка маршрута в специализированную бортовую ЭВМ судна. Маршрут состоит из набора путевых точек, которые привязаны к географическим координатам. Количество точек может быть бесконечно большим, оно будет определяться специальной программой, которая может быть установлена, в том числе, и на самом РОВТ [16]. Данный маршрут, а также информация об осадке, габаритах и другие данные также должны передаваться на все АСУДС, в зоне действия которых пролегает маршрут РОВТ. Каждая АСУДС должна проанализировать данную информацию и подтвердить возможность проводки РОВТ по зоне ответственности. После чего РОВТ может начинать движение по путевым точкам, привязанным к географической сетке координат. АСУДС осуществляет мониторинг движения РОВТ по маршруту и в случае необходимости передает на БС корректирующую информацию. В задачу БС входит расчет управляющего воздействия с целью выхода на следующую путевую точку. Данные алгоритмы уже рассмотрены в ряде научных трудов (включая учет ветра и течения), частично реализованы в ряде адаптивных авторулевых, учитывающих показания автоматических указателей скорости поворота судна. Также существуют алгоритмы движения судна по путевым потокам при расхождении и маневрировании [17]. Соответственно необходима адаптация существующих алгоритмов для использования на РОВТ. Данная задача вполне реализуема, и основным условием для этого является возможность внесения корректирующей информации, как минимум, двумя независимыми способами (спутниковые и береговые системы связи).

Для осуществления безопасности РОВТ необходимо, чтобы все плавучие средства, в том числе и навигационные плавучие знаки, были оборудованы транспондерами АИС. Тогда АСУДС сможет осуществлять мониторинг всех участников движения и знать их фактическое местонахождение, в том числе и навигационного оборудования [18]. Это должно касаться как грузовых, так и судов технического обслуживания, а также пассажирских и частных судов, независимо от того, экипажные они или нет (данное условие в основном реализовано).

Для повышения безопасности на РОВТ должна быть задействована функция оповещения для случая, если РЛС РОВТ обнаружит опасный объект, находящийся на его пути или идущий на опасное сближение и не излучающий сигналы идентификации (например, гребная лодка, плот, неопознанный плавающий объект), с помощью функции автоматического захвата целей, уже реализованной в современных САРП [19]. Особенно опасной представляется ситуация, когда неопознанный объект находится не в зоне действия РЛС АСУДС. В этом случае необходимо включение дополнительных каналов связи и получения по ним РЛС и / или видео непосредственно с самого РОВТ. Должны быть установлены специальные посты, оснащенные быстрыми средствами передвижения, на которых в случае необходимости технические специалисты и спасатели могли бы в кратчайшие сроки добраться до РОВТ, пославшего сигнал бедствия [20].

Особое внимание следует уделить таким операциям как швартовка к причалу, постановка на якорь (в речных условиях постановка на кормовой и носовой якорь), шлюзование. Во время этих операций возможен переход на непосредственное дистанционное управление двигателями рулевым устройством, подруливающим и якорным устройством. Подобное дистанционное управление уже применяется в различных транспортных системах с использованием GSM, спутниковых и других каналов связи. Также необходимо рассмотреть вопросы оценки многоуровневой электромагнитной защищенности информационных каналов (ЭМЗИК) радиосвязи и местоопределения, а также ее влияние на эффективность АСУДС. В ряде работ, посвященных данной тематике, представлены математические модели и алгоритмы модели ЭМЗИК для таких систем, на основе которых происходит оценка потенциального количества совместимых каналов радиосвязи и местоопределение.

Техническое оснащение РОВТ должно включать необходимые системы связи и навигации, позволяющие безопасно и эффективно эксплуатировать РОВТ на водных путях. К такому техническому оснащению относятся навигационные комплексы, основанные на приемниках спутниковой навигации, приёмопередатчики в УКВ-диапазоне, радиолокационные станции в сантиметровом и миллиметровом диапазоне частот, терминалы спутниковой связи, системы видеорегистрации, специализированные ЭВМ для движения по путевым точкам с учетом ветра и течения с авторулевым и измерителем скорости поворота и другое дополнительное оборудование.

Одним из перспективных мест для натурных испытаний РОВТ может считаться акватория реки Нева в районе г. Шлиссельбург. Расположение Шлиссельбурга выгодно тем, что он находится в месте выхода из Ладожского озера в реку Неву. В данном месте возможно проведение «обкатки» экспериментальных моделей РОВТ в тестовом режиме как для морских, так и для речных режимов плавания. Имеется достаточно водного пространства для подобных испытаний, а также необходимая инфраструктура: судоремонтная база, причалы, источники промышленных помех (заводы, ЛЭП и др.), имеется возможность использования всех видов связи (УКВ, GSM, спутниковая связь), сплошное перекрытие полем дифференциальных поправок. Кроме того, в Шлиссельбурге расположен ЦУДС, где внедрены элементы системы мониторинга плавучей навигационной обстановки.

Выводы

Для реализации задачи внедрения РОВТ на ВВП РФ есть все технические возможности. Во-первых, это возможность точного местоопределения. Во-вторых, это возможность передачи данных с использованием береговых и спутниковых информационных каналов. В данной статье рассмотрена инфокоммуникационная система, осуществляющая мониторинг и управление РОВТ на всем протяжении маршрута. Инновационность данной системы заключается в возможности управления «простыми» судами, не обеспеченными сложными системами искусственного интеллекта, что не делает их слишком дорогими. Данная система является «умной», так как в ней используется бесплатная цифровая транкинговая УКВ-связь, а при необходимости мгновенно могут быть задействованы дублирующие системы связи, обеспечивающие необходимый трафик информации в автоматическом режиме.

Необходимо в первую очередь:

- исследование канала связи «судно — АСУДС» на предмет передачи судовой радиолокационной информации в УКВ-диапазоне;
- исследование спутниковых каналов связи на предмет возможности передачи технических и управляющих сигналов;
- исследование электромагнитной совместимости на предмет использования новых каналов связи;
- проведение экспериментальной проводки тестовых образцов РОВТ по путевым точкам.

Заключение

На сегодняшний день в мире не существует гражданских безэкипажных судов, для этого нужны не только интеллектуальные бортовые системы, но и соответствующая инфраструктура береговых сервисов, спутниковых систем, а также изменение законодательной и нормативной базы. Успешная реализация данного проекта приведет к лидерству российских компаний и технологий в целевых сегментах мирового рынка. Безэкипажное судовождение, несомненно, повысит эффективность и безопасность перевозок.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Каретников В. В. К вопросу построения автоматизированной системы мониторинга параметров высокоточного навигационного поля / В. В. Каретников, И. В. Пашенко, А. И. Соколов, И. Г. Кузнецов // Морская радиоэлектроника. — 2015. — № 2 (52). — С. 24–27.
2. Многофункциональная система персональной спутниковой связи и передачи данных с космических аппаратов на низких орбитах «Гонец-Д1М». [Электронный ресурс]. — Режим доступа: <http://www.gonets.ru/> (дата обращения: 12.11.2015).
3. Каретников В. В. Развитие и перспективы современных инфокоммуникационных систем для обеспечения судоходства на внутренних водных путях России / В. В. Каретников, А. А. Сикарев // Журнал Университета водных коммуникаций. — 2010. — № 4. — С. 74–77.
4. Каретников В. В. Перспективы комплексирования речных инфокоммуникационных технологий для повышения безопасности судоходства на внутренних водных путях / В. В. Каретников, В. А. Бекряшев // Речной транспорт (XXI век). — 2014. — № 2 (67). — С. 49–53.
5. Каретников В. В. Топология дифференциальных полей и дальность действия контрольно-корректирующих станций высокоточного местоопределения на внутренних водных путях / В. В. Каретников, А. А. Сикарев. — 2-е изд. — СПб.: ГУМРФ имени адмирала С. О. Макарова, 2013. — 525 с.
6. Разработка предложений и методов применения системы ГЛОНАСС, перспективных ГНСС и их функциональных дополнений в составе системы управления движением судов и АИС: отчет о НИР «Управление — река». — СПб.: Изд-во СПГУВК, 2010. — 215 с.
7. Каретников В. В. Методы построения радионавигационных полей для информационного обеспечения автоматизированных систем управления движением судов: дис. ... д-ра техн. наук: 05.13.06 / В. В. Каретников. — СПб., 2011. — 333 с.
8. Каретников В. В. Архитектура зон действия локальных дифференциальных подсистем, работающих для нужд внутреннего водного транспорта / В. В. Каретников. — СПб.: Изд-во Политехнического университета, 2010. — 178 с.
9. Кульнев В. Анализ направлений и состояния разработок функциональных дополнений к спутниковым радионавигационным системам / В. Кульнев, С. Михайлов // Беспроводные технологии. — 2006. — № 4. — С. 61–69.
10. Постановление Правительства РФ от 20 августа 2001 г. № 587 «О Федеральной целевой программе по использованию глобальной навигационной спутниковой системы ГЛОНАСС в интересах гражданских пользователей». — М.: Минтранс, 2001. — 5 с.
11. Каретников В. В. Построение системы управления и контроля высокоточным дифференциальным полем ГНСС ГЛОНАСС на Северном морском пути / В. В. Каретников, И. В. Пашенко, А. И. Соколов // Вестник Государственного университета морского и речного флота имени адмирала С. О. Макарова. — 2015. — № 6 (34). — С. 166–172.

12. Кирсанов М. Н. Анализ алгоритмов выбора оптимальных маршрутов группы судов / М. Н. Кирсанов // Вестник Государственного университета морского и речного флота имени адмирала С. О. Макарова. — 2016. — № 2 (36). — С. 183–190. DOI: 10.21821/2309-5180-2016-8-2-183-190.
13. Каретников В. В. Основные аспекты использования современных инфокоммуникационных технологий для обеспечения беспилотного судовождения на водном транспорте / В. В. Каретников, И. В. Пашченко, А. И. Зайцев // Вестник Государственного университета морского и речного флота имени адмирала С. О. Макарова. — 2016. — № 1 (35). — С. 170–179. DOI: 10.21821/2309-5180-2016-8-1-170-179.
14. Андриюшечкин Ю. Н. Роль корректирующей информации в процессе обеспечения безопасности судоходства / Ю. Н. Андриюшечкин, В. В. Каретников, А. А. Сикарев // Проблемы информационной безопасности. Компьютерные системы. — 2012. — № 1. — С. 75–78.
15. Борисова Л. Ф. Мобильные системы управления движением судов: монография / Л. Ф. Борисова, А. А. Соловьев // Международный журнал экспериментального образования. — 2014. — № 12. — С. 79–80.
16. Куракин В. В. Особенности управления движением мобильных роботов и требования к их системам управления / В. В. Куракин, О. В. Корзун // Наука — образованию, производству, экономике: матер. 11-й Междунар. науч.-техн. конф. — Т. 3. — Минск: БНТУ, 2013. — С. 389.
17. Мельниченко А. С. Система группового управления безэкипажными малотоннажными судами / А. С. Мельниченко, К. В. Бесклубова // Современные научные исследования и инновации. — 2013. — № 12 (32). — С. 8.
18. Краснодарец Л. А. Аналитическое проектирование законов траекторного управления мобильными роботами / Л. А. Краснодарец, А. Е. Осадченко // Сб. тр. XII Всероссийского совещания по проблемам управления ВСПУ-2014. — М.: Ин-т проблем управления им. В. А. Трапезникова РАН, 2014. — С. 3783–3791.
19. Веремей Е. И. Когнитивная реализация оптимизационного подхода к синтезу законов управления подвижными объектами / Е. И. Веремей // Современные информационные технологии и ИТ-образование. — 2016. — Т. 12. — № 1. — С. 98–107.
20. Цыфанский С. Л. Новый способ движения на границе природных сред — подледный транспортный аппарат / С. Л. Цыфанский // Наука, техника и образование. — 2015. — № 4 (10). — С. 43–49.

REFERENCES

1. Karetnikov, V. V., I. V. Pashhenko, A. I. Sokolov, and I. G. Kuznecov. "On the construction of automated monitoring system parameters precision navigation field." *Marine Radio-electronics* 2.52 (2015) 24–27.
2. Mnogofunktsional'naya sistema personal'noi sputnikovoi svyazi i peredachi dannykh s kos-micheskikh apparatov na nizkikh orbitakh «Gonets-DIM». Web. 12 Nov. 2015 <<http://www.gonets.ru/>>.
3. Karetnikov, V. V., and A. A. Sikarev. "Development and prospects of modern communicational systems to facilitate shipping on the inland waterways of Russia." *Zhurnal Universiteta vodnykh kommunikacij* 4 (2010): 74–77.
4. Karetnikov, V. V., and V. A. Bekryashev. "Perspectives of complexing river infocommunicational technologies for increasing navigational safety on inland water ways." *River transport (XXI century)* 2.67 (2014): 49–53.
5. Karetnikov, V. V., and A. A. Sikarev. *Topologiya differentsialnykh polei i dalnost deystviya kontrolno-korrektiruyushchih stantsiy vyisokotochnogo mestoopredeleniya na vnutrennih vodnykh putyakh*. 2d ed. SPb.: GUMRF im. adm. S.O. Makarova, 2013.
6. *Razrabotka predlozhenii i metodov primeneniya sistemy GLONASS, perspektivnykh GNSS i ikh funktsional'nykh dopolnenii v sostave sistemy upravleniya dvizheniem sudov i AIS*. Research report «Upravlenie-reka». SPb.: SPGUVK, 2010.
7. Karetnikov, V. V. *Metody postroeniya radionavigatsionnykh polei dlya informatsionnogo obespecheniya avtomatizirovannykh sistem upravleniya dvizheniem sudov*. Dr. diss. SPb., 2011.
8. Karetnikov, V. V. *Arkhitektura zon deistviya lokal'nykh differentsial'nykh podsystem, rabotayushchikh dlya nuzhd vnutrennego vodnogo transporta*. SPb.: Izd-vo Politekhnicheskogo universiteta, 2010.
9. Kul'nev, V., and S. Mikhailov. "Analiz napravlenii i sostoyaniya razrabotok funktsional'nykh dopolnenii k sputnikovym radionavigatsionnym sistemam." *Besprovodnye tekhnologii* 4 (2006): 61–69.
10. Russian Federation. Government resolution № 587. 20 August 2001. O Federal'noi tselevoi programme po ispol'zovaniyu global'noi navigatsionnoi sputnikovoi sistemy GLONASS v interesakh grazhdanskikh pol'zovatelei. M.: Mintrans, 2001.

11. Karetnikov, Vladimir Vladimirovich, Ivan Vladimirovich Pashchenko, and Andrei Igorevich Sokolov. "Building a sistem of management and control high-precision differential field GLONASS on the Northern sea route." *Vestnik Gosudarstvennogo universiteta morskogo i rechnogo flota imeni admirala S.O. Makarova* 6(34) (2015): 166–172.
12. Kirsanov, Mihail Nikolaevich. "Analysis of algorithms for the selection of optimal routes the group's vessels." *Vestnik Gosudarstvennogo universiteta morskogo i rechnogo flota imeni admirala S.O. Makarova* 2(36) (2016): 183–190. DOI: 10.21821/2309-5180-2016-8-2-183-190.
13. Karetnikov, Vladimir Vladimirovich, Ivan Vladimirovich Pashchenko, and Alexey Ivanovich Zaytsev. "Highlights of use modern information and communication technologies to provide unmanned navigation on water transport." *Vestnik Gosudarstvennogo universiteta morskogo i rechnogo flota imeni admirala S.O. Makarova* 1(35) (2016): 170–179. DOI: 10.21821/2309-5180-2016-8-1-170-179.
14. Andryushechkin, Yu. N., V. V. Karetnikov, and A. A. Sikarev. "Rol korrektruyushey informatsii v protsesse obespecheniya bezopasnosti sudohodstva." *Information Security Problems. Computer Systems* 1 (2012): 75–78.
15. Borisova, L. F., and A. A. Solov'ev. "Mobil'nye sistemy upravleniya dvizheniem cudov (monografiya)." *International journal of experimental education* 12 (2014): 79–80.
16. Kurakin, V. V., and O. V. Korzun. "Osobennosti upravleniya dvizheniem mobil'nykh robotov i trebovaniya k ikh sistemam upravleniya." *Nauka – obrazovaniyu, proizvodstvu, ekonomike: materialy 11-i Mezhdunarodnoi nauchno-tekhnicheskoi konferentsii*. T. 3. Minsk: BNTU, 2013: 389.
17. Melnichenko, Aleksandra Sergeevna, and Ksenia Valerievna Besklubova. "System of crewless small-tonnage ships" group control." *Modern scientific researches and innovations* 12(32) (2013): 8.
18. Krasnodubets, L. A., and A. E. Osadchenko. "Analiticheskoe proektirovanie zakonov traektorного upravleniya mo-bil'nyimi robotami." *Sbornik trudov konferentsii: XII vserossiiskoe soveshchanie po problemam upravleniya VSPU-2014*. M.: Institut problem upravleniya im. V.A. Trapeznikova RAN, 2014: 3783–3791.
19. Veremey, E. I. "Cognitive implementation of optimization approach to the control system design for moving objects." *Modern Information Technology and IT-education* 12.1 (2016): 98–107.
20. Tsyfanskii, S. L. "Novyi sposob dvizheniya na granitse prirodnkh sred-podlednyi transportnyi apparat." *Nauka, tekhnika i obrazovanie* 4(10) (2015): 43–49.

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

Каретников Владимир Владимирович —

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

Пашченко Иван Владимирович —

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

Соколов Андрей Игоревич — аспирант

Научный руководитель:
Каретников Владимир Владимирович
ФГБОУ ВО «ГУМРФ имени
адмирала С.О. Макарова»
198035, Российская Федерация, Санкт-Петербург,
ул. Двинская, 5/7
e-mail: sokolov.ai@bk.ru, kaf_svvp@gumrf.ru

INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Karetnikov, Vladimir V. —

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

Pashchenko, Ivan V. —

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

Sokolov, Andrei I. — Postgraduate

Supervisor:
Karetnikov, Vladimir V.
Admiral Makarov State University of Maritime
and Inland Shipping
5/7 Dvinskaya Str., St. Petersburg, 198035,
Russian Federation
e-mail: sokolov.ai@bk.ru, kaf_svvp@gumrf.ru

Статья поступила в редакцию 15 мая 2017 г.

Received: May 15, 2017.

ORGANIZATION OF RADIAL AND MULTIPLEX CHANNELS IN ON-BOARD AUTOMATIC CONTROL SYSTEMS

D. S. Vasilchenko, A. E. Zhuravlev

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

The purpose of this article is to find the most optimal solutions and hardware organization data transfer inter-module exchange on-Board automatic control systems. Reviewed and identified the most feasible channels for inter-module data exchange used in the creation and implementation of automatic control systems. Describes the approach used when constructing automatic control systems taking into account the specifics of the modules, problems of hardware of the organization and characteristics of the system that support some standardization and choice of interface is determined by the respective indices. Presents and discusses schemes of connections of the components of automatic control system through various channels, the principles of their use, the characteristics of each and the specifics of the work. The recommended decision on the selection of the types of data transmission lines, the characteristics of the channel and the technical interface device when designing multiplexed systems. The proposed concept of the control and basic control devices that involve the transfer of management of the system. Considered the most important operational characteristics of ship automatic control systems, including self diagnostics. Lists the hardware requirements for the organization of the multiplex channels. Formed a generalized block diagram of multiplex terminal channels with a detailed description of the used blocks. Also recommendations on issues of functional and physical division of the whole system when using the appropriate blocks. Proposed recommendations and concepts will allow you to find the best solution for the design and implementation of on-Board automatic control systems using multiplex and radial channels for organization of data transmission systems inter-module exchange.

Keywords: automatic control system, inter-unit exchange of information, the information exchange system, the channel interface, radial channel, multiplex channel, the controller, the concept of access control, the concept of the control unit, terminal of multiplex channels.

For citation:

Vasilchenko, Dmitrii S., and Anton E. Zhuravlev. "Organization of radial and multiplex channels in on-board automatic control systems." *Vestnik Gosudarstvennogo universiteta morskogo i rechnogo flota imeni admirala S.O. Makarova* 9.3 (2017): 628–636. DOI: 10.21821/2309-5180-2017-9-3-628-636.

УДК 629.05

ОРГАНИЗАЦИЯ РАДИАЛЬНЫХ И МУЛЬТИПЛЕКСНЫХ КАНАЛОВ В БОРТОВЫХ СИСТЕМАХ АВТОМАТИЧЕСКОГО УПРАВЛЕНИЯ

Д. С. Васильченко, А. Е. Журавлев

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

Целью данной статьи является поиск наиболее оптимального решения логической и аппаратной организации передачи данных межмодульного обмена в бортовых системах автоматического управления. Рассмотрены и выделены наиболее реализуемые каналы для межмодульного обмена данными, использующиеся при построении и реализации систем автоматического управления. Описан подход, применяемый при построении систем автоматического управления, учитывающий специфику модулей, проблемы аппаратной организации и характеристики системы, поддерживающий определённую стандартизацию и выбор интерфейса, определяемый соответствующими показателями. Представлены и описаны схемы связей компонентов автоматической системы управления с помощью различных каналов, принципы их использования, характерные особенности каждого и специфика работы. Рекомендованы решения по вопросам выбора типов линий передачи информации, характеристикам канала и вида технического устройства

сопряжения при проектировании мультиплексированных систем. Предложены концепции управляющего и базового устройств управления, которые предусматривают передачу управления системой. Рассмотрены основные наиболее важные эксплуатационные показатели судовых систем автоматического управления, включая самодиагностику. Перечислены требования к аппаратным средствам для организации мультиплексных каналов. Сформирована обобщённая структурная схема терминала мультиплексных каналов с подробным описанием использованных блоков. Также представлены рекомендации по решению вопросов функционального и физического деления всей системы в целом при использовании соответствующих блоков. Эти рекомендации и концепции позволяют найти наиболее оптимальное решение при проектировании и реализации бортовых систем автоматического управления, используя радиальные и мультиплексные каналы для организации систем передачи данных межмодульного обмена.

Ключевые слова: система автоматического управления, межблочный обмен информацией, система обмена информацией, интерфейс канала, радиальный канал, мультиплексный канал, контроллер, концепция управления доступом, концепция управляющего устройства, терминал мультиплексных каналов.

Для цитирования:

Васильченко Д. С. Организация радиальных и мультиплексных каналов в бортовых системах автоматического управления / Д. С. Васильченко, А. Е. Журавлев // Вестник Государственного университета морского и речного флота имени адмирала С. О. Макарова. — 2017. — Т. 9. — № 3. — С. 628–636. DOI: 10.21821/2309-5180-2017-9-3-628-636.

Введение

В настоящее время проектирование сложных систем в высокой степени определяется уровнем интеллектуальности, результаты которой способствуют проектированию систем, функционирующих в различных условиях. Основой систем автоматического управления является вычислительная подсистема, обеспечивающая координацию и взаимодействие всех элементов, модулей и блоков.

В настоящее время широко применяются системы автоматического управления, построенные на основе микропроцессорных систем, при создании которых необходимо осуществить организацию информационных систем, использующих цифровую информацию. Вне зависимости от класса, системы автоматического управления характеризуются жёсткими требованиями по надёжности и высокой интенсивности межблочного обмена информацией. В качестве блоков выступают различные компьютерные системы, исполнительные механизмы, блоки и системы сбора и обработки информации.

При детальном рассмотрении с точки зрения организации межмодульного обмена информацией с этими системами много общего имеют судовые системы, где в качестве модулей используются датчики кормовых рулей, угла дрейфа, носовых рулей, угловых скоростей, обратной связи исполнительных механизмов, устройства спутниковой навигации, блоки сбора информации датчиков, контроллеры и другие устройства. Низкая помехозащищённость и интенсивность обмена информацией являются значимыми показателями при построении распределённых систем. В таких системах очень часто используются радиальные и мультиплексные каналы межмодульного обмена данными. При создании мультиплексного канала проектируется и реализуется определённая элементная база, в отличие от радиального. Также разработка аппаратно-программных систем, предназначенных для организации мультиплексных каналов, производится с помощью унифицированных типов связей и параметров каналов обмена информацией, которые подвергаются стандартизации.

Методы и материалы

Необходимость построения систем автоматического управления [1], включающих модули с особенностями использования физической среды и различными требованиями к связям для взаимодействия, привела к созданию многоуровневых информационных систем. Физическая среда образована с использованием материала, чьи свойства обеспечивают распространение информационных сигналов. На основе физической среды создаётся канал — совокупность физической сре-

ды и каналообразующих средств (например, контроллеров), связывающих модули одного уровня друг с другом. При необходимости повышения надёжности, живучести и пропускной способности модулей одного уровня иерархии могут связываться не одним, а несколькими каналами обмена. Совокупность каналов обмена информацией определённого уровня образует систему обмена информацией, объединяющую модули в единую систему на определённом уровне иерархии, являясь центральным компонентом этой системы.

Характерной особенностью создания современных систем автоматического управления является широкая унификация технических решений модулей всех конструктивных уровней и, в первую очередь, унификация внутрисприборных и внешних интерфейсов приборов и модулей [2]. Этот подход должен учитывать как специфику приборов и модулей, накладывающую ряд ограничений на интерфейсы, так и главенствующую проблему сокращения оборудования каналов обмена, а также повышения надёжности и живучести систем. Стандартизации в интерфейсе обычно подлежат форматы информации, которая передаётся по каналам; состояния технических средств канала; состав и типы линий связи; параметры сигналов и другая информация.

Выбор интерфейса канала [3] определяется требуемой функциональной связанностью модулей с заданным быстродействием; высокой надёжностью передачи данных; долговечностью и износостойкостью оборудования; ремонтпригодностью; учётом возможности расширяемости системы; простотой конструктивных решений и минимизацией стоимости. Унифицированные интерфейсы связи с периферийными устройствами часто предоставляют разработчикам систем автоматического управления возможность использовать стандартное периферийное оборудование. Разрабатывается целый ряд стандартных плат сопряжения этих интерфейсов с внутрисприборным интерфейсом. Несравненно более сложную проблему представляет унификация каналов обмена между приборами и функциональными модулями. Здесь помимо обеспечения трафика и надёжности передачи приходится решать вопросы выбора оптимальной топологии связи [4] и стратегии управления передачей, форматов сообщений, средств и методов повышения помехо- и отказоустойчивости, а также обеспечения расширяемости систем автоматического управления.

Для большинства классов судов [5] комплексы систем автоматического управления характеризуются достаточно большой протяженностью линий связи, что связано с большими геометрическими размерами судов. При использовании радиальных каналов [6] межмодульного обмена информацией схема связей представлена на рис. 1. В этом случае для связей бортовой компьютерной системы, панели индикации информации групп датчиков и исполнительных механизмов используются каналы со скоростью передачи до 50 кбит/с. Спроектированная система передачи информации характеризуется наличием большого числа связей, что ведёт к большей массе и объёму, занимаемому проводами, а также затрудняет модернизацию оборудования судна.

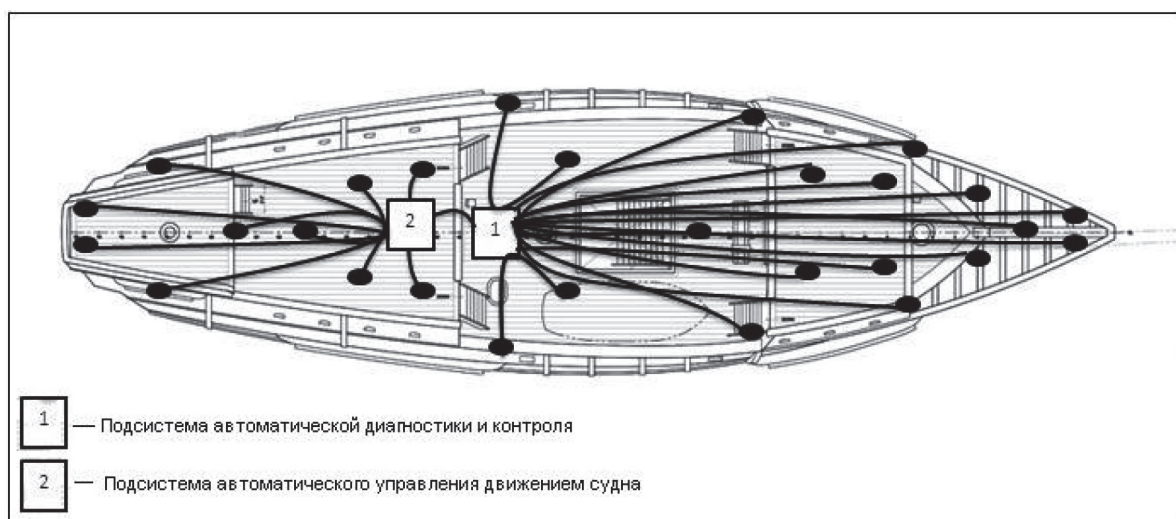


Рис. 1. Структура связей компонентов автоматической системы управления по радиальным каналам

Использование мультиплексных каналов [8] межмодульного обмена позволяет гибко комплексовать электронное оборудование судна, резко сокращая массу и общую длину проводов системы связи. В мультиплексных системах данные передаются со скоростью до 1 Мбит/с, что вполне удовлетворяет запросы комплексов судов. Для повышения живучести и сокращения физической длины мультиплексного канала обычно используются каналы правого и левого бортов, схема связи которых представлена на рис. 2. При этом для повышения надёжности и достоверности передачи данных, а также обеспечения безотказности работы оборудования судна каждый из каналов может резервироваться. Радиальные каналы позволяют строить системы на более простой элементной базе, а в ряде случаев их применение может оказаться более целесообразным для организации локальных связей.



Рис. 2. Структура связей компонентов автоматической системы управления по мультиплексным каналам

Специфика работы мультиплексных каналов бортовых систем по сравнению с радиальными каналами требует несколько иного подхода к организации управления доступом к каналу и определяется самими принципами функционирования бортовой системы [9]. Система централизованного управления использует единое устройство, обеспечивающее синхронизацию работы пользователей, — контроллер, передающий сигналы управления передачей или приёмом. Распределённое управление организует централизованный обмен данными, используя несколько контроллеров. Концепция управления доступом к каналу [10] в виде централизованного и распределённого принципа является достаточно эффективной, позволяя гибко реагировать на заданные или изменённые требования к потоку данных, обеспечивая простоту создания и, как вариант, возможность производить изменения с ограниченными устройствами.

Одним из важных факторов является уровень сложности обеспечения синхронизации. Доступная возможность передачи управления повышает способность системы сохранять свою работоспособность в аварийных условиях и эффективность использования канала. Также специфика мультиплексных каналов определяет выбор формы сообщений. Распространение получили сообщения с фиксированной длиной слова при пословной синхронизации. Информация, передаваемая бортовыми системами, является комбинацией данных, относящихся к управлению системой, и технических измерений. Мультиплексный канал пригоден как для осуществления управления бортовыми системами, так и для передачи данных бортовых систем.

Особое внимание при проектировании мультиплексированных систем уделяется вопросам выбора типов линий передачи информации, характеристикам канала и вида технического устройства сопряжения. Если некоторые характеристики канала — такие, как скорость переда-

чи информации по каналу и форматы информационных сообщений, — являются стандартными, то характеристики как тип используемых линий передачи информации и устройства взаимодействия в основном определяются спецификациями. Это позволяет использовать в разных системах различные линии передачи информации и технические средства канала, оставляя без изменения аппаратное и программное обеспечение систем управления.

Также при проектировании системы особое значение имеет выбор концепции управляющего устройства системы. Концепция базового устройства управления предполагает наличие в системе терминала, выполняющего функции контроллера. Управление передаётся резервному контроллеру в том случае, если отказал основной, причём инициализация резервного контроллера может быть проведена через дополнительные линии связи. Концепция нестационарного управляющего устройства означает, что в одном мультиплексном канале управление передачей информации могут последовательно осуществлять несколько контроллеров. Стандартом предусмотрен способ передачи управления от активного контроллера потенциальному через специальную команду. Эта команда извещает потенциальный контроллер о предложении передачи управления. Терминал через специальный разряд в ответном слове извещает текущий контроллер о приёме управления. Если терминал отказался от управления и разряд в ответном слове не установлен, инициализацию обмена в канале продолжает осуществлять текущий контроллер. Порядок и время передачи управления не ограничивается стандартом и устанавливается при проектировании системы.

Важными эксплуатационными показателями судовых систем автоматического управления являются живучесть, расширяемость и жизнестойкость [7]. Живучесть определяет способность системы сохранять функционирование при возможных отказах компонентов. Расширяемость позволяет осуществить увеличение функциональных характеристик системы без изменения аппаратных средств базовой модели за счёт модификации в минимальных объёмах состава технических средств. Жизнестойкость характеризуется возможностью продолжения выполнений судном основных задач при аварии в любом отсеке. Для обеспечения точности и достоверности выработки управляющими системами судна информации в течение всего времени плавания комплексы систем автоматического управления выполняются структурно-избыточными по составу функциональными модулями и должны обладать повышенной надёжностью и живучестью, устойчивостью к сбоям и отказам составляющих их компонентов.

Достоверность функционирования каждого функционального блока может обеспечиваться встроенными средствами самодиагностики. При возникновении отказов в таких модулях они должны изолироваться и восстанавливаться без нарушения взаимодействия между остальными функциональными модулями. При невозможности простого исключения отказавшего функционального модуля из обработки в системе автоматического управления должна быть произведена реконфигурация связей для передачи задач отказавшего функционального модуля резервному.

Организация мультиплексным каналом межмодульного обмена требует наличия специализированных аппаратных средств, которые осуществляют передачу сигналов по линиям передачи информации и выполнения определённых действий над информацией. Электронный модуль, предназначенный для сопряжения линий передачи информации с подсистемой, называют *терминалом мультиплексных каналов*. Этот модуль может быть выполнен в виде отдельного блока или встраиваться в подсистему. В зависимости от типа подсистемы и её назначения терминал может выполнять различный набор функций и работать в различных режимах. Обобщённая структурная схема терминала мультиплексных каналов, представленная на рис. 3, состоит из аналогового блока приёма / передачи, блока обработки бита / слова / сообщения и блока связи с подсистемой.

Аналоговый блок приёма / передачи необходим для сопряжения цифровой логики с линиями передачи информации и выполняет функцию фильтра для принимаемого сигнала. Осуществляется подавление шума низкого уровня и формируется уровень сигнала, используемый в цифровых

схемах системы. Аналоговый блок передачи обеспечивает необходимые для передачи по информационному каналу параметры сигналов. Для исключения возможной неуправляемой генерации в мультиплексных каналах предусматривается функция блокировки после определённого времени передачи.

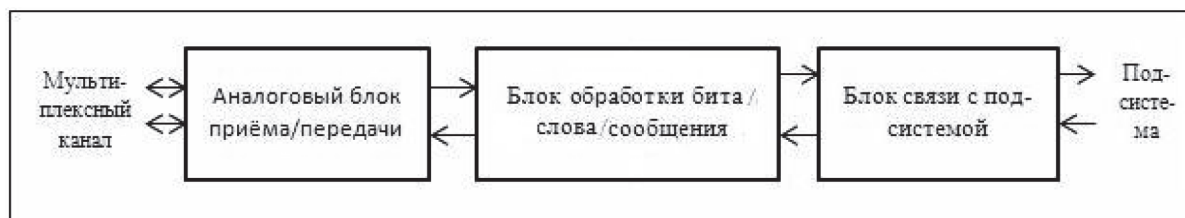


Рис. 3. Структура взаимодействия подсистемы с мультиплексным каналом

Блок обработки бита / слова / сообщения необходим для выполнения действий над разрядами и словами потока информации, передаваемыми в мультиплексных каналах и принимаемыми из него [11]. Приёмная часть блока осуществляет побитный приём поступающей информации и дешифрует её, используя для измерения временных интервалов генератор синхроимпульсов. Осуществляется распознавание типа синхроимпульса и идентифицируются командные и информационные слова. Осуществляется контроль числа битов в слове и чётность. Часть блока, которая предназначена для передачи бита / слова, включает в себя логику формирования ответного и информационного слова, включая генерацию синхросигнала и разряда чётности. Этот блок может быть реализован различными способами. Также в этом блоке осуществляется контроль информации, передаваемой в мультиплексных каналах, и управление работой терминала. Происходит декодирование информационного содержания слов и сообщений, которое используется в целях управления потоком информации между терминалом и подсистемой. В зависимости от режима работы терминал может выполнять различный объём задач. При работе в качестве объекта управления функциями блока являются: дешифрация и маскирование командного слова; исполнение команд по управлению, предназначенных для аппаратных средств терминала; подсчёт числа передаваемых или принимаемых слов; контроль временных интервалов и пауз; управление передачей и приёмом данных.

Блок связи с подсистемой реализует заложенный в устройстве принцип двухсторонней передачи данных подсистемы и терминала. В зависимости от задач, решаемых аппаратурой терминала, интерфейс может быть реализован через простой асинхронный обмен данными по параллельной шине или включать в себя процедуры прерывания управляющего процессора, прямой доступ в системную память и буферизацию сообщений.

В некоторых случаях определённую трудность вызывает вопрос функционального и физического деления аппаратуры на терминал и подсистему. Если терминал является отдельным быстросменным блоком и реализует все функции, неопределённости нет, так как функциональное деление совпадает с физическим. Связь терминал-подсистема становится более неопределённой, если терминал входит в состав элементов подсистем. В этом случае трудно провести границу их физического деления. Например, если терминал встраивается в компьютерную систему общего значения, функции аналогового блока и блока обработки слова могут быть реализованы аппаратно в виде отдельных интерфейсных плат компьютерной системы, а обработка сообщения может осуществляться универсальными вычислительными средствами и являться частью программного обеспечения. По определению терминал должен осуществлять сопряжение линий передачи информации с подсистемой, и поскольку он реализует эту задачу только в том случае, когда выполняются все необходимые функции, часть основного программного обеспечения может стать частью терминала. Физическое деление в этом случае становится невозможным. Такая ситуация является довольно распространённой для реальной мультиплексной аппаратуры. Независимо от того, является ли интерфейс стандартной или заказной конструкцией, некоторые

функции терминала почти всегда размещены в подсистеме пользователя. При рассмотрении реальных примеров аппаратных средств необходимо чётко разделять физический интерфейс, связывающий аппаратные средства с подсистемой, и функциональный интерфейс, который может оказаться нереализуемым.

Результаты

В процессе изучения и анализа предлагаемых вниманию каналов связи подчеркнута необходимость их широкого применения в бортовых системах автоматического управления, построенных на основе микропроцессоров. Сформулированы обоснования для использования и организации рассматриваемых каналов в локальных и глобальных системах передачи цифровой информации. При исследовании рассмотрены основные вопросы, связанные с проблемой организации систем межмодульного обмена информацией и предложены варианты их решения. Предложенная схема взаимодействия подсистемы с мультиплексным каналом, детализированная до блоков, позволяет оценить, проанализировать функциональные возможности и принять решение о возможном использовании в проектируемой или существующей системе.

Обсуждение

Рассмотрены вопросы организации бортовых систем автоматического управления на основе мультиплексных и радиальных каналов. Приведены примеры организации обмена данными устройств, подключаемых к перечисленным каналам. Результаты анализа и исследования практичны и реализуемы. Все аспекты организации систем автоматического управления рассматриваются по отношению к организации процессов межмодульного обмена информацией, поэтому некоторые проблемы не затронуты. В дальнейшем предполагается учитывать определённые характеристики каналов и их классификацию для последующего использования в узко специализирующихся системах, обеспечивающих работу среды передачи информации. Также является актуальной задача управления передачей информации в рассматриваемых каналах, для решения которой планируется провести ряд экспериментальных работ.

Заключение

Развитие бортовых радиоэлектронных систем актуальнее базировать на гибком подходе, предусматривающем использование радиальных каналов для организации локальных систем передачи данных, а развитие мультиплексных систем — для построения глобальных каналов межмодульного обмена информацией. Исторически сложилась практика широкого применения на судах радиальных каналов различных стандартов, но в настоящее время актуальным становится интенсивное внедрение мультиплексных каналов, которые обладают рядом преимуществ:

- большой пропускной способностью;
- усовершенствованными возможностями адресации блоков данных;
- более гибкой структурой.

При разработке различных типов систем автоматического управления перед разработчиком в числе основных проблем стоит рациональная организация их интерфейсов межмодульного обмена информацией. Единство требований по надёжности и скорости обмена информацией приводит к использованию единых стандартов при организации этих подсистем.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Волков С. В. Система автоматического контроля и управления параметрами объекта / С. В. Волков, А. С. Колдов, О. В. Захарова, В. С. Чапаев // Тр. Междунар. симпозиума «Надёжность и качество». — Пенза, 2014. — Т. 2. — С. 91–93.
2. Рунев А. Ю. Использование промышленных технологий для построения автоматизированных систем управления связью / А. Ю. Рунев, В. А. Бабошин, Ю. М. Шерстюк, А. В. Шестаков // Автоматизация процессов управления. — 2015. — № 4 (42). — С. 41–51.

3. Тужилкин А. С. Интерфейс канала связи перспективной бортовой информационной сети / А. С. Тужилкин // Материалы XIX Всерос. науч.-техн. конф. студентов, молодых ученых и специалистов «Новые информационные технологии в научных исследованиях и в образовании «НИТ 2014»». — Рязань, 2014. — С. 87–88.
4. Псурцев Н. Ю. Обеспечение целостности и устойчивого функционирования сети связи / Н. Ю. Псурцев, Е. Н. Щербакова // Сб. тр. X Междунар. отрасл. науч.-техн. конф. «Технологии информационного общества». — М., 2016. — С. 384–385.
5. Костылев И. И. Зарубежное судостроение. Состояние и тенденции / И. И. Костылев, М. К. Овсянников // Вестник Государственного университета морского и речного флота имени адмирала С. О. Макарова. — 2013. — № 3 (22). — С. 66–70.
6. Богатырев В. А. Оптимальное резервирование агрегированных радиальных каналов / В. А. Богатырев, А. В. Осипов // Научно-технический вестник информационных технологий, механики и оптики. — 2013. — № 4 (86). — С. 149–150.
7. Паринов А. В. Управление живучестью автоматизированной информационной системы инновационного характера / А. В. Паринов // Вестник Воронежского института ФСИИ России. — 2014. — № 4. — С. 55–58.
8. Колосков В. Л. Приложение для обработки командных слов, переданных через мультиплексный канал передачи данных / В. Л. Колосков, И. Ю. Павлов, Е. Б. Иванов // Новые информационные технологии в автоматизированных системах. — 2016. — № 19. — С. 321–322.
9. Нечаев Ю. И. Мультиагентная система управления функционированием бортового вычислительного комплекса / Ю. И. Нечаев, А. В. Лютин // Журнал международной конференции по мягким вычислениям и измерениям. — 2011. — Т. 2. — С. 64–68.
10. Ковальков Д. А. Управление каналом случайного множественного доступа без контроля несущей / Д. А. Ковальков // Методы и устройства передачи и обработки информации. — 2009. — № 11. — С. 352–357.
11. Колосков В. Л. Мультиплексный канал передачи данных. Приложение для обработки командных слов / В. Л. Колосков, И. Ю. Павлов // Материалы конференции межвузовской научно-технической конференции студентов, аспирантов и молодых специалистов им. Е. В. Арменского. — М., 2016. — С. 91.

REFERENCES

1. Volkov, S. V., A. S. Koldov, O. V. Zakharova, and V. S. Chapaev. "Sistema avtomaticheskogo kontrolya i upravleniya parametrami ob'ekta." *Trudy mezhdunarodnogo simpoziuma «Nadezhnost' i kachestvo»* 2 (2014): 91–93.
2. Runeev, Anatolii Iurevich, Vladimir Aleksandrovich Baboshin, Iurii Mikhailovich Sherstyuk, and Aleksandr Viktorovich Shestakov. "Using industrial technologies for the purpose of designing automated communications control systems." *Automation of Control Processes* 4(42) (2015): 41–51.
3. Tuzhilkin, A. S. "Interfeis kanala svyazi perspektivnoi bortovoi informatsionnoi seti." *Materialy XIX Vserossiiskoi nauchno-tekhnicheskoi konferentsii studentov, molodykh uchennykh i spetsialistov*. 2014: 87–88.
4. Psurtsev, N. Yu., and E. N. Shcherbakova. "Obespechenie tselostnosti i ustoichivogo funktsionirovaniya seti svyazi." *Sbornik trudov X Mezhdunarodnoi otraslevoi nauchno-tekhnicheskoi konferentsii*. 2016: 384–385.
5. Kostylev, I. I., and M. K. Ovsyannikov. "Contemporary marine shipbuilding. Status and tendencies." *Vestnik Gosudarstvennogo universiteta morskogo i rechnogo flota imeni admirala S.O. Makarova* 3(22) (2013): 66–70.
6. Bogatyrev, Vladimir, and Andrey Osipov. "Optimal reservation of aggregated radial channels." *Scientific and Technical Journal of Information Technologies, Mechanics and Optics* 4(86) (2013): 149–150.
7. Parinov, A. V. "Upravlenie zhivuchest'yu avtomatizirovannoi informatsionnoi sistemy innovatsionnogo kharaktera." *Vestnik Voronezhskogo instituta FSIN Rossii* 4 (2014): 55–58.
8. Koloskov, V. L., I. Yu. Pavlov, and E. B. Ivanov. "Prilozhenie dlya obrabotki komandnykh slov, peredannykh cherez mul'tipleksnyi kanal peredachi dannykh." *Novye informatsionnye tekhnologii v avtomatizirovannykh sistemakh* 19 (2016): 321–322.
9. Nechaev, Yu. I., and A. V. Lyutin. "Mul'tiagentnaya sistema upravleniya funktsionirovaniem bortovogo vychislitel'nogo kompleksa." *Zhurnal mezhdunarodnoi konferentsii po myagkim vychisleniyam i izmereniyam* 2 (2011): 64–68.

10. Koval'kov, D. A. "Upravlenie kanalom sluchainogo mnozhestvennogo dostupa bez kontrolya nesushchei." *Metody i ustroistva peredachi i obrabotki informatsii* 11 (2009): 352–357.

11. Koloskov, V. L., and I. Yu. Pavlov. "Mul'tipleksnyi kanal peredachi dannykh. Prilozhenie dlya obrabotki komandnykh slov." *Materialy konferentsii mezhvuzovskoi nauchno-tekhnicheskoi konferentsii studentov, aspirantov i molodykh spetsialistov im. E.V. Armenskogo*. 2016: 91.

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

Васильченко Дмитрий Сергеевич —

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

Журавлев Антон Евгеньевич —

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

INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Vasilchenko, Dmitrii S. —

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

Zhuravlev, Anton E. —

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

Статья поступила в редакцию 27 апреля 2017 г.

Received: April 27, 2017.

DOI: 10.21821/2309-5180-2017-9-3-637-644

IDENTIFICATION OF THE PARAMETERS OF THE RELUCTANCE MOTOR WITH ANISOTROPIC MAGNETIC CONDUCTIVITY OF ROTOR

V. F. Samoseyko¹, S. V. Sharashkin^{1, 2}, F. A. Gelver^{1, 2}

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

² — Krylov State Research Centre, St. Petersburg, Russian Federation

The work describes algorithm identification parameters of the reluctance motor with anisotropic magnetic conductivity of rotor. The different types of electrical motors for ship propulsion system, given their advantages and disadvantages were considered. The advantages of reluctance motor with anisotropic magnetic conductivity of the rotor are given in the construction of propulsion systems. Such machines can successfully compete with electric motors, the excitation of which is carried out by permanent magnets, both in terms of energy characteristics and mass dimensions. The article describes a technique based on an analytical description of voltages and currents in stator windings, allowing to identifying the parameters characterizing the dynamics of electromagnetic processes in a reluctance motor with anisotropic magnetic conductivity of rotor. In the analysis of equations with periodically changing coefficients, the results of the Lyapunov-Floquet theory and the transformation to equations with constant coefficients were used. To identify the parameters of an electric machine with anisotropic magnetic conductivity of the rotor, quadratic integral functional are introduced. Estimates of the parameters found by the proposed method are optimal when considering them from the standpoint of given quadratic integral functional. The proposed algorithm for identifying the parameters of a reluctance motor with anisotropic magnetic conductivity of rotor allows one to find parameter estimates directly in the process of functioning of an electric machine and, consequently, can be used to construct adaptive control systems, and also to study various operating modes of a reluctance motor with anisotropic magnetic conductivity of rotor. Describes a model illustrating the algorithm for identifying the parameters of a reactive motor is given, which makes it possible to determine the longitudinal inductance of its windings. The developed algorithm for determining the parameters of a reactive electric machine with an anisotropic magnetic conductivity of the rotor makes it possible to create highly accurate control systems for the electric drive of electromotive systems.

Keywords: Reluctance motor, anisotropic magnetic conductivity, automatic identification of parameters, control algorithm, ripple inductance, periodic coefficients, quadratic integral functional, coefficient matrices, magnetization current.

For citation:

Samoseyko, Veniamin F., Sergei V. Sharashkin, and Fedor A. Gel'ver. "Identification of the parameters of the reluctance motor with anisotropic magnetic conductivity of rotor." *Vestnik Gosudarstvennogo universiteta morskogo i rechnogo flota imeni admirala S.O. Makarova* 9.3 (2017): 637–644. DOI: 10.21821/2309-5180-2017-9-3-637-644.

УДК 621

ИДЕНТИФИКАЦИЯ ПАРАМЕТРОВ РЕАКТИВНОГО ЭЛЕКТРОДВИГАТЕЛЯ С АНИЗОТРОПНОЙ МАГНИТНОЙ ПРОВОДИМОСТЬЮ РОТОРА

В. Ф. Самосейко¹, С. В. Шарашкин^{1, 2}, Ф. А. Гельвер^{1, 2}

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

² — ФГУП «Крыловский государственный научный центр»,
г. Санкт-Петербург, Российская Федерация

Статья посвящена разработке алгоритма автоматической идентификации параметров реактивной электрической машины с анизотропной магнитной проводимостью ротора. Рассматриваются основные достоинства и недостатки синхронных электродвигателей при построении систем электропривода судов. Приводятся преимущества реактивных машин с анизотропной магнитной проводимостью ротора при построении гребных электрических установок. Такие машины могут успешно конкури-

ровать с электрическими двигателями, возбуждение которых осуществляется постоянными магнитами как по энергетическим характеристикам, так и массогабаритных показателям. В статье приводится методика, основанная на аналитическом описании напряжений и токов в статорных обмотках, позволяющая идентифицировать параметры характеризующие динамику электромагнитных процессов в реактивных двигателях с анизотропной магнитной проводимостью ротора. При анализе уравнений с периодически меняющимися коэффициентами были использованы результаты теории Ляпунова–Флоке и выполнено преобразование к уравнениям с постоянными коэффициентами. Для идентификации параметров электрической машины с анизотропной магнитной проводимостью ротора введены квадратичные интегральные функционалы. Оценки параметров, найденные предложенным методом, являются оптимальными при рассмотрении их с позиций заданных квадратичных интегральных функционалов. Предложенный алгоритм идентификации параметров реактивной машины позволяет находить оценки параметров непосредственно в процессе функционирования электрической машины а, следовательно, может быть использован для построения адаптивных систем управления, а также для исследования различных режимов работы реактивного электродвигателя с анизотропной магнитной проводимостью ротора. Приведена модель, иллюстрирующая алгоритм идентификации параметров реактивного электродвигателя, позволяющая определять продольную индуктивность его обмоток. Разработанный алгоритм определения параметров реактивной электрической машины с анизотропной магнитной проводимостью ротора позволяет создавать высокоточные системы управления электроприводом систем электродвижения.

Ключевые слова: реактивная электрическая машина, анизотропная магнитная проводимость, идентификация параметров машины, алгоритм управления, пульсации индуктивности, периодические коэффициенты, квадратичные интегральные функционалы, матрицы коэффициентов, ток намагничивания.

Для цитирования:

Самосейко В. Ф. Идентификация параметров реактивного электродвигателя с анизотропной магнитной проводимостью ротора / В. Ф. Самосейко, С. В. Шарашкин, Ф. А. Гельвер // Вестник Государственного университета морского и речного флота имени адмирала С. О. Макарова. — 2017. — Т. 9. — № 3. — С. 637–644. DOI: 10.21821/2309-5180-2017-9-3-637-644.

Введение

В настоящее время вопрос построения систем электродвижения судов является актуальным, при этом большая часть разработчиков отдает предпочтение в выборе приводного электродвигателя синхронным электрическим машинам, поскольку этот тип двигателей является наиболее перспективным [1] – [4]. На сегодняшний день синхронные двигатели с возбуждением от постоянных магнитов обладают наилучшими энергетическими характеристиками и наименьшими габаритами. При этом они имеют ряд недостатков: невозможность снятия магнитного поля с ротора, что может приводить к аварийным ситуациям; необходимость обеспечения защиты от металлической пыли, которая притягивается к ротору и может привести к заклиниванию ротора и искажению симметрии магнитной системы; возможность размагничивания магнитов при низких температурах [5] – [7].

Реактивные двигатели с анизотропной магнитной проводимостью ротора [5], [8], [9] могут успешно конкурировать с электрическими машинами, возбуждение которых осуществляется постоянными магнитами как по энергетическим характеристикам, так и по массогабаритным показателям. Для формирования алгоритмов управления реактивными двигателями с анизотропной магнитной проводимостью ротора, а также для исследования их свойств необходимо знать параметры данных двигателей, характеризующие динамику протекающих в них процессов. Подробно эти исследования были опубликованы П. Эйхоффом в монографии 1975 г. «Основы идентификации систем управления» (1975 г.), Н. С. Райбманом в работе (1981 г.) «Дисперсионная идентификация», а также в публикациях [10], [11]. В данной статье приводится методика, позволяющая идентифицировать параметры, характеризующие динамику электромагнитных процессов в реактивных электрических машинах с анизотропной магнитной проводимостью ротора.

Методы и материалы

Динамика электромагнитных процессов в электрических машинах характеризуется уравнениями фазных напряжений в ее обмотках. У реактивных электрических машин индуктивности

обмотки статора пульсируют вследствие анизотропной магнитной проводимости ротора. Таким образом, уравнения напряжений, записанные в естественной системе координат, имеют индуктивности, которые пульсируют в функции угла поворота ротора. Анализировать уравнения с периодически меняющимися коэффициентами достаточно проблематично. Поэтому для их анализа принято использовать результаты теории Ляпунова–Флоке и преобразовывать уравнения с периодическими коэффициентами к уравнениям с постоянными коэффициентами.

Для этого на поперечном разрезе ротора вводится система координат d, q , ось d которой совпадает с направлением наибольшей магнитной проводимости, а ось q — наименьшей. Уравнения в преобразованных осях координат d, q обычно записываются без учета влияния магнитопровода и имеют следующий вид [5], [12], [13] – [15]:

$$\begin{aligned} u_d &= R \cdot i_d - \omega \cdot L_q \cdot i_q + L_d \cdot p i_d; \\ u_q &= R \cdot i_q + \omega \cdot L_d \cdot i_d + L_q \cdot p i_q, \end{aligned}$$

где R — электрическое сопротивление обмотки статора; L_d и L_q — соответственно полная продольная и поперечная индуктивности машины по осям координат d, q .

Влияние магнитопровода проявляется в дополнительных потерях электроэнергии. Эти потери могут быть учтены путем введения дополнительных сопротивлений в уравнении машины. Поэтому далее для идентификации параметров машины полагается, что сопротивления по осям d, q различны и уравнения напряжений на обмотках ротора в осях координат d, q имеют следующий вид:

$$\begin{aligned} u_d &= R_d \cdot i_d - \omega \cdot L_q \cdot i_q + L_d \cdot p i_d; \\ u_q &= R_q \cdot i_q + \omega \cdot L_d \cdot i_d + L_q \cdot p i_q. \end{aligned} \quad (1)$$

Согласно данным уравнениям, параметрами машины являются R_d, R_q — сопротивления обмотки статора по продольной и поперечной осям, а также L_d и L_q — полная продольная и поперечная индуктивности машины. Будем полагать, что данная совокупность параметров R_d, R_q, L_d, L_q известна с погрешностью, и будем ее оценивать по результатам наблюдений токов в процессе функционирования.

Полагается, что токи i_d и i_q — наблюдаемые переменные состояния, информация о которых поступает с датчиков токов. Напряжения u_d и u_q являются управляющими переменными, значения которых формируются системой управления. Таким образом, переменные состояния i_d и i_q динамической модели машины (1), а также напряжения u_d и u_q полагаются известными. Неизвестными в этой модели являются значения параметров R_d, R_q, L_d и L_q .

Используя уравнения напряжений (1), введем функции параметров:

$$\begin{aligned} \Delta u_d(R_d, L_d, L_q) &= u_d - R_d \cdot i_d + \omega \cdot L_q \cdot i_q - L_d \cdot p i_d; \\ \Delta u_q(R_q, L_d, L_q) &= u_q - R_q \cdot i_q - \omega \cdot L_d \cdot i_d - L_q \cdot p i_q. \end{aligned} \quad (2)$$

Данные функции являются также функциями времени t . Очевидно, что если модель адекватна, а параметры известны точно, то значения функции $\Delta u_d(R_d, L_d, L_q) = 0$ и $\Delta u_q(R_q, L_d, L_q) = 0$.

Для идентификации параметров модели (1) используем квадратичные интегральные критерии качества модели

$$J_d = \frac{1}{T} \cdot \int_t^{t+T} \Delta u_d^2(R_d, L_d, L_q) \cdot dt \quad \text{и} \quad J_q = \frac{1}{T} \cdot \int_t^{t+T} \Delta u_q^2(R_q, L_d, L_q) \cdot dt, \quad (3)$$

где T — интервал времени, существенно превосходящий наибольшую из постоянных времени машины $T_d = L_d/R_d$. В качестве параметров модели (1) будем принимать значения R_d и L_q , минимизирующие критерий качества модели J_d и значения R_q и L_d , минимизирующие функционал J_q .

Для нахождения параметров модели составим систему, состоящую из четырех уравнений идентификации параметров реактивной машины с анизотропной магнитной проводимостью ротора:

$$\begin{aligned}\frac{\partial J_d}{\partial R_d} &= -\frac{2}{T} \cdot \int_t^{t+T} \Delta u_d(R_d, L_d, L_q) \cdot i_d \cdot dt = 0; & \frac{\partial J_d}{\partial L_q} &= \frac{2}{T} \cdot \int_t^{t+T} \Delta u_d(R_d, L_d, L_q) \cdot \omega \cdot i_q \cdot dt = 0; \\ \frac{\partial J_q}{\partial R_d} &= -\frac{2}{T} \cdot \int_t^{t+T} \Delta u_q(R_d, L_d, L_q) \cdot i_q \cdot dt = 0; & \frac{\partial J_q}{\partial L_q} &= -\frac{2}{T} \cdot \int_t^{t+T} \Delta u_q(R_d, L_d, L_q) \cdot \omega \cdot i_d \cdot dt = 0.\end{aligned}\quad (4)$$

Если в выражениях (4) выполнить интегрирование с учетом функции параметров (2), то данные уравнения могут быть представлены в виде системы линейных алгебраических уравнений следующего вида:

$$\mathbf{A} \cdot \mathbf{X} = \mathbf{B}, \quad (5)$$

где

$$\mathbf{A} = \begin{bmatrix} A_{11} & 0 & A_{13} & A_{14} \\ A_{21} & 0 & A_{23} & A_{24} \\ 0 & A_{32} & A_{33} & A_{34} \\ 0 & A_{42} & A_{43} & A_{44} \end{bmatrix}; \quad \mathbf{X} = \begin{bmatrix} R_d \\ R_q \\ L_d \\ L_q \end{bmatrix}; \quad \mathbf{B} = \begin{bmatrix} B_1 \\ B_2 \\ B_3 \\ B_4 \end{bmatrix}. \quad (6)$$

Элементы матриц коэффициентов $\mathbf{A}$ и $\mathbf{B}$ определяются выражениями:

$$\begin{aligned}A_{11} &= \frac{1}{T} \cdot \int_t^{t+T} i_d^2 \cdot dt; & A_{13} &= \frac{1}{T} \cdot \int_t^{t+T} i_d \cdot di_d; & A_{14} &= -\frac{1}{T} \cdot \int_t^{t+T} \omega \cdot i_d \cdot i_q \cdot dt; \\ A_{21} &= -\frac{1}{T} \cdot \int_t^{t+T} \omega \cdot i_d \cdot i_q \cdot dt; & A_{23} &= -\frac{1}{T} \cdot \int_t^{t+T} \omega \cdot i_q \cdot di_d; & A_{24} &= \frac{1}{T} \cdot \int_t^{t+T} \omega^2 \cdot i_q^2 \cdot dt; \\ A_{32} &= \frac{1}{T} \cdot \int_t^{t+T} i_q^2 \cdot dt; & A_{33} &= \frac{1}{T} \cdot \int_t^{t+T} \omega \cdot i_d \cdot i_q \cdot dt; & A_{34} &= \frac{1}{T} \cdot \int_t^{t+T} i_q \cdot di_q; \\ A_{42} &= \frac{1}{T} \cdot \int_t^{t+T} \omega \cdot i_d \cdot i_q \cdot dt; & A_{43} &= \frac{1}{T} \cdot \int_t^{t+T} \omega^2 \cdot i_d^2 \cdot dt; & A_{44} &= \frac{1}{T} \cdot \int_t^{t+T} \omega \cdot i_d \cdot di_q; \\ B_1 &= \frac{1}{T} \cdot \int_t^{t+T} u_d \cdot i_d \cdot dt; & B_2 &= \frac{1}{T} \cdot \int_t^{t+T} \omega \cdot u_d \cdot i_q \cdot dt; & B_3 &= \frac{1}{T} \cdot \int_t^{t+T} u_q \cdot i_q \cdot dt; & B_4 &= \frac{1}{T} \cdot \int_t^{t+T} \omega \cdot u_q \cdot i_d \cdot dt.\end{aligned}\quad (7)$$

Если положить, что матрица $\mathbf{A}$ невырожденная, то решение системы уравнений (5) относительно вектора параметров в матричном виде

$$\mathbf{X} = \mathbf{A}^{-1} \cdot \mathbf{B}. \quad (8)$$

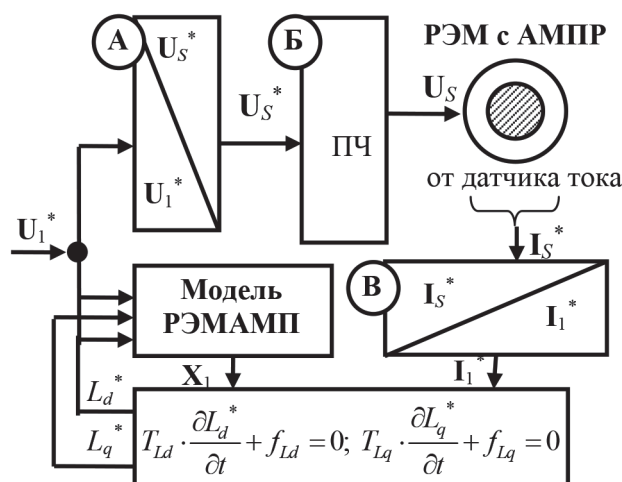
В развернутом виде решение системы уравнений (5) относительно параметров R_d, R_q, L_q, L_d не приводится ввиду его громоздкости. Заметим, что элементы матриц коэффициентов $\mathbf{A}$ и $\mathbf{B}$ вычисляются как скользящее среднее. Следовательно, параметров R_d, R_q, L_q, L_d будут также функциями времени t . Время, затрачиваемое на вычисление параметров, определяется периодом усреднения T . Если идентифицируемый объект отличается от модели, то период усреднения T целесообразно выбирать, руководствуясь неравенством $T \geq T_d/2$, где $T_d = L_d/R_d$ — наибольшая постоянная времени модели.

Результаты

В результате проделанной работы была сформирована структурная схема, иллюстрирующая алгоритм идентификации продольной индуктивности обмоток статора реактивного элек-

тродвигателя с анизотропной магнитной проводимостью ротора. Применение вышеописанного алгоритма решения дифференциального уравнения настройки угла положения ротора позволяет получать информацию о параметрах обмоток в процессе работы электропривода. Получены алгоритмы идентификации параметров в стационарном режиме работы и в режиме стабилизации тока намагничивания, что особенно важно при построении систем управления реактивными электрическими машинами.

Иллюстрация алгоритма идентификации продольной индуктивности обмотки статора приведена на рисунке.



Алгоритм идентификации продольной индуктивности обмотки статора:

A — алгоритм преобразования координат; B — преобразователь частоты;

B — алгоритм решения дифференциального уравнения настройки угла положения ротора;

x_d, x_q — элементы вектора $X1$; i_d^*, i_q^* — элементы вектора I_1^*

Обсуждение

Для идентификации параметров реактивной электрической машины с анизотропной магнитной проводимостью был получен следующий алгоритм. Стационарный режим работы характеризуется равенствами $p i_d = 0, p i_q = 0$ в динамической модели машины (1). В этом режиме коэффициенты $A_{13}=A_{23}=A_{34}=A_{44}=0$ и матрица коэффициентов A уравнения идентификации параметров (8) вырождается. Матрицы A^{-1} обратной матрицы A в стационарном режиме работы машины не существует. Для сингулярной матрицы A существуют методы задания псевдообратной матрицы A^+ (метод регуляризации Тихонова, описанный в работах А. Н. Тихонова, В. Я. Арсенина «О некорректных задачах линейной алгебры и устойчивом методе их решения» 1965 г., Дж. Форсайта, М. Малькольма и К. Моулера «Машинные методы математических вычислений» 1980 г., а также метод сингулярного разложения, изложенный в трудах Я. З. Цыпкина «Информационная теория идентификации» (1995 г.) и П. Эйкхоффа «Основы идентификации систем управления» (1975 г.)). Однако однозначно определить всю совокупность параметров идентификации X невозможно. В случае стационарного режима ранг матрицы A равен двум. Следовательно, однозначно можно определить лишь два параметра из четырех, если другие два параметра заданы.

Для непрерывной идентификации параметров во всех режимах функционирования электрической машины необходимо контролировать определитель матрицы A и сравнивать его с точностью вычислений ε . Условие $\det(A) > \varepsilon$ характеризует наличие динамики вектора переменных состояния объекта. В этом случае значения вектора параметров X определяются по формуле (5). Если $\det(A) \leq \varepsilon$, то следует сохранять значения вектора параметров X , определенные ранее при выполнении условия $\det(A) > \varepsilon$.

Для идентификации параметров электродвигателя в наиболее распространенном режиме стабилизации тока намагничивания получен ранее описанный алгоритм. В этом режиме система

автоматического управления поддерживает постоянство тока намагничивания i_d . В данном режиме работы коэффициенты $A_{13}=A_{23}=0$. Можно показать, что при наличии динамики переменной i_q динамической модели машины (1) матрица коэффициентов A уравнения идентификации параметров не вырождается, что позволяет оценивать всю совокупность параметров динамической модели машины. Однако следует заметить, что скорость протекания динамических процессов в поперечном контуре достаточно высока. Поэтому период усреднения T целесообразно выбирать, руководствуясь неравенством $T \geq T_q/2$, где $T_q = L_q/R_q$ — наименьшая постоянная времени модели.

Заключение

Предложенный алгоритм идентификации параметров реактивной электрической машины с анизотропной магнитной проводимостью ротора позволяет находить оценки параметров непосредственно в процессе функционирования машины. Оценки параметров, найденные этим методом, являются оптимальными при рассмотрении их с позиций выбранных квадратичных интегральных функционалов (3), они минимизируют интегральный квадратичный критерий отклонения переменных состояния реактивной машины с анизотропной магнитной проводимостью ротора от его модели. Алгоритм идентификации работает только при наличии динамики переменных состояния объекта и сохраняет значения параметров, полученные значения в стационарных режимах функционирования. Он может применяться для построения адаптивных систем управления, корректирующих параметры регуляторов в процессе функционирования электропривода, а также для исследования режимов работы реактивной электрической машины с анизотропной магнитной проводимостью ротора.

Разработанный алгоритм идентификации параметров реактивной электрической машины с анизотропной магнитной проводимостью ротора позволяет создавать высокоточные системы управления электропривода систем электродвижения, что особенно важно при построении современных электроприводов.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Григорьев А. В. Судовая система электродвижения нового поколения / А. В. Григорьев // Морской флот. — 2012. — № 2. — С. 38–40.
2. Васин И. М. Особенности создания гребного автоматизированного электропривода для судов с электродвижением ледового класса / И. М. Васин // Труды VIII Международной (XIX Всероссийской) конференции по автоматизированному электроприводу АЭП-2014. — Саранск: Нац. исследовательский Мордовский гос. ун-т им. Н. П. Огарёва, 2014. — С. 458–462.
3. Мустафа Г. М. Преобразователь частоты для гребного электродвигателя / Г. М. Мустафа, С. В. Волков, А. А. Ершов [и др.] // Электротехника. — 2014. — № 1. — С. 46–53.
4. Григорьев М. А. Система импульсно-векторного управления синхронным реактивным электродвигателем с независимым управлением по каналу возбуждения. / М. А. Григорьев, А. Н. Шишков, Е. В. Белосусов [и др.] // Научная дискуссия: вопросы технических наук. — 2015. — №5-6. — С. 110–116.
5. Самосейко В. Ф. Синхронные машины с анизотропной магнитной проводимостью ротора. Методика проектирования. Алгоритмы управления / В. Ф. Самосейко, Ф. А. Гельвер, В. А. Хомяк [и др.]. — СПб.: Крыловский государственный научный центр, 2016. — 174 с.
6. Hofmann H. H. High-speed synchronous reluctance machine with minimized rotor losses. / H. H. Hofmann, S.R. Sanders // IEEE Transactions on Industry Applications. — 2000. — Vol. 36. — Is. 2. — Pp. 531–539. DOI: 10.1109/28.833771.
7. Пат. 2603200 Российская Федерация, МПК Н 02 К 1/24, Н 02 К 37/04. Синхронный электрический двигатель с анизотропной магнитной проводимостью ротора / В. А. Хомяк, В. Ф. Самосейко, С. В. Шарашкин, Ф. А. Гельвер; заявитель и патентообладатель Федеральное государственное унитарное предприятие «Крыловский государственный научный центр». — № 2015140439/07; заявл. 22.09.2015; опубл. 27.11.2016, Бюл. № 33.
8. Самосейко В. Ф. Теоретические основы управления электроприводом: учеб. пособие / В. Ф. Самосейко. — СПб.: Элмор, 2007. — 464 с.

9. Самосейко В. Ф. Управление гребным реактивным электродвигателем с анизотропной магнитной проводимостью ротора / В. Ф. Самосейко, С. В. Шарашкин // Вестник Государственного университета морского и речного флота имени адмирала С. О. Макарова. — 2017. — Т. 9. — № 2. — С. 390–401. DOI: 10.21821/2309-5180-2017-9-2-390-401.

10. Sahoo S. K. Piece-wise polynomial based model for switched reluctance motor / S. K. Sahoo, S. K. Panda, J. X. Xu // Power and Energy Society General Meeting — Conversion and Delivery of Electrical Energy in the 21st Century 2008 IEEE. — IEEE, 2008. — Pp. 1–4. DOI: 10.1109/PES.2008.4596253.

11. Mir S. Fault-tolerant switched reluctance motor drive using adaptive fuzzy logic controller / S. Mir, M. S. Islam, T. Sebastian, I. Husain // IEEE Transactions on Power Electronics. — 2004. — Vol. 19. — Is. 2. — Pp. 289–295. DOI: 10.1109/TPEL.2003.823244.

12. Самосейко В. Ф. Перспективы использования реактивных электрических машин в электроприводе / В. Ф. Самосейко, Ф. А. Гельвер, И. В. Белоусов // Труды IX Международной (XX Всероссийской) конференции по автоматизированному электроприводу АЭП-2016. — Пермь: Пермский нац. исслед. политехнический ун-т, 2016. — С. 359–363.

13. DiRenzo M. T. Switched Reluctance Motor Control—Basic Operation and Example Using the TMS320F240 / M. T. DiRenzo // Texas Instruments, Digital Signal Processing Solutions, in SPRA420A-February. — 2000. — 62 p.

14. Germishuizen J. J. Performance comparison of reluctance synchronous and induction traction drivers for electrical multiple units / J. J. Germishuizen, F. S. Van der Merwe, K. Van der Westhuizen, M. J. Kamper // Industry Applications Conference, 2000. Conference Record of the 2000 IEEE. — IEEE, 2000. — Vol. 1. — Pp. 316–323. DOI: 10.1109/IAS.2000.881130.

15. Taghavi S. A core analysis of the synchronous reluctance motor for automotive applications / S. Taghavi, P. Pillay // Electrical Machines (ICEM), 2014 International Conference on. — IEEE, 2014. — Pp. 961–967. DOI: 10.1109/ICELMACH.2014.6960297.

REFERENCES

1. Grigor'ev, A. V. "Sudovaya sistema elektrodvizheniya novogo pokoleniya." *Morskoi flot* 2 (2012): 38–40.
2. Vasin, I. M. "Osobennosti sozdaniya grebnogo avtomatizirovannogo elektroprivoda dlya sudov s elektrodvizheniem ledovogo klassa." *Trudy VIII mezhdunarodnoi (XIX vserossiiskoi) konferentsii po avtomatizirovannomu elektroprivodu AEP-2014*. Saransk: Natsional'nyi issledovatel'skii Mordovskii gosudarstvennyi universitet im. N. P. Ogareva, 2014. 458–462.
3. Mustafa, G. M., A. M. Ershov, Y. M. Sennov, S. V. Volkov, and G. M. Minaev. "A frequency converter for a propelling electric motor." *Russian Electrical Engineering* 85.1 (2014): 45–52. DOI: 10.3103/S106837121401009X.
4. Grigorev, Maxim, Alexander Shishkov, Eugene Belousov, Dmitry Sychev, Artem Menshenin, and Eugene Hayatov. "Pulse vector control system of the field regulated reluctance machine." *Nauchnaya diskussiya: voprosy tekhnicheskikh nauk* 5-6 (2015): 110–116.
5. Samoseiko, V. F., F. A. Gel'ver, V. A. Khomyak, and D. A. Khairov. *Sinkhronnye mashiny s anizotropnoi magnitnoi provodimost'yu rotora. Metodika proektirovaniya. Algoritmy upravleniya*. Edited by V. F. Samoseiko. SPb.: Izd. Krylovskii gosudarstvennyi nauchnyi tsentr, 2016.
6. Hofmann, Heath, and Seth R. Sanders. "High-speed synchronous reluctance machine with minimized rotor losses." *IEEE Transactions on Industry Applications* 36.2 (2000): 531–539. DOI: 10.1109/28.833771
7. Khomyak, V. A., V. F. Samoseiko, S. V. Sharashkin, and F. A. Gel'ver. RU 2 603 200 C1, IPC H 02 K 1/24, H 02 K 37/04. Sinkhronnyi elektricheskii dvigatel' s anizotropnoi magnitnoi provodimost'yu rotora. Russian Federation, assignee. 27 Nov. 2016.
8. Samoseiko, V. F. *Teoreticheskie osnovy upravleniya elektroprivodom: uchebnoe posobie*. SPb.: Elmor, 2007.
9. Samoseiko, Veniamin F., and Sergei V. Sharashkin. "Control of the reluctance motor with an anisotropic magnetic conductivity of rotor in ship propulsion system." *Vestnik Gosudarstvennogo universiteta morskogo i rechnogo flota imeni admirala S. O. Makarova* 9.2 (2017): 390–401. DOI: 10.21821/2309-5180-2017-9-2-390-401.
10. Sahoo, S. K., S. K. Panda, and J. X. Xu. "Piece-wise polynomial based model for switched reluctance motor." *Power and Energy Society General Meeting—Conversion and Delivery of Electrical Energy in the 21st Century, 2008 IEEE*. IEEE, 2008: 1–4. DOI: 10.1109/PES.2008.4596253.
11. Mir, Sayeed, M. S. Islam, T. Sebastian, and I. Husain. "Fault-tolerant switched reluctance motor drive using adaptive fuzzy logic controller." *IEEE Transactions on Power Electronics* 19.2 (2004): 289–295. DOI: 10.1109/TPEL.2003.823244.

12. Samoseiko, V. F., F. A. Gelver, and I. V. Belousov. "Prospects for the use of reactive electric machine in the electric drive." *Trudy IX mezhdunarodnoi (XX Vserossiiskoi) konferentsii po avtomatizirovannomu elektropivodu AEP-2016*. Perm': Permskii natsional'nyi issledovatel'skii politekhnicheskii universitet, 2016: 359–363.

13. DiRenzo, Michael T. "Switched reluctance motor control—basic operation and example using the tms320f240." *Texas Instruments, Digital Signal Processing Solutions, in SPRA420A-February*. 2000.

14. Germishuizen, J. J., F. S. Van der Merwe, K. Van der Westhuizen, and M. J. Kamper. "Performance comparison of reluctance synchronous and induction traction drives for electrical multiple units." *Industry Applications Conference, 2000. Conference Record of the 2000 IEEE*. Vol. 1. IEEE, 2000: 316–323. DOI: 10.1109/IAS.2000.881130.

15. Taghavi, Seyedmorteza, and Pragasen Pillay. "A core analysis of the synchronous reluctance motor for automotive applications." *Electrical Machines (ICEM), 2014 International Conference on*. IEEE, 2014: 961–967. DOI: 10.1109/ICELMACH.2014.6960297.

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

Самосейко Вениамин Францевич —

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

Шарашкин Сергей Владимирович — аспирант

Научный руководитель:
Самосейко Вениамин Францевич
ФГБОУ ВО «ГУМРФ имени
адмирала С. О. Макарова»
198035, Российская Федерация, г. Санкт-Петербург,
ул. Двинская, 5/7
ФГУП «Крыловский государственный
научный центр»
196758, Российская Федерация, г. Санкт-Петербург,
Московское ш., 44
e-mail: s_sharashkin@mail.ru,
sergey.nii.opr@gmail.com

Гельвер Федор Андреевич —

кандидат технических наук, доцент
ФГБОУ ВО «ГУМРФ имени
адмирала С. О. Макарова»
198035, Российская Федерация, г. Санкт-Петербург,
ул. Двинская, 5/7
ФГУП «Крыловский государственный
научный центр»
196758, Российская Федерация, г. Санкт-Петербург,
Московское ш. 44
e-mail: gelver@bk.ru

INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Samoseiko, Veniamin F. —

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

Sharashkin, Sergei V. — Postgraduate

Supervisor:
Samoseiko, Veniamin F.
Admiral Makarov State University of Maritime
and Inland Shipping
5/7 Dvinskaya Str., St. Petersburg, 198035,
Russian Federation
Krylov State Research Centre
44 Moskovskoe shosse, St. Petersburg, 196158,
Russian Federation
e-mail: s_sharashkin@mail.ru,
sergey.nii.opr@gmail.com

Gel'ver, Fedor A. —

PhD, associate professor
Admiral Makarov State University of Maritime
and Inland Shipping
5/7 Dvinskaya Str., St. Petersburg, 198035,
Russian Federation
Krylov State Research Centre
44 Moskovskoe shosse, St. Petersburg, 196158,
Russian Federation
e-mail: gelver@bk.ru

Статья поступила в редакцию 15 мая 2017 г.

Received: May 15, 2017.

ИНФОРМАЦИОННЫЕ ТЕХНОЛОГИИ И АВТОМАТИЗАЦИЯ НА ТРАНСПОРТЕ

DOI: 10.21821/2309-5180-2017-9-3-645-654

DEVELOPMENT OF A MODEL OF THE CHOICE OF MEANS SHIPBOARD INFORMATION SYSTEMS

К. П. Goloskokov¹, М. Y. Chirkova²

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

² Saint Petersburg State University of Economics, St. Petersburg, Russian Federation

The purpose of the article is to develop a model for the selection of technical means of ship information systems. The developed methodology is based on the technical and economic analysis of shipboard automated control systems. On the basis of which it was possible to establish how correctly and completely the nature and purpose of the work to be realized with the help of technical means was determined, the decisions made on the basis of justification of the technical equipment characteristics are optimal from the economic point of view. This task should be solved both at the stages of designing and manufacturing ship information systems, and when selecting the automation sites, the composition and the number of technical means; When studying the problems of reliability and prospects; When choosing tasks and developing programs, etc.

The results of this work allow us to make an optimal choice of the necessary technical means of communication. Thus, the analyzed analytical method for choosing a variant of a communication system can be successfully used in the development and implementation of new means of communication, when there are a number of technical solutions that differ in the size of capital investments, the amount of information intended for transmission, the cost of transferring the unit of information. The proposed method helps to objectively evaluate various variants of the communication system, taking into account the complex interaction between different methods of information transfer, the number of channels, their length and other technical characteristics that affect the system's cost parameters.

The developed method for evaluating communication options can also be applied to the choice of technical means of processing information, if the basis for their comparison is the cost of solving the problem, as well as when justifying the composition of the informatization department or the ship's automated control system.

Keywords: information system, information, communication facilities, information transformation, technical and economic analysis, ship systems.

For citation:

Goloskokov, Konstantin P., and Marina Y. Chirkova. "Development of a model of the choice of means shipboard information systems." *Vestnik Gosudarstvennogo universiteta morskogo i rechnogo flota imeni admirala S.O. Makarova* 9.3 (2017): 645–654. DOI: 10.21821/2309-5180-2017-9-3-645-654.

УДК 681.518

РАЗРАБОТКА МОДЕЛИ ВЫБОРА ТЕХНИЧЕСКИХ СРЕДСТВ СУДОВЫХ ИНФОРМАЦИОННЫХ СИСТЕМ

К. П. Голоскоков¹, М. Ю. Чиркова²

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

² Санкт-Петербургский государственный экономический университет,
Санкт-Петербург, Российская Федерация

В статье предложена модель выбора технических средств судовых информационных систем. Разработанная методика основана на проведении технико-экономического анализа судовых автоматизиро-

ванных систем управления, на основе которого удалось установить, насколько правильно и полно определены характер и назначение работ, подлежащих реализации с помощью технических средств, а также насколько оптимальны с экономической точки зрения решения, положенные в основу обоснования характеристик технических средств. Эта задача должна решаться как на этапах проектирования и изготовления судовых информационных систем, так и при выборе участков автоматизации, состава и количества технических средств, а также при изучении проблем надежности и перспективности, при выборе задач и разработке программ и т. д.

Результаты этой работы позволяют произвести оптимальный выбор необходимых технических средств связи. Таким образом, рассмотренный аналитический метод выбора варианта системы связи может успешно использоваться при разработке и внедрении новых средств связи, когда имеется ряд технических решений, отличающихся размером капитальных вложений, объемом информации, предназначенной к передаче, стоимостью передачи единицы информации. Предложенный в работе метод помогает объективно оценить различные варианты системы связи с учетом сложного взаимодействия между различными способами передачи информации, числом каналов, их протяженностью и другими техническими характеристиками, влияющими на стоимостные показатели системы.

Разработанный метод оценки вариантов связи может быть также применен и для выбора технических средств обработки информации, если в основе их сравнения лежит стоимость решения задачи, а также при обосновании состава отдела информатизации или судовой АСУ.

Ключевые слова: информационная система, информация, средства связи, преобразование информации, технико-экономический анализ, судовые системы.

Для цитирования:

Голоскоков К. П. Разработка модели выбора технических средств судовых информационных систем / К. П. Голоскоков, М. Ю. Чиркова // Вестник Государственного университета морского и речного флота имени адмирала С. О. Макарова. — 2017. — Т. 9. — № 3. — С. 645–654. DOI: 10.21821/2309-5180-2017-9-3-645-654.

Введение

Проблема создания судовых автоматизированных систем управления (АСУ) и средств связи требует не только учета затрат, но и нахождения путей их снижения. Анализ литературных источников показывает, что основным методом выбора тех или иных технических средств является технико-экономический анализ [1], [2]. В работах [3], [4] основное внимание уделяется расчету затрат на проведение всех операций при внедрении каких-либо технических средств. В статьях [5] – [10] отмечается необходимость комплексной оценки как технических характеристик, так и экономических показателей, но не приводится методика расчетов, поэтому один из разделов технико-экономического анализа АСУ должен быть посвящен исследованию оптимизации параметров выбираемых технических решений с учетом стоимости.

На основе технико-экономического анализа можно установить, насколько правильно и полно определены характер и назначение работ, подлежащих реализации с помощью выбранных технических средств, и оптимальны с экономической точки зрения решения, положенные в обоснование характеристик технических средств. Технико-экономический анализ способствует нахождению путей снижения размеров затрат на создание, изготовление и внедрение технических средств обработки и передачи информации. Эта задача решается как на этапах проектирования и изготовления судовых информационных систем, так и при выборе участков автоматизации, состава и количества технических средств, при изучении проблем надежности и перспективности, а также при выборе задач, разработке программ и т. д.

Результаты данной работы позволяют произвести оптимальный выбор необходимых технических средств. Оптимизация в большинстве случаев выражается в гармоничном сочетании технических характеристик средств переработки информации с требованиями, предъявляемыми к решению задач, а также таких проблем, как унификация, перспективность и стандартизация технических средств и математического обеспечения. Одним из условий проведения данного анализа является нахождение путей снижения затрат на создание судовых АСУ вне рассмотрения технических деталей, относящихся к разработке функциональных схем, элементов и т. д. [11] – [15]. К числу качественных показателей технического решения создаваемой системы, влияющих

на экономическую эффективность новой техники, следует отнести перспективность средств автоматизации и их долговечность.

Создание автоматизированных систем управления, состоящих из большого количества сложной электронной аппаратуры и разветвленной сети линий связи, сопряжено с большими капиталовложениями [16], поэтому частое обновление технических средств в больших масштабах вследствие физического и морального износа, естественно, не только потребует дополнительных капитальных вложений [17] – [20], но может нанести косвенный ущерб в связи с нарушением или ухудшением на определенный период работы системы управления. В этой связи решение проблемы физического и морального износа требует, чтобы конструирование судовых информационных систем (АСУ) базировалось на последних достижениях науки и техники [18].

Методы и материалы

Технические решения вариантов разрабатываемой (создаваемой) судовой информационной системы, как и пунктов обработки информации, должны анализироваться и оцениваться с учетом технических и экономических показателей. Техничко-экономические оценки для системы связи приобретают особое значение. Это обусловлено следующими обстоятельствами: во-первых, стоимость системы связи составляет до 70 % общих затрат на создание судовых информационных систем [14], во-вторых, проектируется единая система приема и передачи информации для всех подсистем и звеньев автоматизированных систем управления (АСУ), а нередко и для нескольких АСУ как транспортного, так и функционального назначения.

Проведение технико-экономических исследований судовой системы требует выполнения многократных расчетов, обеспечивающих подготовку исходных данных по различным вариантам проектов, что обусловило необходимость разработки специального метода проведения расчетов [1] – [3]. В данной статье предлагается один из возможных методов формализации операций технико-экономической оценки систем и алгоритм реализации этого метода на ЭВМ. Сущность метода состоит в том, что каждый вариант системы проверяется на условие

$$E \geq E_n, \quad (1)$$

где E — коэффициент экономической эффективности, определяемый как отношение величины экономического эффекта $\mathcal{E}$, получаемого от внедрения варианта системы АСУ, к приведенным капитальным затратам B , связанным с ее созданием; E_n — нормативный (заданный) коэффициент экономической эффективности.

Из числа вариантов, удовлетворяющих условию (1), наиболее эффективным с технико-экономической точки зрения считается тот, для которого величина E имеет наибольшее значение (при условии, что система связи полностью решает поставленные перед ней задачи):

$$E = \frac{C_1 - C_2}{B_2 - B_1}, \quad (2)$$

где C_1 и C_2 — стоимость передачи информации в базисном и предлагаемом вариантах системы связи, подвергаемых сравнению; B_1 и B_2 — соответственно капитальные вложения по сравниваемым вариантам.

Если разность $C_1 - C_2$ положительна, то она может служить модифицированным выражением экономического эффекта $\mathcal{E}$.

Предлагаемый метод обеспечивает машинным способом выбор варианта решения, которое отличалось бы от других методов возможностью просмотра реально существующего количества вариантов в заданные сроки. Как известно, решение этой задачи крайне затруднительно выполнить вручную. Применение в качестве критерия показателя E обеспечивает также единую методическую базу оценки систем на основе использования указаний и рекомендаций, содержащихся в литературе [18].

Анализ вариантов базируется на ограниченном количестве исходных данных. Исходными данными, общими для всех рассматриваемых вариантов, являются: E_n — нормативный коэффициент экономической эффективности; k — количество рассматриваемых вариантов. Кроме того, по каждому варианту системы связи должны быть известны: F — общий объем информации, передаваемый для обработки, принятия решений и исполнения; B — размер капитальных затрат (вложений); $C_{\text{пер}}$ — стоимость передачи единицы информации; η — коэффициент загрузки (использования) каналов связи. Алгоритмом решения задачи предусматривается проведение некоторых вспомогательных расчетов по определению стоимости передачи информации с учетом коэффициента загрузки каналов — η .

При сравнении вариантов технических решений, характеризующихся различным объемом передаваемой информации, необходимо привести их к сопоставимому виду (одинаковому объему информации). В этом случае сопоставление двух вариантов реализуется с помощью сравнения элементов столбцов матрицы M , имеющей вид

$$M = \begin{pmatrix} F_1 & F_2 \\ B_1 & B_2 \\ C_1 & C_2 \end{pmatrix},$$

где F_i — объем передаваемой информации; B_i — размер капитальных затрат; $C_i = \eta C_{\text{пер}} F_i$ — стоимость передачи информации по каждому варианту.

Условимся, что элементы матрицы M содержат показатели единичного объема сравнения, это позволяет добиться большей общности алгоритма и применять его в различных областях исследования АСУ. Составим матрицу M^* , отличающуюся от M дополнительной строкой-признаком:

$$M^* = \begin{pmatrix} F_1 & F_2 \\ B_1 & B_2 \\ C_1 & C_2 \\ 0 & 0 \end{pmatrix}.$$

Первый элемент четвертой строки — признак перестановки столбцов: если он равен единице, то перестановка имела место, если равен нулю, то перестановка отсутствовала. Второй элемент четвертой строки — признак выгодности варианта: если он равен единице, выгоден вариант, соответствующий первому столбцу матрицы M , если равен нулю, выгоден вариант, соответствующий второму столбцу. Следующим этапом является приведение вариантов к сопоставимому виду.

Для удобства описания алгоритма будем обозначать численное значение исследуемого элемента символом a_{ij} , указывающим лишь место элемента в матрице (i — номер строки, j — номер столбца, на пересечении которых находится элемент a_{ij}). Конкретный вид элемента однозначно определяется в процессе решения задачи. Сравниваем элементы первой строки (a_{11} и a_{12}). Показатели варианта с меньшим объемом информации всегда должны быть пересчитаны на объем более производительного варианта. Такому пересчету соответствует сопоставление:

— матрицы M_1 (если $a_{11} > a_{12}$):

$$M_1 = \begin{pmatrix} F_1 & F_2 \\ B_1 & B_2 + B_d \\ C_1 & C_2 + C_d \\ 0 & 0 \end{pmatrix};$$

— или матрицы M_2 (если $a_{11} < a_{12}$):

$$M_2 = \begin{pmatrix} F_1 & F_2 \\ B_1 + B_d & B_2 \\ C_1 + C_d & C_2 \\ 0 & 0 \end{pmatrix},$$

где B_d и C_d — соответственно приращения капитальных затрат и стоимости передачи информации с учетом коэффициента загрузки каналов связи, необходимые для того, чтобы обработать дополнительное количество информации F :

$$F = F_1 - F_2, \text{ если } a_{11} > a_{12}, \text{ или } F = F_2 - F_1, \text{ если } a_{11} < a_{12}.$$

Таким образом, получаем матрицу, у которой элементы первой строки совпадают, т. е. в дальнейшем будем сравнивать два варианта, соответствующие одному и тому же объему информации, поэтому первая строка матрицы исключается и рассматривается матрица M_3 :

$$M_3 = \begin{pmatrix} a_{11} & a_{12} \\ a_{21} & a_{22} \\ 0 & 0 \end{pmatrix}.$$

На месте элементов a_{11} и a_{12} ($i = 1, 2$) матрицы M_3 будут стоять те значения, которые получились в результате пересчета.

Дальнейший ход расчета по алгоритму заключается в преобразовании матрицы M_3 . Сравниваем элементы первой строки матрицы:

– если $a_{11} < a_{12}$, производим перестановку столбцов матрицы M_3 . Вслед за этим формируется признак этой перестановки: элементу a_{31} присваивается значение, равное единице:

$$M_4 = \begin{pmatrix} a_{11} & a_{12} \\ a_{21} & a_{22} \\ 1 & 0 \end{pmatrix};$$

– если $a_{11} \geq a_{12}$, перестановка отсутствует, и матрица M_4 совпадает с матрицей M_3 .

Далее сравниваем элементы второй строки, и в зависимости от соотношения между a_{11} и a_{12} приходим к тому или иному результату:

– $a_{11} = a_{12}$ — перестановка столбцов не производилась, т. е. выгоден первый вариант, и элементу присваиваем значение, равное единице;

– $a_{21} > a_{22}$ — выгоден второй (внедряемый) вариант;

– $a_{21} = a_{22}$ — приходим к выводу, что оба варианта равноценны;

– $a_{11} > a_{12}$ и $a_{21} \geq a_{22}$ — выгоден внедряемый вариант, если $a_{31} = 0$, и базисный, если $a_{31} = 1$.

– $a_{21} < a_{22}$ — определяем коэффициент экономической эффективности внедряемого варианта:

$$E_1 = \frac{a_{21} - a_{22}}{a_{12} - a_{11}}, \text{ если } a_{31} = 0;$$

$$E_2 = \frac{a_{22} - a_{21}}{a_{11} - a_{12}}, \text{ если } a_{31} = 1.$$

Затем величина E_1 сравнивается с нормативным коэффициентом экономической эффективности E_n . Внедряемый вариант признается выгодным по сравнению с базовым, если соответствующее ему значение E удовлетворяет условию (1). После установления выгоды внедряемого варианта соответствующая ему величина E_1 запоминается в специальной ячейке. Следующий вариант тоже сравнивается с базисным по описанному способу, затем,

при выполнении условия (1), сопоставляются коэффициенты E_1 и E_2 . Если $E_1 < E_2$, данные обновляются, т. е. первый вариант отпадает. Затем для исследования берется третий вариант и т. д. до тех пор, пока не будут изучены все k вариантов. В результате получим лучший вариант технического решения проблемы. Для этого варианта определяем прямой экономический эффект:

$$\Xi = E_n(B_L - B_1) + (C_1 - C_L),$$

где B и C — соответственно элементы первой и второй строк матрицы M_4 ; L — индекс наиболее выгодного варианта.

Результаты

Выбор средств связи для облачных решений проводился для следующей конфигурации ресурсов:

ISA, AD, DNS, DHCP, WSUS, IIS, Print Server = 100 Гб
1 CPU, 4 GB RAM, 100 Гб HDD SAS 15 К.
TMG 2010
1 CPU, 4 GB RAM, 20 Гб HDD SAS 15 К.
Exchange + Внешняя почтовая система на хостинге = 15 Гб
2 CPU, 4 GB RAM, 150 Гб HDD SAS 15 К.
Антивирус = 5 Гб
1 CPU, 2 GB RAM, 20 Гб HDD SAS 15 К.
Data Protection Manager 2010
1 CPU, 2 GB RAM, 200 Гб HDD SAS 15 К.
Fileserver = 200 Гб. 1 CPU, 2GB RAM, 200 Гб HDD SAS15 К.
Сервер базы данных «1С» = 40 Гб
2 CPU, 4 GB RAM, 50 Гб HDD SAS 15 К.
Терминал 1 (TS License, TS Gateway, TS Session Broker)
1 CPU, 4 GB RAM, 20 Гб HDD SAS 15К.
Терминал 2 (TS Session Host, Remote Application)
14 CPU, 16 GB RAM, 50 Гб HDD SAS 15 К.

Таким образом, технические требования к вычислительной системе для облачных решений свели к следующим. Далее приведены технические характеристики оборудования, а в таблице — капитальные затраты на оборудование и приведенные стоимости (C) на основе экспертной оценки технических характеристик для расчета матриц (M).

CPU: 24
RAM: 42 GB
HDD (SAS 15K, SAN Shared storage): 810 GB
Microsoft Windows Server.
Microsoft Remote Desktop — 50 шт.
Microsoft Exchange Std – 50 шт.
Microsoft Data Protection Manager Ent – 9 шт.
Microsoft Forefront TMG – 1 шт.
Отдельный VLAN — 1 шт.
Выделенный канал – 40 Мбит.
VPN канал – 1 шт.
IP адресов – 9 шт.

**Капитальные затраты *B* на оборудование
и приведенные стоимости передачи информации *C***

Наименование оборудования	Капитальные затраты <i>B</i>	Приведенные стоимости передачи информации <i>C</i>
Cloudone	153154 руб. (канал 40 Mb/c)	3,1
Clodo	139000 руб.	2,54
Cloud4Y	XEN 95703 руб. Vmware 109831 руб. (канал 40 Mb/c)	5,34
IT-grad	112415 руб. (50 Mb/c)	4,21
IT-lite	69503 руб. (10 Mb/c)	3,34
Parking	129325 руб. 40 Мбит/с	2,42
ActiveCloud (Softline)	107212 руб. (40 Mbit/c)	5,32
Uni-cloud	96512 руб. (40 Mbit/c)	3,21
Croc	159680 руб. (два канала по 1 ГБ с балансировкой нагрузки между ними)	4,23
Infobox	89590 руб. (40 Mb/c)	1,32
Oversun	120222 руб. (100 Mbit/c)	2,22
Dataline	136 800 руб.	4,12

В результате расчетов на ЭВМ по предлагаемой методике технико-экономического обоснования выбор технических средств выпал на следующее оборудование: ActiveCloud (Softline) (KVM).

Обсуждение

Предложенная в статье методика не предусматривает решения задачи без применения вычислительных средств. Программа на ЭВМ для выбора вариантов технических средств (расчет всех матриц, согласно методике, а также нормирование всех технических характеристик и приведем их к количественным единообразным оценкам) не входит в формат статьи за счет большого объема. Все существующие методики являются либо сугубо экономическими [3], [5], [7], либо носят чисто формальный характер исходя из тех или иных технических характеристик [13], [14]. В настоящее время проблема эффективности информационных систем полностью не решена. Как правило, все расчеты заканчиваются нахождением чисто экономических показателей, таких как затраты и нет методики, объединяющей их с техническими показателями (качество, полнота функционала, надежность и т. д.). Предлагаемая в работе методика основана на математических расчетах с использованием экспертных оценок при нормировании технических характеристик совместно с экономическими показателями, такими как капитальные затраты и стоимость обработки или передачи информации. Все расчеты производились с применением авторского программного обеспечения, написанного на языке Visual Basic.

Заключение

Рассмотренный аналитический метод выбора варианта системы связи, основанный на технико-экономическом анализе, может успешно использоваться при разработке и внедрении новых средств связи, когда имеется ряд технических решений, отличающихся размером капитальных вложений, объемом информации, предназначенной к передаче, стоимостью передачи единицы ин-

формации. Этот метод помогает объективно оценить различные варианты системы связи с учетом сложного взаимодействия между различными способами передачи информации, числом каналов, их протяженностью и другими техническими характеристиками, влияющими на стоимостные показатели системы. Результатом исследования является разработанная методика проведения расчетов технико-экономического анализа при выборе оптимального состава технических средств связи с использованием информационных систем, отличительной особенностью которой является комплексная оценка технических средств как с технической точки зрения, так и экономической целесообразности. Практическая значимость результатов статьи заключается в том, что разработанный метод оценки вариантов связи может быть также использован и для выбора технических средств обработки информации, если в основе их сравнения лежит стоимость решения задачи, а также при обосновании состава технических средств информатизации или судовой АСУ.

Основными направлениями дальнейшего исследования может быть разработка комплекса новых экономических показателей для оценки эффективности и целесообразности внедрения различных вариантов технических средств информатизации.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Шевчук Б. М. Математическое и технико-экономическое обоснование разработки информационно-эффективных объектных систем компьютерных сетей (ч. 2) / Б. М. Шевчук, М. Д. Гераимчук, Е. А. Марценюк // Вісник Національного технічного університету України «Київський політехнічний інститут». Серія: Приладобудування. — 2012. — № 43. — С. 117–126.
2. Агеев С. В. Подходы к технико-экономическому обоснованию модернизации информационно-коммуникационной инфраструктуры системы-112 / С. В. Агеев, В. Л. Грачев, О. Б. Ковтун // Технологии гражданской безопасности. — 2013. — Т. 10. — № 4 (38). — С. 22–26.
3. Агеев С. В. Основные направления развития информационного обеспечения автоматизированной информационно управляющей системы (АИУС) единой государственной системы предупреждения и ликвидации чрезвычайных ситуаций (РСЧС) / С. В. Агеев, С. А. Качанов, О. Б. Ковтун [и др.] // Технологии гражданской безопасности. — 2015. — Т. 12. — № 2 (44). — С. 8–12.
4. Алексашин А. А. Техничко-экономическое обоснование развития стандартизации в авиационной промышленности / А. А. Алексашин, А. А. Никодимов // Конверсия в машиностроении. — 2008. — № 1. — С. 73–76.
5. Андрейчиков А. В. Основные положения технико-экономического обоснования новых средств автоматизации производственных процессов / А. В. Андрейчиков, О. И. Андрейчикова // Известия Волгоградского государственного технического университета. — 2004. — № 4. — С. 5–10.
6. Андрейчиков А. В. Разработка информационной системы для технико-экономического обоснования инновационных решений на основе нечетких моделей / А. В. Андрейчиков, Т. С. Фролова, И. А. Малышев // Известия Волгоградского государственного технического университета. — 2006. — № 4. — С. 98–102.
7. Вагин Г. Я. Методика технико-экономического обоснования внедрения ресурсо- и энергосберегающих технологий и оборудования в промышленности / Г. Я. Вагин, Н. Н. Головкин, Е. Б. Солнцев, А. А. Лямин // Промышленная энергетика. — 2005. — № 6. — С. 8–13.
8. Голоскоков К. П. Моделирование финансовой устойчивости производственного предприятия / К. П. Голоскоков, М. Ю. Чиркова // Аудит и финансовый анализ. — 2015. — № 5. — С. 70–75.
9. Голоскоков К. П. Модель формирования баланса предложения товаров с неопределенным спросом / К. П. Голоскоков, М. Ю. Чиркова, А. А. Повалов // Аудит и финансовый анализ. — 2015. — № 6. — С. 74–77.
10. Гремяченская М. А. Проблемы технико-экономического обоснования инвестиционных проектов / М. А. Гремяченская, О. В. Мяснянкина // Вестник Воронежского государственного технического университета. — 2009. — Т. 5. — № 1. — С. 35–39.
11. Гремяченская М. А. Отбор и технико-экономическое обоснование разработки новых изделий / М. А. Гремяченская, О. В. Мяснянкина // Регион: системы, экономика, управление 1 (2008): 47–49.
12. Доронин М. С. Принципы расчета положительного эффекта при технико-экономическом обосновании инвестиционных проектов источников энергии / М. С. Доронин, В. Д. Доронина // Современные инновации. — 2016. — № 8 (10). — С. 38–39.

13. Каракаев А. Б. Разработка методологии, методов и моделей анализа влияния различных вариантов построения структуры и режимов поддержания и восстановления работоспособности судовых электроэнергетических систем (Ч. 1) / А. Б. Каракаев, А. В. Луканин, Е. В. Хекерт // Эксплуатация морского транспорта. — 2016. — № 3 (80). — С. 54–60.
14. Корякин Ю. А. Методология тактико-техничко-экономического обоснования перспективных систем радиоэлектронного вооружения корабля / Ю. А. Корякин, С. Ю. Корякина // Информационные технологии в проектировании и производстве. — 2008. — № 4. — С. 58–64.
15. Миронов Е. А. Обоснование предпочтительного варианта построения и функционирования системы технической эксплуатации территориально-распределенной информационной системы по вектору технико-экономических показателей. / Е. А. Миронов, В. Л. Гузенко, А. В. Клёпов, О. Л. Шестопалова // Современные проблемы науки и образования. — 2014. — № 3. — С. 72.
16. Николаев В. Н. Геоинформационные системы и информационные технологии в телекоммуникациях / В. Н. Николаев // Телекоммуникации. — 2016. — № 5. — С. 38–41.
17. Прилуцкий А. В. Подход к технико-экономическому обоснованию реконструкции системы энергоснабжения специального объекта министерства обороны Российской Федерации / А. В. Прилуцкий, Д. Н. Прищепа // Труды Военно-космической академии им. А. Ф. Можайского. — 2016. — № 654. — С. 150–159.
18. Рабинович Л. А. Основные положения технико-экономического обоснования новых средств автоматизации производственных процессов / Л. А. Рабинович, М. Л. Либман // Известия Волгоградского государственного технического университета. — 2004. — № 1. — С. 7–9.
19. Тихомиров В. О. Методические рекомендации по разработке технико-экономических обоснований функциональных проектов / В. О. Тихомиров // Экономика железных дорог. — 2008. — № 9. — С. 71–80.
20. Тютюнников Н. Н. Экономика терминологического фонда автоматизированной информационной системы / Н. Н. Тютюнников. — М.: Перо, 2016. — 462 с.

REFERENCES

1. Shevchuk, B. M., M. D. Herayimchuk, and E. O. Martsenuk. “The mathematical and techno-economical basis of informational-efficient object systems of computer networks. (Part 2).” *Visnik Nacionalnogo texnichnogo universitetu Ukraini “Kiivskij politexnichnij institut”. Seriya: Priladobuduvannya* 43 (2012): 117–126.
2. Ageev, S., V. Grachev, and O. Kovtun. “Approaches to the Technical and Economic Feasibility of Upgrading the ICT Infrastructure of the System, 112.” *Texnologii grazhdanskoj bezopasnosti* 10.4(38) (2013): 22–26.
3. Kachanov, Sergey A., Sergey V. Ageev, Oleg B. Kovtun, Natalia V. Svetskaya, Basil M. Chernov, and Yulia S. Lukina. “The Main Directions of Development of the Information Security of Automated Information Management System of the Unified State System of Prevention and Liquidation of Emergency Situations.” *Texnologii grazhdanskoj bezopasnosti* 12.2(44) (2015): 8–12.
4. Aleksashin, A. A., and A. A. Nikodimov. “Feasibility report of standartization development in the aircraft industry.” *Konversiya v mashinostroenii* 1 (2008): 73–76.
5. Andrejchikov, A. V., and O. I. Andrejchikova. “Osnovnye polozheniya texniko-ekonomicheskogo obosnovaniya novyx sredstv avtomatizacii proizvodstvennyx processov.” *Izvestiya Volgogradskogo gosudarstvennogo texnicheskogo universiteta* 4 (2004): 5–10.
6. Andrejchikov, A. V., T. S. Frolova, and I. A. Malyshev. “Razrabotka informacionnoj sistemy dlya texniko-ekonomicheskogo obosnovaniya innovacionnyx reshenij na osnove nechetkix modelej.” *Izvestiya Volgogradskogo gosudarstvennogo texnicheskogo universiteta* 4 (2006): 98–102.
7. Vagin, G. Ya., N. N. Golovkin, Ye. B. Solntsev, and A. A. Lyamin. “Methods of technical and economical substantiation for introduction of resource and energy saving technologies and equipment in industry.” *Promyshlennaya energetika* 6 (2005): 8–13.
8. Goloskokov, K. P., and M. Yu. Chirkova. “Modeling of financial stability of corporations.” *Audit i finansovyj analiz* 5 (2015): 70–75.
9. Goloskokov, K. P., M. Y. Chirkova, and A. A. Povalov. “A mathematical model of the structure matching the supply of goods affiliates trading firm with an uncertain demand.” *Audit i finansovyj analiz* 6 (2015): 74–77.
10. Gremjachenskaja, M. A., and O. V. Mjasnjankina. “Problems technical and economic substantiations of investment projects.” *The Bulletin of Voronezh State Technical University* 5.1 (2009): 35–39.
11. Gremyachenskaya, M. A., and T. Yu. Myasnyankina. “Otbor i texniko-ekonomicheskoe obosnovanie razrabotki novyx izdelij.” *Region: sistemy, ekonomika, upravlenie* 1 (2008): 47–49.

12. Doronin, M. S., and V. D. Doronina. "Principy rascheta polozhitelnogo effekta pri tekhniko-ekonomicheskom obosnovanii investitsionnykh projektov istochnikov energii." *Sovremennye innovacii* 8(10) (2016): 38–39.
13. Karakaev, A. B., A. V. Lukanin, and E. V. Khekert. "Development of the methodology, methods and analysis models of different variants of structure development and operability repairing and maintenance modes ship electrical power system (part 1)." *Ekspluatatsiya morskogo transporta* 3(80) (2016): 54–60.
14. Koryakin, Yu. A., and S. Yu. Koryakina. "Metodologiya taktiko-tekhniko-ekonomicheskogo obosnovaniya perspektivnykh sistem radioelektronnogo vooruzheniya korablya." *Informacionnye tekhnologii v proektirovanii i proizvodstve* 4 (2008): 58–64.
15. Mironov, E. A., V. L. Guzenko, A. V. Klepov, and O. L. Shestopalova. "Justification of the preferred embodiment of construction and operation of the system design geographically distributed information system on vector technical and economic indicators." *Modern problems of science and education* 3 (2014): 72.
16. Nikolayev, V. N. "Geoinformation systems and information technologies in telecommunications." *Telekommunikatsii* 5 (2016): 38–41.
17. Priluckij, A. V., and D. N. Prishhepa. "Podxod k tekhniko-ekonomicheskomu obosnovaniyu rekonstrukcii sistemy energosnabzheniya specialnogo obekta ministerstva oborony Rossijskoj Federacii." *Trudy Voenno-kosmicheskoy akademii im. A.F. Mozhajskogo* 654 (2016): 150–159.
18. Rabinovich, L. A., and M. L. Libman. "Osnovnye polozeniya tekhniko-ekonomicheskogo obosnovaniya novyx sredstv avtomatizacii proizvodstvennykh processov." *Izvestiya Volgogradskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta* 1 (2004): 7–9.
19. Tixomirov, V. O. "Metodicheskie rekomendacii po razrabotke tekhniko-ekonomicheskix obosnovanij funkcionalnykh projektov." *Ekonomika zheleznykh dorog* 9 (2008): 71–80.
20. Tyutyunnikov, N. N. *Ekonomika terminologicheskogo fonda avtomatizirovannoj informacionnoj sistemy*. M.: Izdatel'stvo «Pero», 2016.

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

Голоскоков Константин Петрович —
доктор технических наук, профессор
ФГБОУ ВО «ГУМРФ имени
адмирала С.О. Макарова»
198035, Российская Федерация, Санкт-Петербург,
ул. Двинская, 5/7
e-mail: goloskovkp@gumrf.ru
Чиркова Марина Юрьевна —
кандидат экономических наук, доцент
Санкт-Петербургский государственный
экономический университет
191023, Российская Федерация, Санкт-Петербург,
ул. Садовая, 21
e-mail: mu.tch@mail.ru

INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Goloskov, Konstantin P. —
Doctor of Technical Sciences, professor
Admiral Makarov State University of Maritime
and Inland Shipping
5/7 Dvinskaya Str., St. Petersburg, 198035,
Russian Federation
e-mail: goloskovkp@gumrf.ru
Chirkova, Marina Y. —
PhD, associate professor
Saint Petersburg State
University of Economics
21 Sadovaya Str., St. Petersburg, 191023,
Russian Federation
e-mail: mu.tch@mail.ru

Статья поступила в редакцию 31 марта 2017 г.
Received: March 31, 2017.

DOI: 10.21821/2309-5180-2017-9-3-655-662

PARAMETRIC OPTIMIZATION OF STRUCTURAL ELEMENTS OF PORT HANDLING MACHINES

D. V. Dmitrienko

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

A method of parametric optimization of structural elements of the port handling equipment on the example of the unit moving cylinder. Power elements hydraulic and pneumatic movable cylinders serving to provide a reciprocating motion of the slide, widely used for water transport. Their technical condition largely determines the reliability and reliability of port cargo handling equipment, actuators of the valves gate gateway and other equipment. The power cylinders are the most expensive elements of reloading machines. To increase the reliability of their work possible, first of all, a decrease in maximum (peak) load value throughout the range of motion of the RAM. In terms of practical optimization is to solve the minimax problem, consisting in determining the maximum (peak) values of loads with variation of operating modes and then select from them the mode with minimum amplitude. The proposed numerical method of optimization, the developed model and established program codes in MatLAB to obtain numerical estimates. It is shown that the model possesses the property of forming host where the generated operating modes, the coordinates of which correspond to the minimax amplitude efforts in the slider. An example of a method of parametric optimization, confirming the correctness of the solutions.

Keywords: parametric optimization, handling machine, a movable cylinder, minimax, unimodality, model, technological limitations, reliability, design, mode selection, node, quantification.

For citation:

Dmitrienko, Dmitry V. "Parametric optimization of structural elements of port handling machines." *Vestnik Gosudarstvennogo universiteta morskogo i rechnogo flota imeni admirala S.O. Makarova* 9.3 (2017): 655–662. DOI: 10.21821/2309-5180-2017-9-3-655-662.

УДК 681.5

ПАРАМЕТРИЧЕСКАЯ ОПТИМИЗАЦИЯ ЭЛЕМЕНТОВ КОНСТРУКЦИЙ ПОРТОВЫХ ПЕРЕГРУЗОЧНЫХ МАШИН

Д. В. Дмитриенко

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

Рассматривается способ параметрической оптимизации элементов конструкций портовой перегрузочной техники на примере механизма с подвижным цилиндром. Силовые элементы с гидравлическими и пневматическими подвижными цилиндрами, служащими для обеспечения возвратно-поступательного движения ползуна, широко применяются на водном транспорте. Их техническое состояние во многом определяет надежность и безаварийность работы портового перегрузочного оборудования, приводов створок ворот шлюзов и другого оборудования. Силовые цилиндры являются самыми дорогими элементами перегрузочных машин. Повысить надежность их работы можно прежде всего путем снижения максимального (амплитудного) значения нагрузки во всем диапазоне движения ползуна. В терминах практической оптимизации необходимо решить минимаксную задачу, состоящую в определении максимальных (амплитудных) значений нагрузок при вариации рабочих режимов с последующим выбором из них режима с минимальной амплитудой. Предложен численный способ оптимизации конструкции и выбора оптимальных геометрических параметров, обеспечивающих надежную работу ползунково-кривошипного механизма при любом положении его частей. На этой основе разработана математическая модель и произведено моделирование рабочих характеристик механизма с подвижным цилиндром для графического определения минимаксного режима. Для практической реализации модели создана программа в кодах MatLAB, позволяющая получить количественные оценки геометрических параметров конструкции ползунково-кривошипного механизма. Показано, что модель обладает свойством образования узла, в котором пересекаются генерируемые ра-

бочие режимы, координаты которого соответствуют минимуму амплитуды усилия в ползуне. Приведен пример способа параметрической оптимизации, подтверждающий корректность решений.

Ключевые слова: параметрическая оптимизация, перегрузочная машина, подвижной цилиндр, минимум, унимодальность, модель, технологические ограничения, надежность конструкции, выбор режимов, узел, количественная оценка.

Для цитирования:

Дмитриенко Д. В. Параметрическая оптимизация элементов конструкций портовых перегрузочных машин / Д. В. Дмитриенко // Вестник Государственного университета морского и речного флота имени адмирала С. О. Макарова. — 2017. — Т. 9. — № 3. — С. 655–662. DOI: 10.21821/2309-5180-2017-9-3-655-662.

Введение

Развитие численных методов и алгоритмов параметрической оптимизации технологических объектов водного транспорта с использованием современных вычислительных систем и микропроцессорной техники позволяет на качественно новом уровне решать задачи эффективного функционирования и повышения эксплуатационной надежности технических средств и оборудования различного назначения [1]. Практическое применение методов исследования операций для поиска эффективных эксплуатационных характеристик является важным научно-обоснованным направлением принятия решений по совершенствованию управления основными фондами на водном транспорте при минимальных материальных и денежных затратах [2], [3]. Реализация энергосберегающих технологий средствами моделирования и оптимизации должна осуществляться по завершении поиска резервов экономии на основе существующих методов оптимизации в различных условиях функционирования объектов с учетом технологических ограничений [4], [5]. Во многих случаях повышение эффективности функционирования объектов водного транспорта может достигаться путем параметрической настройки регуляторов существующих систем, выбора режимов работы методами спектрального анализа средствами параметрической оптимизации, базирующейся на применении промышленных ПИД-регуляторов, что реализуется практически без материальных затрат [6]. Эффективными могут быть решения по обеспечению динамических характеристик объектов методами пассивного демпфирования. Такие решения, как правило, основываются на теории фильтрации, фильтрах Чебышева, Баттерворта, а также спектров полиномов [7].

Численные методы оптимизации параметров конструкций могут служить механизмом концепции энергосберегающей приводной системы, позволяющей снизить расходы на эксплуатацию перегрузочного оборудования, о чем свидетельствуют проектные решения отечественных и зарубежных фирм [8]. Анализ конструкций современных погрузочных машин показывает, что одним из узлов привода стрелы с грузом в машинах является ползунково-кривошипный механизм с подвижным цилиндром (рис. 1).



Рис. 1. Самоходный погрузчик с ползунково-кривошипным механизмом

Эффективность и надежность работы механизмов с подвижным цилиндром можно повысить путем параметрического синтеза конструкции и выбора рабочих параметров [9]. Поскольку ползунково-кривошипный механизм с возвратно-поступательно движущимся ползунком, являющимся частью гидравлического или пневматического цилиндра, нашел широкое применение на объектах водного транспорта, в работе предложено численное решение задачи параметрической оптимизации. Отметим, что в портовой технике механизм используется на мобильных кранах с пневматическим шасси, ричстакерах, транспортных средствах для работы с контейнерами, сборными, насыпными и проектными грузами.

Механизм применяется на автоматических кранах — штабелерах, в автоматизированных транспортных средствах терминальной техники и др. [10], [11]. Ползунковые механизмы также применяются в приводах двухстворчатых ворот шлюзов, в рулевых приводах судов, на речных земснарядах для погружения и подъема рам с всасывающими наконечниками, плавучих кранах, промышленных и судовых робототехнических устройствах и управляемых комплексах различного назначения.

Методы и материалы

Силовой цилиндр, обеспечивающий возвратно-поступательные движения механизма, является основным и самым дорогим элементом привода [12]. Проектирование цилиндра включает процедуру выбора оптимальных геометрических параметров, обеспечивающих надежную работу механизма при любом положении его частей. Под режимом высокой надежности имеются в виду такие значения параметров, при которых минимизируется максимальное (пиковое) усилие в цилиндре во всем диапазоне перемещений механизма. Для решения задачи оптимального параметрического синтеза воспользуемся упрощенной моделью механизма, представленной на рис. 2.

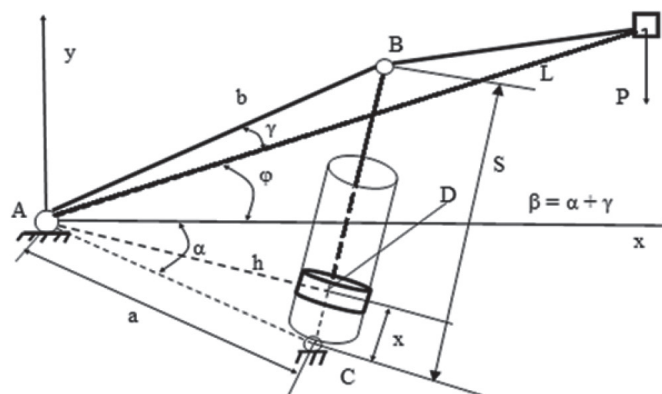


Рис. 2. Схема механизма подъема с подвижным цилиндром:

L — длина стрелы, м; P — величина груза, кН; S — ход ползуна поршня, м;
 φ — поворот стрелы ползункового механизма, град;
 α — угол между осью абсцисс X и положением нижней части силового цилиндра;
 γ — угол между стрелой груза L и стороной b конструкции (поворотного устройства)

Предположим, что с помощью ползункового механизма поднимается груз P . Для расчетов примем $L = 4$ м, $P = 1000$ кН. Введем ограничения на амплитуду движения

$$\varphi_{\min} \leq \varphi \leq \varphi_{\max},$$

где $\varphi_{\min} = -20^\circ$ и $\varphi_{\max} = 80^\circ$.

Зададим минимальное и максимальное перемещение ползуна:

$$S_{\min} = 1 \text{ м}; S_{\max} = 1,8 \text{ м}.$$

Параметрическая оптимизация состоит в определении параметров a , b и угла β в условиях, когда механизм, перемещая ползун поршня гидроцилиндра в пределах от $S_{\min}$ до $S_{\max}$ в диапазоне

значений $\varphi_{\min} \leq \varphi \leq \varphi_{\max}$, развивал бы наименьшее пиковое (максимальное) усилие T в цилиндре. В терминах практической оптимизации необходимо решить минимаксную задачу: найти режим с минимальным значением $T_{\min \max}$ из всех возможных $T_{\max}$, обеспечиваемый с помощью надлежащего выбора параметров a , b и угла β при соблюдении введенных ограничений.

При составлении модели механизма, согласно обозначениям на рис. 2, рассмотрим нелинейную функцию:

$$T = f(a, b, \beta, b, \varphi, P). \quad (1)$$

Зависимость T от переменных состояния можно получить путем простых преобразований, если, например, воспользоваться теоремой косинусов применительно к ABC:

$$a^2 + b^2 - 2ab \cdot \cos(\varphi + \beta) = S^2. \quad (2)$$

Введем обозначения:

$$K_1 = 2ab; K_2 = a^2 + b^2. \quad (3)$$

Используя (2) и (3), можем записать:

$$K_2 - K_1 \cdot \cos(\varphi + \beta) = S^2. \quad (4)$$

Для нахождения усилия T в цилиндре воспользуемся равенством моментов, создаваемых P и T :

$$P \cdot L \cdot \cos \varphi = T \cdot h, \quad (5)$$

где плечо h определим из соотношения, полученного при совместном рассмотрении ACD и ABC:

$$x = \frac{S^2 - b^2 + a^2}{2S}. \quad (6)$$

В результате, с учетом соотношения (2), получим

$$x = \frac{a^2 + b^2 - b^2 + a^2 - 2ab \cdot \cos(\varphi + \beta)}{2S} = \frac{a^2 - ab \cdot \cos(\varphi + \beta)}{S} \quad (7)$$

и, следовательно, высота h определится по формуле

$$\begin{aligned} h = \sqrt{a^2 - x^2} &= \sqrt{a^2 - \left[\frac{a^2 - ab \cdot \cos(\varphi + \beta)}{S} \right]^2} = \\ &= \frac{\sqrt{a^2 S^2 - a^4 + 2a^3 b \cdot \cos(\varphi + \beta) - a^2 b^2 \cdot \cos^2(\varphi + \beta)}}{S} \end{aligned} \quad (8)$$

или после преобразований, с использованием (2) – (8), будем иметь

$$h = \frac{\sqrt{a^2 b^2 \cdot \sin^2(\varphi + \beta)}}{S} = \frac{ab \cdot \sin(\varphi + \beta)}{\sqrt{a^2 + b^2 - 2ab \cdot \cos(\varphi + \beta)}} = \frac{ab \cdot \sin(\varphi + \beta)}{\sqrt{K_2 - K_1 \cos(\varphi + \beta)}}. \quad (9)$$

Тогда формула (5) для T приобретет следующий вид:

$$T = \frac{PL \cdot \cos \varphi}{h} = \frac{PL \sqrt{K_2 - K_1 \cos(\varphi + \beta)}}{ab \cdot \sin(\varphi + \beta)} \cdot \cos \varphi. \quad (10)$$

Дальнейшие упрощения вычислений можно получить, если воспользоваться граничными условиями для угла φ и предельными перемещениями $S_{\min}$ и $S_{\max}$. Введем ограничения, используя формулу (4):

$$\begin{cases} -S_{\min}^2 = K_1 \cos(\beta + \varphi_{\min}) - K_2; \\ -S_{\max}^2 = K_1 \cos(\beta + \varphi_{\max}) - K_2. \end{cases} \quad (11)$$

Решая (11), найдем:

$$K_1 = \frac{S_{\min}^2 - S_{\max}^2}{\cos(\beta + \varphi_{\max}) - \cos(\beta + \varphi_{\min})}; \quad (12)$$

$$K_2 = K_1 \cos(\beta + \varphi_{\max}) + S_{\max}^2. \quad (13)$$

В результате выполненных преобразований получено важное условие, согласно которому решение минимаксной задачи определяется только путем изменения угла β в уравнении (1).

Поскольку $K_1 = 2ab$ и $K_2 = a^2 + b^2$, то можно записать:

$$a = \frac{1}{2b} K_1; \quad b = \left(\frac{K_2 + \sqrt{K_2^2 - K_1^2}}{2} \right)^{0,5}. \quad (14)$$

В процессе вычислений максимальные (пиковые) усилия $T_{\max} = f(\beta)$ сначала выбираются из множества решений $T = f(\beta)$ при $P = \text{const}$ путем вариации угла β , и из них формируется вектор. Затем из всех элементов вектора $T_{\max} = f(\beta)$ с помощью функции минимизации определяется минимальное пиковое усилие $T_{\min \max}$ и соответствующий ему угол β_{opt} .

Результаты

Для численного решения минимаксной задачи составлена программа в кодах MatLAB и получены следующие результаты:

$$T_{\min \max} = 7080,6 \text{ кН}; \quad \beta_{\text{opt}} = 70,2^\circ; \quad b = 1,3359 \text{ м}; \quad a = 0,5476 \text{ м}.$$

На рис. 3 приведен фрагмент графика $T_{\max} = f(\beta)$, где минимаксный режим отмечен точкой.

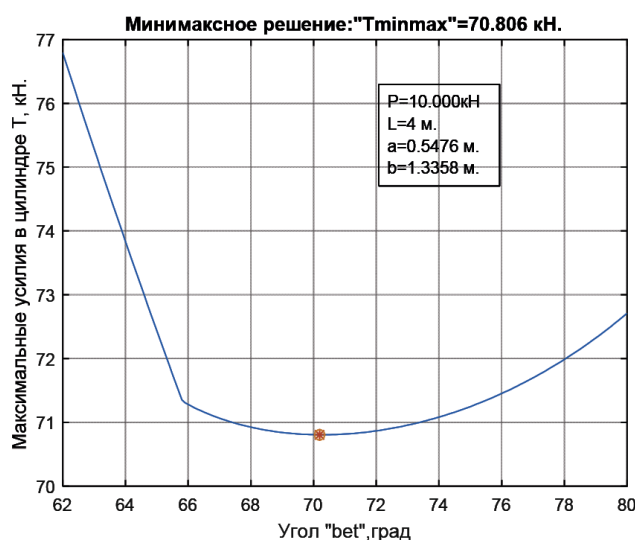


Рис. 3. Изменение максимума усилия в цилиндре в зависимости от угла β

Моделирование рабочих характеристик механизма позволило определить простой способ оценки минимакса. На рис. 4 представлены зависимости величины T от угла φ , рассчитанные по формулам (9) – (14) для различных значений β с шагом дискретности $\delta\beta = 0,1^\circ$ в рабочем диапазоне $62^\circ \leq \beta \leq 80^\circ$.

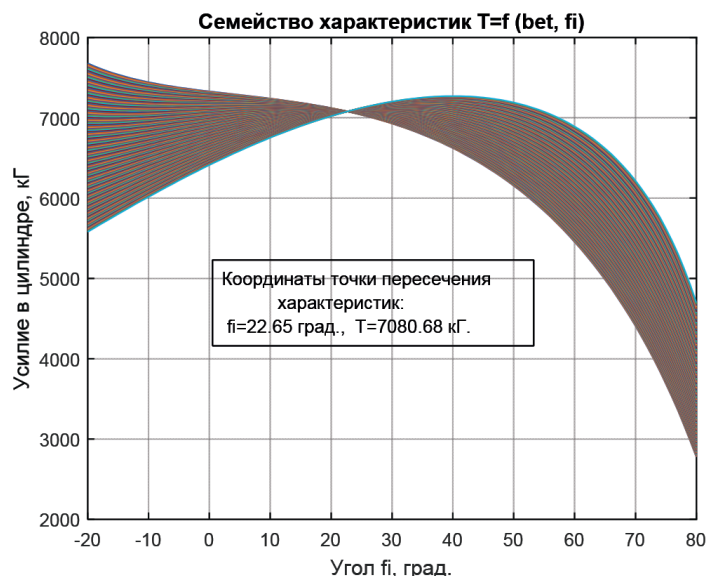


Рис. 4. Изменения усилий в цилиндре в функции угла φ

Обсуждение

В результате получено множество, состоящее из 181 кривых. Характеристики, приведенные на рис. 4, как следует из графических построений, имеют максимумы, расположенные слева и справа от точки пересечения. Поскольку искомая зависимость является унимодальной, минимум максимального значения должен соответствовать ординате самой точки пересечения [13]. Ее абсцисса соответствует углу поворота стрелы $\varphi = 22,65^\circ$, который определяется по расчетным данным с любым требуемым шагом дискретности. Важным обстоятельством является то, что все характеристики пересекаются в одной точке, образуя узел с координатами, соответствующими графическому решению минимаксной задачи, поэтому оценка проектируемых параметров и угла β при известных $T_{\min \max}$ и φ значительно упрощается.

Заключение

В работе на приведенном примере показано, что эффективность использования технических средств может быть повышена путем параметрической оценки характеристик, выполненной на моделях, адекватных исследуемым объектам. Используя технические возможности компьютерного моделирования и отрабатывая различные ситуации, встречающиеся на практике, получаем инструмент оценки различных проектов систем и принимаем обоснованные решения по совершенствованию оборудования, выбору режимов и общему планированию работы терминалов и их элементов. На базе моделей может быть создан механизм для обучения операторов и наглядной демонстрации взаимодействия эксплуатируемой техники на водном транспорте в режиме реального времени.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Проников А. С. Параметрическая надёжность машин / А. С. Проников. — М.: Изд-во МГТУ им. Н. Э. Баумана, 2003. — 560 с.
2. Аттетков А. В. Методы оптимизации / А. В. Аттетков, С. В. Галкин, В. С. Зарубин. — М.: Изд-во МГТУ им. Н. Э. Баумана, 2001. — 440 с.
3. Rao S. S. Engineering optimization. Theory and practice / S. S. Rao. — John Wiley & Sons, Inc., 2009. — 840 p.
4. Анурьев В. И. Справочник конструктора-машиностроителя: в 3 т. / В. И. Анурьев. — М.: Машиностроение, 2001. — Т. 1. — 920 с.

5. Dawande M. Sequencing and Scheduling in Robotic Cells: Recent Developments / M. Dawande, H. N. Geismar, S. P. Sethi, C. Sriskandarajah // *Journal of Scheduling*. — 2005. — Vol. 8. — Pp. 387–426. DOI: 10.1007/s10951-005-2861-9.
6. Zhang H. Algorithm and stability of ATC receding horizon control / H. Zhang, J. Huang, F. L. Lewis // *Adaptive Dynamic Programming and Reinforcement Learning, 2009. ADPRL'09. IEEE Symposium on*. — IEEE, 2009. — Pp. 28–35. DOI: 10.1109/ADPRL.2009.4927522.
7. Сахаров В. В. Модели и алгоритмы оптимизации технологических процессов на объектах водного транспорта в среде MatLAB: монография / В. В. Сахаров, А. А. Кузьмин, А. А. Чертков. — СПб.: Изд-во ГУМРФ им. адм. С. О. Макарова, 2015. — 436 с.
8. Кузнецов А. Л. Перспективы автоматизации контейнерных терминалов / А. Л. Кузнецов // *Морские порты*. — 2010. — № 9 (90). — С. 50–55.
9. Иванов А. С. Конструируем машины: шаг за шагом: в 2 ч. / А. С. Иванов. — М.: Изд-во МГТУ им. Н. Э. Баумана, 2000. — Ч. 1. — 328 с.
10. Tanaka S. Dynamic optimization of the operation of single-car elevator systems with destination hall call registration: Part I. Formulation and simulations / S. Tanaka, Y. Uruguchi, M. Araki // *European Journal of Operational Research*. — 2005. — Vol. 167. — Is. 2. — Pp. 550–573. DOI: 10.1016/j.ejor.2004.04.038.
11. Tanaka S. Dynamic optimization of the operation of single-car elevator systems with destination hall call registration: Part II. The solution algorithm / S. Tanaka, Y. Uruguchi, M. Araki // *European Journal of Operational Research*. — 2005. — Vol. 167. — Is. 2. — Pp. 574–587. DOI: 10.1016/j.ejor.2004.04.039.
12. Шишко В. Б. Надёжность технологического оборудования: учебник / В. Б. Шишко, Н. А. Чиченев. — М.: Изд. дом МИСиС, 2012. — 1990 с.
13. Дмитриева Т. Л. Оптимальное проектирование пространственной металлической конструкции с использованием ПК ANSYS / Т. Л. Дмитриева, Ле Чан Минь Дат // *International Journal for Computational Civil and Structural Engineering*. — 2014. — Т. 10. — № 2. — С. 79–84.

REFERENCES

1. Pronikov, A. S. *Parametricheskaya nadezhnost' mashin*. M.: MGTU im. N. E. Bauman, 2003.
2. Attetkov, A. V., S. V. Galkin, and V. S. Zarubin. *Metody optimizatsii*. M.: Izd-vo MGTU im. N. E. Bauman, 2001.
3. Rao, S. S. *Engineering optimization. Theory and practice*. John Wiley & Sons, Inc., 2009.
4. Anur'ev, V. I. *Spravochnik konstruktora – mashinostroitel'ya. V 3-kh t.* Vol. 1. M.: Mashinostroyeniye, 2001.
5. Dawande, Milind, H. N. Geismar, S. P. Sethi, and C. Sriskandarajah. “Sequencing and scheduling in robotic cells: Recent developments.” *Journal of Scheduling* 8.5 (2005): 387–426. DOI: 10.1007/s10951-005-2861-9.
6. Zhang, Hongwei, Jie Huang, and Frank L. Lewis. “Algorithm and stability of ATC receding horizon control.” *Adaptive Dynamic Programming and Reinforcement Learning, 2009. ADPRL'09. IEEE Symposium on*. IEEE, 2009: 28–35. DOI: 10.1109/ADPRL.2009.4927522.
7. Saharov, V. V., A. A. Kuzmin, and A. A. Chertkov. *Modeli i algoritmy optimizatsii tekhnologicheskikh processov na obektah vodnogo transporta v srede MATLAB: monografiya*. Spb.: GUMRF imeni adm. S.O. Makarova, 2015.
8. Kuznetsov, A. L. “Perspektivy avtomatizatsii konteynernykh terminalov.” *Morskie porty* 9(90) (2010): 50–55.
9. Ivanov, A. S. *Konstruiруем mashiny: shag za shagom. V 2-kh chastyakh*. Part 1. M.: Izdatel'stvo MGTU im. N. E. Bauman, 2000.
10. Tanaka, Shunji, Yukihiro Uruguchi, and Mituhiko Araki. “Dynamic optimization of the operation of single-car elevator systems with destination hall call registration: Part I. Formulation and simulations.” *European Journal of Operational Research* 167.2 (2005): 550–573. DOI: 10.1016/j.ejor.2004.04.038.
11. Tanaka, Shunji, Yukihiro Uruguchi, and Mituhiko Araki. “Dynamic optimization of the operation of single-car elevator systems with destination hall call registration: Part II. The solution algorithm.” *European Journal of Operational Research* 167.2 (2005): 574–587. DOI: 10.1016/j.ejor.2004.04.039.
12. Shishko, V. B., and N. A. Chichenov. *Nadezhnost' tekhnologicheskogo oborudovaniya: uchebnik*. M.: Izdatel'skii dom MISiS, 2012.
13. Dmitrieva, Tatiana Lvovna, and Le Tran Minh Dat. “Optimal design of space metal construction by using ANSYS.” *International Journal for Computational Civil and Structural Engineering* 10.2 (2014): 79–84.

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРЕ

Дмитриенко Дмитрий Владимирович —
кандидат экономических наук
ФГБОУ ВО «ГУМРФ имени
адмирала С. О. Макарова»
198035, Российская Федерация, г. Санкт-Петербург,
ул. Двинская, 5/7
e-mail: kaf_osnivr@gumrf.ru

INFORMATION ABOUT THE AUTHOR

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

Статья поступила в редакцию 15 апреля 2017 г.

Received: April 15, 2017.

DOI: 10.21821/2309-5180-2017-9-3-663-673

MODEL MANAGEMENT OF THE PROCESS CRITERIA-ORIENTED TESTING AT TRAINING OF SPECIALISTS IN THE NAVY

D. A. Pechnikov

Naval Academy named after Admiral of the Fleet of the Soviet Union N.G. Kuznetsov,
St. Petersburg, Russian Federation

The article discusses the model of management of the implementation of the system of criterion-oriented test tasks with a single correct answer, that provides a stop test when the required reliability of the evaluation. The development and application proposed in this article models of assessment results the criterion-oriented test provides a transition from the point estimates of the empirical relative frequency to estimate probability of correct actions that have quantifiable confidence interval (CI). The latter provides the application of these models to solve the problem of automation of management of process criteria-oriented testing in order to ensure its operational efficiency by stopping the procedure for making the current of reference (TOR) after receiving the evaluation of a specified accuracy. The article also discusses the use of models of criterion-oriented evaluation in computer systems testing, it is proved that these models improve the results of current control. In order to carry out military training as a civilian Navy and the Navy requires appropriate training facilities. The basis of such a base used was the existing training samples of civil and military equipment and weapons, which were previously reported in the naval and civil Maritime educational institutions in sufficient quantity and provide the necessary level of theoretical and practical training of future specialists in the fleet. The result is a sharp reduction in the 1990s of the branches of the military-industrial complex, developing equipment and weapons for the fleet, the latest models of this equipment and weapons are now being manufactured not series, but individual instances. The production of educational and training samples for Maritime training institutions is not necessary at all. In these circumstances, as the only means to ensure that the professional military and the naval-training preparation, can only be considered virtual analogs of models of military and civilian equipment and weapons developed by means of information technology, i.e. naval training simulation systems (TSS). The development and application proposed in this article models of interval estimation results of Equator-based testing provides a transition from the point estimates of the relative frequency to estimate probability of correct actions that have the amount directly estimate DEE. The latter provides the application of these models to solve the problem of automation of process criteria-oriented testing in order to ensure its efficiency by stopping the procedure for making TK after radiation evaluating a given accuracy.

Keywords: criterion-based test; a test task; the test results; point estimate; interval estimate; confidence interval; the given error, the marines.

For citation:

Pechnikov, Denis A. "Model management of the process criteria-oriented testing at training of specialists in the navy." *Vestnik Gosudarstvennogo universiteta morskogo i rechnogo flota imeni admiral S. O. Makarova* 9.3 (2017): 663–673. DOI: 10.21821/2309-5180-2017-9-3-663-673.

УДК 371.3:681.51

МОДЕЛИ УПРАВЛЕНИЯ ПРОЦЕССОМ КРИТЕРИАЛЬНО-ОРИЕНТИРОВАННОГО ТЕСТИРОВАНИЯ ПРИ ПОДГОТОВКЕ СПЕЦИАЛИСТОВ НА ФЛОТЕ

Д. А. Печников

Военно-морская академия имени Адмирала Флота Советского Союза Н. Г. Кузнецова,
Санкт-Петербург, Российская Федерация

В статье рассматриваются модели управления процессом выполнения системы одиночных критериально-ориентированных тестовых заданий с единственным верным ответом, обеспечивающие остановку тестирования при достижении необходимой достоверности оценки его результатов в процессе подготовки специалистов для флота. Разработка и применение предлагаемых в данной статье моделей оценивания

результатов критериально-ориентированного тестирования обеспечивает переход от точечных оценок эмпирической частоты к оценкам вероятности правильного действия, которые имеют количественно оцениваемый доверительный интервал. Последнее обеспечивает применение этих моделей для решения задачи автоматизации управления процессом критериально-ориентированного тестирования в целях обеспечения его оперативности путем остановки процедуры предъявления текущего задания после получения оценки заданной достоверности. Также в статье рассматривается применение моделей критериально-ориентированного оценивания в компьютерных системах тестирования; доказано, что данные модели повышают результаты текущего контроля. Для того, чтобы осуществлять профессиональную подготовку специалистов как гражданского морского флота, так и ВМФ, необходима соответствующая учебно-материальная база. Основу такой базы раньше всегда составляли действующие учебные и тренировочные образцы гражданской и военной техники и вооружения, которые ранее поступали в военно-морские и гражданские морские учебные заведения в достаточном количестве и обеспечивали необходимый уровень как теоретической, так и практической подготовки будущих специалистов флота. В результате резкого сокращения в 1990 гг. отраслей военно-промышленного комплекса, разрабатывающих технику и вооружение для флота, новейшие образцы этой техники и вооружения теперь изготавливаются не сериями, а отдельными экземплярами. Вопрос о производстве учебных и тренировочных образцов для морских учебных заведений не стоит вообще. В этих условиях в качестве единственного средства, способного обеспечить военно-профессиональную и морскую подготовку, могут рассматриваться только виртуальные аналоги образцов военной и гражданской техники и вооружения, разрабатываемые средствами информационных технологий, т. е. флотские тренажерно-обучающие системы, что указано в международных морских конвенциях.

Ключевые слова: критериально-ориентированный тест; тестовое задание; результаты тестирования; точечная оценка; интервальная оценка; доверительный интервал; заданная погрешность, морской флот.

Для цитирования:

Печников Д. А. Модели управления процессом критериально-ориентированного тестирования при подготовке специалистов на флоте / Д. А. Печников // Вестник Государственного университета морского и речного флота имени адмирала С. О. Макарова. — 2017. — Т. 9. — № 3. — С. 663–673. DOI: 10.21821/2309-5180-2017-9-3-663-673.

Введение

Под контролем качества тестирования обычно понимается совокупность мероприятий, проводимых над объектом тестирования в процессе разработки для постоянного получения исчерпывающей информации о соответствии объекта тестирования поставленным требованиям [1], [2]. В качестве перспективного методологического средства реализации контроля при подготовке специалистов морского транспорта и ВМФ сегодня рассматриваются методы тестологии, а в качестве технического средства — компьютерные системы тестирования (КСТ) при подготовке специалистов для флота. Выделяют входной, текущий и итоговый виды контроля.

Входной и итоговый контроль предваряют и завершают учебный процесс подготовки морских специалистов. Его результаты могут и должны учитываться при проектировании обучения как судоводителей, так и курсантов других морских специальностей, но они не ориентированы на корректуру уже начавшегося процесса. Эти виды контроля могут быть реализованы средствами как нормативно-ориентированного, так и критериально-ориентированного тестирования в подготовке специалистов для морского транспорта. В отличие от них, *текущий* контроль реализуется непосредственно в процессе обучения морским специальностям, а его важнейшей функцией является функция обратной связи, которая позволяет преподавателю получать сведения о ходе процесса усвоения у каждого курсанта и адаптировать процесс обучения к их потребностям и будущей морской специализации [3]. Адаптировать процесс морского образования и конкретно обучения будущих специалистов флота к потребностям обучаемых на основе данных нормативно-ориентированного тестирования невозможно. Для этого нужны оценки, идентифицирующие соотношения вида «усвоил — не усвоил» между теми конкретными обучаемыми и теми конкретными познавательными объектами, в отношении которых реализуется рассматриваемый процесс обучения в морском вузе. Поэтому для решения задач текущего контроля при подготовке специалистов мор-

ского и речного транспорта могут использоваться только методы критериально-ориентированного тестирования.

Между уровнями развития методов и технических средств критериально-ориентированного тестирования имеет место противоречие. В числе морских КСТ, представленных в Интернете, преобладают программные средства, ориентированные на решение задач критериально-ориентированного тестирования (Adit Testdesk, М-Тест, EasyQuizzy, MultiTester System, RSP, The Examiner testing system, FastTEST professional, C-Quest, CONTEST, SunRav TestOfficePro, HyperTest, UniTest System, TestMaster, AVELife TestGold Studio, ACT-Тест Plus, e-University, RichTest, Tester, Грамотей-КЛАСС, «Контроль знаний», «Система проверки знаний», «Универсальный тестовый комплекс», «Экзаменатор», «Аттестация», УСАТИК и т. д.). Преобладание критериально-ориентированных КСТ обусловлено тем, что для контроля уровня обученности более привычной и естественной является задача, решаемая в рамках критериально-ориентированного тестирования [3]. Однако именно этот вид тестирования не имеет развитых методов оценивания полученных результатов.

Методы классической теории тестов и современной тестовой теории IRT (Item Response Theory) [4] преимущественно ориентированы на ранжировку обучаемых по уровню обученности вне зависимости от достаточности или недостаточности достигнутого ими уровня усвоения рассматриваемой предметной области. Вопросы проектирования и оценки результатов выполнения критериально-ориентированных тестов, устанавливающих соотношение «усвоил – не усвоил» между обучаемым и конкретной совокупностью элементов содержания обучения, решаются по остаточному принципу. В результате «... отсутствие стандарта или хотя бы общепринятых норм и правил создания компьютерных систем тестирования для подготовки морских специалистов привело к тому, что практически каждая из них является “вещью в себе” и не имеет описания алгоритмов функционирования, в частности — описания реализуемых процедур оценивания результатов тестирования» [5, с. 59].

Ориентированность на решение задач текущего контроля предъявляет к методам и средствам критериально-ориентированного тестирования в морском образовании ряд специфических требований. В числе этих требований одним из ведущих является требование оперативности. Задачи текущего контроля при подготовке специалистов на флоте имеют целью выработку адресных обучающих воздействий и в идеале должны решаться в реальном масштабе времени непосредственно в процессе обучения и подготовки. Поэтому в соответствии с требованиями международных морских конвенций процесс критериально-ориентированного тестирования должен занимать минимум времени. Оперативность процедур обработки и отображения результатов действий обучаемых проблем не вызывает, поскольку полностью обеспечивается за счет быстрого действия аппаратно-программных средств КСТ, а вот оперативность самой процедуры тестирования в современных КСТ не обеспечивается.

Эти обстоятельства определяют необходимость разработки и внедрения в программное обеспечение КСТ, используемых для подготовки специалистов гражданского флота, методов и процедур, которые непосредственно направлены на выполнение требования обеспечения оперативности тестирования. Другими словами, для полноценного достижения целей текущего контроля при подготовке специалистов морских специальностей необходимо минимизировать продолжительность процедуры критериально-ориентированного тестирования, обеспечивая при этом заданную достоверность получаемых результатов.

Методы и материалы

Время выполнения теста определяется как произведение $T = tn$ двух параметров: 1) t — скорость теста (test speededness) [2], оцениваемая временем выполнения одного тестового задания (ТЗ), которое для заданий закрытой формы обычно составляет 30 – 40 с на ТЗ; 2) n — длина теста (test length), измеряемая числом ТЗ в тесте. Скорость тестирования обусловлена психофизиологическими возможностями обучаемых, а потому не может быть существенно сокращена. Сокра-

цена может быть только длина теста. Поэтому выполнение требования оперативности процедур критериально-ориентированного тестирования при подготовке специалистов в морских учебных заведениях связано, прежде всего, с минимизацией числа тестовых заданий, которые должен выполнить испытуемый, за счет остановки процесса тестирования после выполнения очередного задания и получения текущих результатов, обеспечивающих принятие достоверного индивидуального решения «аттестован – не аттестован» («зачет – незачет»). На минимизацию числа выполняемых ТЗ ориентирован ряд методов и моделей, которые, по своей сути, базируются на двух подходах.

Суть *первого подхода* состоит в завершении процедуры тестирования после того, как соотношение «больше» или «меньше» между оценкой результатов тестирования и принятым критерием станет определяться с заданной (достаточной) достоверностью. В рамках этого подхода сформулирована задача выбора такой длины теста, которая бы при сравнении достигнутой вероятности p успешного выполнения теста с критериальным значением p_0 этой вероятности обеспечивала исключение заданных величин ошибок 1-го рода (α), когда знающий материал обучаемый получает отрицательный результат (незачет), и 2-го рода (β), когда незнающий материал обучаемый получает зачет. Наиболее совершенный вариант решения этой задачи был предложен в 1980 – 1982 гг. Р. А. Берком [6] и Ван дер Линденом [7], которые обратили внимание на то, что в рамках принятой биномиальной модели имеет место линейная зависимость между проходным баллом и соответствующей ему длиной теста, и эта зависимость может быть использована в процедуре оптимизации длины теста в качестве нового критерия. Для такого показателя справедливо соотношение вида [11]:

$$\frac{c_{1,2}}{n} = \frac{\ln \frac{1-p_1}{1-p_2}}{\ln \frac{p_2(1-p_1)}{p_1(1-p_2)}} + \frac{\ln \lambda_{1,2}}{n \ln \frac{p_2(1-p_1)}{p_1(1-p_2)}} \quad \text{при} \quad \begin{cases} \lambda_1 = \frac{\beta}{1-\alpha} & \text{для } c_1; \\ \lambda_2 = \frac{1-\beta}{\alpha} & \text{для } c_2 \end{cases}, \quad (1)$$

где $c_{1,2}$ — соответственно значения проходного балла для верхней (p_2) и нижней (p_1) границ зоны неопределенности (интервала безразличия); α, β — соответственно значения значимости ошибок 1 и 2-го рода принимаемых решений.

Как отметил Ван дер Линден, «... это соотношение интересно тем, что левая его часть представляет собой относительную оценку проходного балла, а правая является константой, которая не зависит от длины теста и определяется только граничными значениями зоны безразличия. Всякий раз, когда устанавливаются границы зоны безразличия, мы получаем возможность узнать проходной балл для любой длины теста» [7, с. 149–164]. Суть этого положения демонстрируется на рис. 1, где приведены зоны принятия решения вида «усвоил – не усвоил» («зачет – незачет», «аттестован – не аттестован» и т. п.) для области безразличия с параметрами $\alpha = \beta = 0,05$; $p_1 = 0,4$; $p_2 = 0,6$.

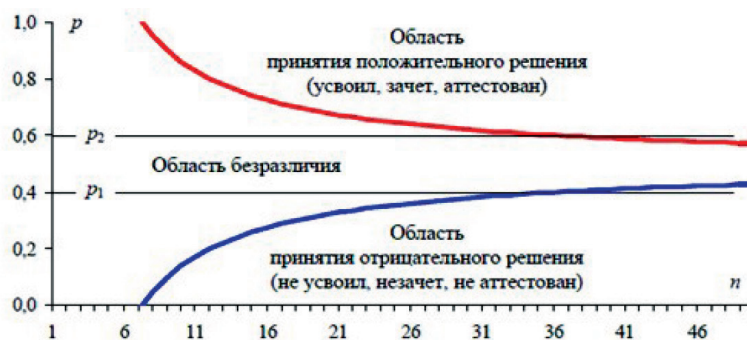


Рис. 1. Области принятия решений вида «аттестован – не аттестован»

Суть *второго подхода*, который частично представлен в [8], состоит в прекращении тестирования после того, как ширина доверительного интервала (ДИ) оценки результатов тестирования

станет меньше некоторого наперед заданного нормативного значения. Здесь задача выбора длины теста формулируется как задача прекращения тестирования после того, как фактическая ширина ДИ последней оценки p успешного выполнения теста становится меньше ее наперед заданного значения. Если ТЗ теста формулируются в закрытой форме с единственным правильным ответом, то в соответствии с [11], [12] для решения задачи минимизации длины теста на основе данных о погрешности полученных оценок результатов тестирования могут быть использованы две модели.

Первая модель, основанная на биномиальном законе распределения, имеет вид [11]:

$$\left. \begin{aligned} \hat{p}_i &= \frac{i-k}{i}; \\ p_i^{\text{верх}} &= \frac{(i-k+1)F_{2(i-k+1), 2k, 1-\varepsilon/2}}{k+(i-k+1)F_{2(i-k+1), 2k, 1-\varepsilon/2}}; \\ p_i^{\text{низ}} &= \frac{(i-k)}{(i-k)+(k+1)F_{2(k+1), 2(i-k), 1-\varepsilon/2}} \end{aligned} \right\}, \quad (2)$$

где $i (i = \overline{1, n})$ — число выполненных ТЗ; n — число ТЗ в тесте; $k (k = \overline{0, i})$ — число ошибок; $\hat{p}_i (p \in (0, 1))$ — оценка вероятности успеха после выполнения i -го ТЗ; $p_i^{\text{верх}}, p_i^{\text{низ}}$ — соответственно верхняя и нижняя границы ДИ вероятности успеха после выполнения i -го ТЗ; $F_{f, g, \alpha}$ — квантиль порядка α распределения F с f, g степенями свободы.

Вторая модель базируется на геометрическом законе распределения и в [11] представлена в следующем виде:

$$\left. \begin{aligned} \hat{p}_i &= \arg \max_p \left[p^{(i-k)+(m-l)} (1-p)^{k+l} \right]; \\ p_i^{\text{верх}} &= \hat{p}_i + u_{1-\varepsilon/2} \sqrt{\frac{\hat{p}(1-\hat{p})}{i}}; \\ p_i^{\text{низ}} &= \hat{p}_i - u_{1-\varepsilon/2} \sqrt{\frac{\hat{p}(1-\hat{p})}{i}} \end{aligned} \right\}, \quad (3)$$

где $(i-k) ((i-k) = \overline{0, i})$ — число правильно выполненных ТЗ; $l, (m-l)$ — соответственно число векторов непрерывного успеха и непрерывной неудачи ($m+l \leq i$); $\hat{p}_i (p \in (0, 1))$ — результат тестирования после выполнения i -го ТЗ (оценка вероятности успеха, получаемая по методу правдоподобия); $L_i = p^{(i-k)+(m-l)} (1-p)^{k+l}$ — функция правдоподобия; $p_i^{\text{верх}}, p_i^{\text{низ}}$ — соответственно верхняя и нижняя границы ДИ вероятности успеха после выполнения i -го ТЗ; $u_{1-\varepsilon/2}$ — квантили стандартного нормального распределения порядка $1 - \varepsilon / 2$.

Оценки (2) и (3) в достаточной мере согласованы. Экспериментально выявленная в [11] динамика этих оценок в общем случае имеет вид, приведенный на рис. 2.

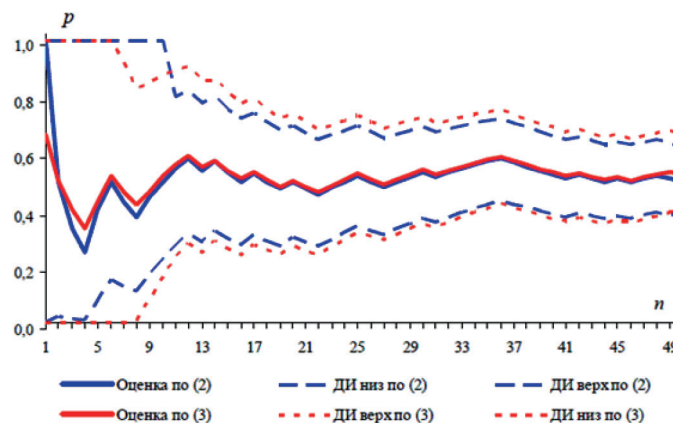


Рис. 2. Динамика изменения результатов тестирования среднеевропейского обучающего (результат оценивания $0,376 < p = 0,500 < 0,624$ при $\alpha = 0,1$)

Кроме уже рассмотренных различий между первым и вторым подходами, есть еще одно, на которое следует обратить внимание. Это различие состоит в том, что первый подход реализует процедуры измерения и оценивания, а второй подход — только процедуру измерения. Суть этого отличия требует определенного комментария. Понятия «оценивание» и «измерение» формулируются в двух предметных областях квалитологии — в метрологии и в квалиметрии.

В метрологии измерение рассматривается как частный случай оценивания: 1) измерение — сравнение измеряемой величины (конкретного проявления измеряемого свойства) со шкалой этого свойства в целях получения результата измерения (оценки свойства или значения величины) [9]; 2) оценивание — «аналог измерения, применяемый в тех случаях, когда невозможно выполнить измерение (не выделена величина как физическая и не определена единица измерений этой величины) [9, с. 121].

В квалиметрии приняты другие трактовки: 1) измерение — процедура определения единичного показателя качества [10]; 2) оценивание — процедура определения численного значения уровня качества продукции [10]. Единичный показатель качества — это количественная характеристика одного из свойств продукции [13], а уровень качества — относительная характеристика качества, основанная на сравнении значений показателей качества оцениваемого объекта с базовыми значениями соответствующих показателей [13]. Из последних дефиниций следует, что в квалиметрии понятия оценивания и измерения рассматриваются как несоподчиненные.

Эталоны, используемые при измерении и оценивании, также имеют отличия: в оценивании эталон имеет ценностный, системно-социальный характер и меняется вместе с социально-экономическим и научно-техническим прогрессом, т. е. имеет переходящее существование. В измерении эталон постоянен и определяет шкалы измерения единичных показателей качества [10]. Другими словами, в квалиметрии считается, что любое свойство нужно сначала измерить (получить его объективную оценку в некоторой неизменной шкале), а затем оценить полученный результат [14], т. е. сравнить его с тем значением рассматриваемого свойства, которое принято в качестве эталона, и сформулировать свое отношение к результатам этого сравнения.

Необходимость различения первого и второго подходов по признаку «измерение – оценивание» определяется тем фактом, что во всех КСТ принят квалиметрический подход [15]: 1) функции измерения и оценивания разделены; 2) функция измерения реализуется всегда одинаково в одной и той же шкале; 3) параметры оценивания определяются разработчиком теста (преподавателем), который сам выбирает эталоны и шкалы их оценивания. Далее следует отметить, что модели (2) и (3) являются интервальными, а потому обеспечивают сравнение с эталонами как самих результатов тестирования, так и их погрешностей. Другими словами, они способны обеспечить реализацию обоих рассмотренных подходов.

С учетом последнего, всю процедуру управления критериально-ориентированным тестированием при подготовке специалистов для флота можно представить в виде, приведенном на рис. 3. Эта процедура предполагает, что после выполнения испытуемым каждого ТЗ проводится проверка текущего результата тестирования на его соответствие принятому критерию управления. Если такое соответствие имеет место, то тестирование прекращается. В противном случае испытуемый, вплоть до выполнения всего теста, получает следующее ТЗ. В любом случае в качестве окончательного результата тестирования принимается последняя текущая оценка.

Различие в процедуре реализации рассмотренных подходов к минимизации длины теста сводится к различию в принятых критериях управления.

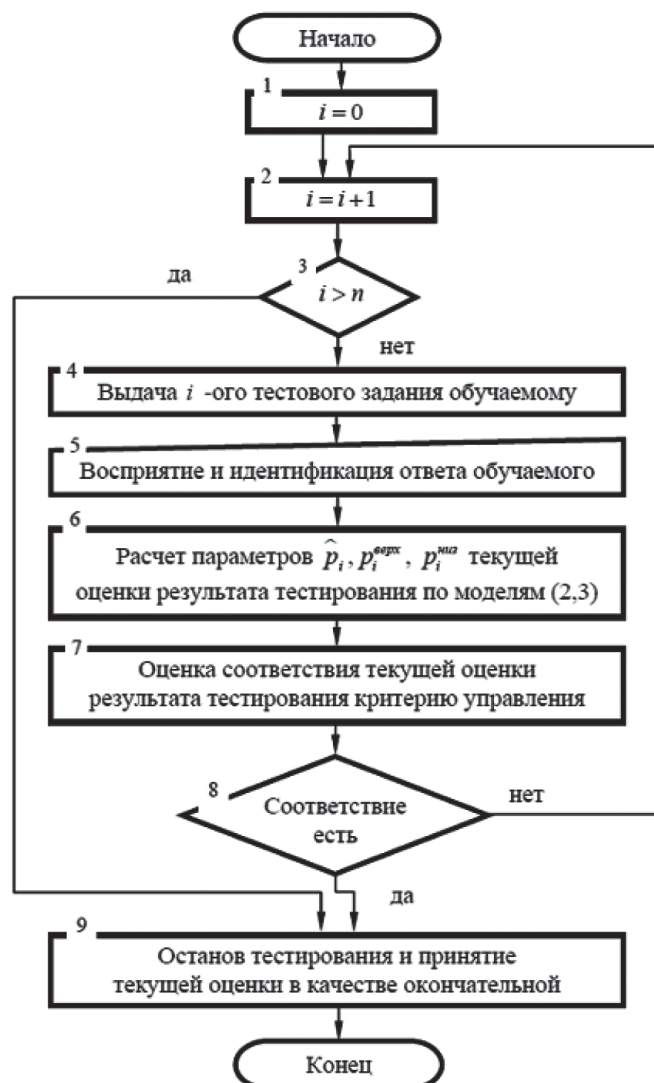


Рис. 3. Процедура управления критериально-ориентированным тестированием при подготовке специалистов для флота

Для реализации *первого* из рассматриваемых подходов вместо расчетов по модели (1) предлагается после выполнения обучаемым каждого ТЗ по моделям (2) и (3) определять верхнюю границу $p_i^{\text{верх}}$ и нижнюю границу $p_i^{\text{низ}}$ ДИ оценки $\hat{p}_i$ и использовать эти данные для выработки управляющих воздействий по критерию

$$I_i = \begin{cases} 1 & \text{при } \begin{cases} p_i^{\text{низ}} > p_0; \\ p_i^{\text{верх}} < p_0, \end{cases} \\ 0 & \text{в ином случае} \end{cases} \quad (4)$$

где I_i — результаты сравнения верхней $p_i^{\text{верх}}$ и нижней $p_i^{\text{низ}}$ границ ДИ текущей оценки $\hat{p}_i$ с нормативным значением p_0 результата тестирования ($I_i = 1$ — останов тестирования; $I_i = 0$ — продолжение тестирования).

Критерий (4) определяет наличие у текущего результата $\hat{p}_i$ требуемой достоверности, но функцию его оценивания не реализует. Формулировка в системе предпочтений преподавателя отношения к значению $\hat{p}_i$ («зачет – незачет») здесь не производится, поскольку функция оценивания во всех КСТ (пример на рис. 4) реализуется отдельно, причем не только в дихотомической, но и в других шкалах.



Рис. 4. Окно задания параметров процедуры оценивания в КСТ «Адаптивная система тестирования» (АСТ)

В соответствии со *вторым* подходом процесс тестирования должен быть остановлен после получения текущего результата $\hat{p}_i$ заданной точности $\delta^{\text{зад}}$, когда границы ДИ начинают располагаться внутри нормативного интервала ($\hat{p}_i \pm \delta^{\text{зад}}$), т. е. имеет место соотношение $(p_i^{\text{верх}}, p_i^{\text{низ}}) \in (\hat{p}_i + \delta^{\text{зад}}, \hat{p}_i - \delta^{\text{зад}})$. В этом случае остановку процесса тестирования следует осуществлять по критерию

$$I_i = \begin{cases} 1 & \text{при выполнении условий} \begin{cases} p_i^{\text{верх}} < \hat{p}_i + \delta^{\text{зад}}; \\ p_i^{\text{низ}} > \hat{p}_i - \delta^{\text{зад}} \end{cases} \\ 0 & \text{в ином случае} \end{cases}, \quad (5)$$

где I_i результат сравнения заданной и достигнутой точности оценок тестирования ($I_i = 1$ — останов тестирования; $I_i = 0$ — продолжение тестирования).

Результаты

Группе, состоящей из 129 курсантов-судоводителей (испытуемых) был предложен тест, который включал 50 закрытых ТЗ с выбором из пяти альтернатив единственного верного ответа. ТЗ предъявлялись в случайном порядке. Воздействия по управлению процессом тестирования по моделям (4) и (6) вырабатывались и фиксировались апостериори. Для расчета управляющих воздействий были приняты следующие модели: 1) модели (2) и (3) с параметром $\alpha = 0,05$; 2) критерий (4) с параметром $p_0 = 0,5$; 3) критерий (5) с параметрами $\delta_1^{\text{зад}} = 0,1$; $\delta_2^{\text{зад}} = 0,15$; $\delta_3^{\text{зад}} = 0,2$. В табл. 1 приведены характеристики выработанных воздействий.

Таблица 1

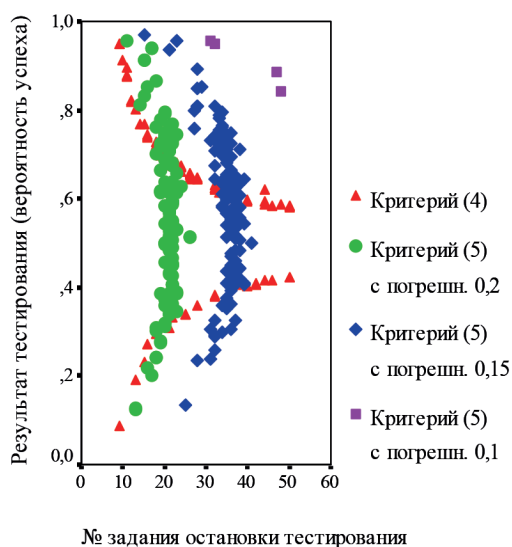
Результаты применения критериев управления тестированием

Результаты применения способа управления	Управление по критерию (5) с допустимой погрешностью			Управление по критерию (4)
	$\delta^{\text{зад}} = 0,1$	$\delta^{\text{зад}} = 0,15$	$\delta^{\text{зад}} = 0,2$	
Число случаев останова тестирования	5	129	129	87
Процент случаев останова тестирования	3,9 %	100,0 %	100,0 %	67,4 %
Среднее отклонение результата от «истинного»	0,005	0,056	0,091	0,037

Наглядно результаты применения критериев (4) и (5) представлены на рис. 5.

Для оценки эффективности альтернативных критериев управления (4) и (5) использовались показатели эффективности, представляющие собой измеряемые на интервале (0;1) показатели вида «чем больше, тем лучше»:

1) частный показатель $k_{ij}^{(1)}$ оперативности управления



№ задания остановки тестирования
Рис. 5. Взаимосвязь результатов тестирования и длины теста при управлении по критериям (4, 5)

$$k_j^{(1)} = 1 - \frac{i_j^{\min}}{n} \quad k_j^{(1)} \in [0, 1], \quad (6)$$

где $j (j = \overline{1, m})$ — номер испытуемого; $i_j^{\min}$ — номер последнего ТЗ, выполненного j -м испытуемым (номер ТЗ, после выполнения которого тестирование было прекращено); n — длина теста (число ТЗ в тесте);

2) частный показатель $k_j^{(2)}$ точности оценки результатов тестирования

$$k_j^{(2)} = 1 - \Delta p_{i_j^{\min}} = 1 - |p_{i_j^{\min}} - p_j^*|, \quad k_j^{(2)} \in [0, 1], \quad (7)$$

где $j (j = \overline{1, m})$ — номер испытуемого; $i_j^{\min}$ — номер последнего выполненного ТЗ, $p_{i_j^{\min}}^*$ — окончательный результат тестирования; p_j^* ($p_j = p_{nj}$) — истинный балл (true score) — результат, полученный после выполнения всех ТЗ теста;

3) интегральный показатель K_j эффективности управления процессом тестирования

$$K_j = k_j^{(1)} k_j^{(2)} = \left(1 - \frac{i_j^{\min}}{n}\right) (1 - \Delta p_{i_j^{\min}}), \quad K_j \in [0, 1]. \quad (8)$$

В табл. 2 приведены обобщенные результаты оценки эффективности критериев (4) и (5) управления тестированием.

Таблица 2

Показатели эффективности критериев управления тестированием

Показатель эффективности	Управление по критерию (5) с допустимой погрешностью			Управление по критерию (4)
	$\delta^{\text{зад}} = 0,1$	$\delta^{\text{зад}} = 0,15$	$\delta^{\text{зад}} = 0,2$	
Оперативности управления (6)	0,007	0,313	0,593	0,313
Точности управления (7)	0,995	0,944	0,909	0,963
Интегральный (8)	0,006	0,294	0,538	0,292

Наглядно эти результаты представлены на рис. 6.

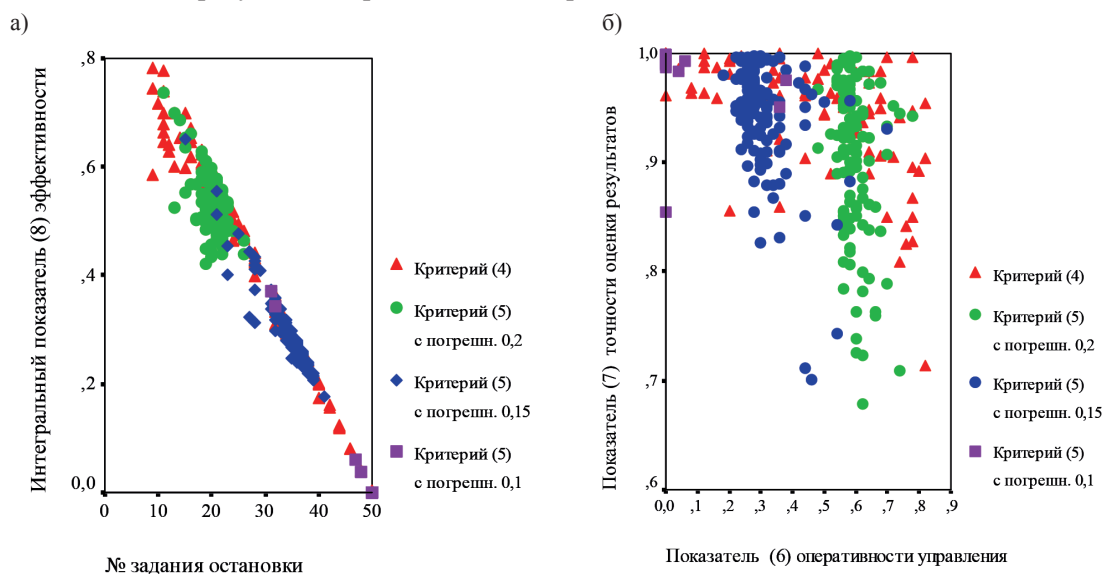


Рис. 6. Точечная диаграмма соответствия:

а — индивидуальных оценок интегральной эффективности управления тестированием длине теста;
б — частных показателей (6) и (7) эффективности управления тестированием

Заключение

Критерии (4) и (5) и реализующая их процедура управления критериально-ориентированным тестированием (см. рис. 1) работоспособны и обеспечивают приемлемую эффективность в подготовке и оценке знаний морских специалистов. Каждый из критериев (4) и (5) имеет свои достоинства и недостатки, которые обусловлены общими закономерностями изменения используемых в них показателей. Последнее определяет целесообразность попытки синтеза этих критериев в один обобщенный критерий. Разработанный в статье новый переход от точечных оценок эмпирической частоты успешного выполнения тестовых заданий к интервальным оценкам вероятности этой успешности, позволяет с достаточной точностью определять погрешность и доверительный интервал полученных оценок при подготовке специалистов для флота.

Для эффективного внедрения средств оперативного критериально-ориентированного контроля знаний в процесс подготовки специалистов для флота и обеспечения возможности совместного анализа и обработки оценок результатов обучения по морским специальностям, полученных компьютерными системами тестирования и преподавателем, целесообразно реализовать следующие практические рекомендации:

– в соответствии с материалами ряда международных морских конвенций, формулировку системы предпочтений преподавателя в отношении качества подготовки специалистов для флота и системы предпочтений преподавателя в отношении значимости единичных тестовых заданий в тесте следует рассматривать в качестве наиболее ответственных этапов подготовки теста к практическому использованию;

– преподавателю, впервые производящему ввод своих систем предпочтений, следует проверить их фактическое соответствие на выборке из пяти – десяти таких результатов выполнения теста, которые покрывают весь спектр возможных результатов (от полностью верных до полностью неверных).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Аванесов В. С. Проблема формы тестовых заданий [Электронный ресурс] / В. С. Аванесов. — Режим доступа: <http://testolog.narod.ru/Theory32.html> (дата обращения: 07.11.2016).
2. Мятлев В. Д. Теория вероятностей и математическая статистика, математические модели / В. Д. Мятлев. — М.: Академия, 2009. — 320 с.
3. Переверзев В. Ю. Моделирование процесса критериально-ориентированного педагогического тестирования курсантов вузов: дис. ... канд. пед. наук / В. Ю. Переверзев. — М.: Военный ун-т, 2000. — 198 с.
4. Печников А. Н. Метод интервальной оценки результатов выполнения системы одиночных тестовых заданий закрытого типа с единственным верным ответом / А. Н. Печников, К. С. Палкин // Образовательные технологии и общество. — 2014. — Т. 17. — № 2. — С. 491–501.
5. Тухтаров Р. Р. Оценка контроля знаний с использованием обучающих систем ВМФ / Р. Р. Тухтаров, А. О. Туровская // Морской сборник. — 2013. — Т. 2000. — № 11. — С. 57–59.
6. Berk R. A. Criterion-referenced measurement: The state of art / R. A. Berk. — Baltimore, MD: The Johns Hopkins University Press, 1980. — Pp. 41–42.
7. Van der Linden Wim J. Passing score and length of a mastery test / Wim J. van der Linden // Evaluation in Education. — 1982. — Vol. 5. — Is. 2. — Pp. 149–164. DOI: 10.1016/0191-765X(82)90015-5.
8. Палкин К. С. Метод управления длиной системы одиночных тестовых заданий с единственным верным ответом / К. С. Палкин, А. Н. Печников, Д. А. Печников // Образовательные технологии и общество. — 2015. — Т. 18. — № 1. — С. 544–560.
9. РМГ 29-2013. Метрология. Основные термины и определения (введен 01.01.2015). — М.: Стандартинформ, 2014. — 121с.
10. ГОСТ 15467-79. Управление качеством продукции. Основные понятия. Термины и определения (с изм. № 1). — М.: Стандартинформ, 2009. — 11 с.
11. Тухтаров Р. Р. Анализ подходов к разрешению противоречий в процедурах измерения и оценивания результатов критериально-ориентированного тестирования в современных компьютерных системах тестирования / Р. Р. Тухтаров // Журнал научных публикаций аспирантов и докторантов. — 2013. — № 10 (88). — С. 239–243.
12. Кошелев М. Н. Компьютерная технология критериально-ориентированного тестирования / М. Н. Кошелев, М. Ю. Мамонтова. — Омск: Изд-во Ур.ГПУ, 2014. — 106 с.
13. Бочкарева Ю. Е. Моделирование тестово-обучающей системы на основе комбинированной модели с использованием критериально-ориентированного тестирования / Ю. Е. Бочкарева, Н. А. Грачева //

Современные исследования в области естественных и технических наук: междисциплинарный поиск и интеграция: материалы науч.-практич. всероссийской конф. (школы-семинара) молодых ученых. —Тольятти: ФГБОУ ВПО «Тольяттинский государственный университет», 2012. — С. 17–20.

14. Субетто А. И. Сочинения. Ноосферизм: в 13 т. / А. И. Субетто; под ред. Л. А. Зеленова. — СПб.: Кострома: Изд-во КГУ им. Н. А. Некрасова, 2009. — Т. 8. Квалитативизм: философия и теория качества, квалитология, качество жизни, качество человека и качество образования. — Кн. 2. — 334 с.

15. Kaftandjieva F. Methods for setting cut scores in criterion-referenced achievement tests: A comparative analysis of six recent methods with an application to tests of reading in EFL / F. Kaftandjieva. — Cito, Arnhem: EALTA, 2010. — 169 p.

REFERENCES

1. Avanesov, V. S. Problema formy testovykh zadaniy. Web. 7 Nov. 2016 <<http://testolog.narod.ru/Theory32.html>>.
2. Myatlev, V. D. *Teoriya veroyatnostei i matematicheskaya statistika, matematicheskie modeli*. M.: Akademiya, 2009.
3. Pereverzev, V. Yu. Modelirovanie protsessa kriterial'no-orientirovannogo pedago-gicheskogo testirovaniya kursantov vuzov. PhD diss. M.: Voennyi universitet, 2000.
4. Pechnikov, A. N., and K. S. Palkin. "Metod interval'noi otsenki rezul'tatov vypolneniya sistemy odinochnykh testovykh zadaniy zakrytogo tipa s edinstvennym vernym otvetom." *Obrazovatel'nye tekhnologii i obshchestvo* 17.2 (2014): 491–501.
5. Tukhtarov, R. R., and A. O. Turovskaya. "Otsenka kontrolya znaniy s ispol'zovaniem obuchayushchikh sistem VMF." *Morskoi sbornik* 2000.11 (2013): 57–59.
6. Berk, R. A. *Criterion-referenced measurement: The state of art*. Baltimore, MD: The Johns Hopkins University Press, 1980.
7. Van der Linden, Wim J. "Passing score and length of a mastery test." *Evaluation in Education* 5.2 (1982): 149–164. DOI: 10.1016/0191-765X(82)90015-5
8. Palkin, K. S., A. N. Pechnikov, and D. A. Pechnikov. "Metod upravleniya dlinoi sistemy odinochnykh testovykh zadaniy s edin-stvennym vernym otvetom." *Obrazovatel'nye tekhnologii i obshchestvo* 18.1 (2015): 544–560.
9. Russian Federation. Recommendations on interstate standardization RMG 29-2013. Metrology. Basic terms and definitions (introduced from 01.01.2015). M.: StandardInform, 2014.
10. Russian Federation. State Standart GOST 15467-79. Product-quality control. Basic concepts. Terms and definitions. M.: Standardinform, 2009.
11. Tuktarov, R. R. "Analiz podkhodov k razresheniyu protivorechii v protsedurakh izmereniya i otsenivaniya rezul'tatov kriterial'no-orientirovannogo testirovaniya v svoevremennykh komp'yuternykh sistemakh testirovaniya." *Zhurnal nauchnykh publikatsii aspirantov i doktorantov* 10 (88) (2013): 239–243.
12. Koshelev, M. N., and M. Yu. Mamontova. *Komp'yuternaya tekhnologiya kriterial'no-orientirovannogo testirovaniya*. Omsk: Ur.GPU, 2014.
13. Bochkareva, Yu. E., and N. A. Gracheva. "Modelirovanie testovo-obuchayushchei sistemy na osnove kombinirovannoi modeli s ispol'zovaniem kriterial'no-orientirovannogo testirovaniya." *Sovremennye issledovaniya v oblasti estestvennykh i tekhnicheskikh nauk: mezhdistsiplinarnyi poisk i integratsiya: materialy nauchno-prakticheskoi vse-rossiiskoi konferentsii (shkoly-seminara) molodykh uchenykh*. Tol'yatti: FGBOU VPO "Tol'yatinskii gosudarstvennyi universitet", 2012: 17–20.
14. Subetto, A. I. *Sochineniya. Noosferizm: V 13 tomakh. Tom vos'moi: Kvalitativizm: filosofiya i teoriya kachestva, kвалitologiya, kachestvo zhizni, kachestvo cheloveka i kachestvo obrazovaniya. Kniga 2*. Edited by L. A. Zelenov. S.-Peterburg-Kostroma: KGU im. N.A. Nekrasova, 2009.
15. Kaftandjieva, F. *Methods for setting cut scores in criterion-referenced achievement tests: A comparative analysis of six recent methods with an application to tests of reading in EFL* / F. Kaftandjieva. Cito, Arnhem: EALTA, 2010.

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРЕ

Печников Денис Андреевич —
кандидат технических наук, доцент
Военно-морская академия имени Адмирала
Флота Советского Союза Н. Г. Кузнецова
197045, Российская Федерация, г. Санкт-Петербург,
Ушаковская набережная, 17/1
e-mail: 19pda72@bk.ru

INFORMATION ABOUT THE AUTHOR

Pechnikov, Denis A. —
PhD., associate professor
Naval Academy named after Admiral of the Fleet
of the Soviet Union N.G. Kuznetsov
17/1, Ushakovskaya naberezhnaya, St. Petersburg,
197045, Russian Federation
e-mail: 19pda72@bk.ru

Статья поступила в редакцию 24 апреля 2017 г.

Received: April 24, 2017.

Научное периодическое издание

Вестник Государственного университета морского и речного флота имени адмирала С. О. Макарова

Том 9. № 3

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 28.06.17. Формат 60×90/8
Гарнитура Times New Roman. Усл. печ. л. 29,25. Тираж 500 экз. Заказ № 398/2017

Государственный университет морского и речного флота имени адмирала С. О. Макарова
198035, Санкт-Петербург, ул. Двинская, 5/7