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. № 2

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

САНКТ-ПЕТЕРБУРГ
2017

ББК 95

Вестник Государственного университета морского и речного флота имени адмирала С. О. Макарова. — СПб.: ГУМРФ имени адмирала С. О. Макарова, 2017. — Т. 9. — № 2. — 218 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 ... 229

Кузнецов А. Л., Кириченко А. В., Щербакова-Слюсаренко В. Н. Оценка требований к оборудованию в контейнерных сетях доставки 229

Акмайкин Д. А., Хоменко Д. Б., Клюева С. Ф. Обзор функциональных возможностей и перспективы современных автоматизированных систем планирования маршрута судна 237

Ермаков С. В. Исследование скоростного режима судов на открытом прямолинейном участке Калининградского морского канала 252

Дерябин В. В. Кинематическая модель движения судна 260

Каретников В. В., Козик С В., Соколова И. А. Исследование влияния усталости судоводителя на процесс обеспечения безопасности судоходства 272

Маликова Т. Е., Янченко А. А., Вольнов И. Н. Модель массового обслуживания импортного грузопотока с применением технологии предварительного информирования 280

Эглит Я. Я., Цивелева М. А. Моделирование процессов совершения таможенных операций и проведения таможенного контроля на транспорте как системы массового обслуживания 288

Попов Г. Б. Моделирование ворот морского терминала со стороны автомобильного грузового фронта 296

Соловьев А. В. Методика оценки экологической эффективности судов внутреннего плавания 306

Купцов Н. В. Исследование актуальных размерений балкеров для технологического проектирования морских портов 323

ВОДНЫЕ ПУТИ СООБЩЕНИЯ И ГИДРОГРАФИЯ 337

Каюда А. В., Колосов М. А. Разработка контрольно-информационной системы обеспечения безопасности судопропуска 337

Волосухин В. А., Бандурин М. А. Необходимость многофакторной диагностики Донской шлюзованной системы в условиях роста дефицита водных ресурсов и безопасности сооружений 346

СУДОВЫЕ ЭНЕРГЕТИЧЕСКИЕ УСТАНОВКИ, СИСТЕМЫ И УСТРОЙСТВА 355

Яманин А. И., Жуков В. А. Оценка прочности шатунов с различным поперечным сечением стержня 355

Горбанева Е. А., Яковлев П. В. Численное исследование поведения высоковязкой жидкости при перевозке в танке наливного судна во время работы вспомогательной системы подогрева 364

Виноградов А. А. Исследование распределения нагрузки судовых дизель-генераторных агрегатов при их параллельной работе 373

Том 9. № 2

2017

РЕДАКЦИОННЫЙ СОВЕТ

Гл. редактор

С. О. Барышников,

д.т.н., проф.

rector@gumrf.ru

Зам. гл. редактора

А. П. Ныркov,

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.

ЭЛЕКТРОТЕХНИЧЕСКИЕ КОМПЛЕКСЫ И СИСТЕМЫ 380

Ничипоренко Н. Т., Сиваченко Б. Н. Сравнительный анализ потенциальной информационной ёмкости береговых и судовых радиолокационных станций 380

Самосейко В. Ф. , Шарашкин С. В. Управление гребным реактивным электродвигателем с анизотропной магнитной проводимостью ротора 390

Шахнов С. Ф., Агеева А. А. Построение системы контроля дифференциальной подсистемы ГЛОНАСС / GPS с использованием метода математической обработки параметров сигнала дифференциальной поправки 402

Железняк А. А. Модернизация системы управления электроэнергетической установки промыслового судна с винтом регулируемого шага 414

ИНФОРМАЦИОННЫЕ ТЕХНОЛОГИИ И АВТОМАТИЗАЦИЯ НА ТРАНСПОРТЕ 422

Дмитриенко Д. В., Чертков А. А., Сабуров С. В. Алгоритм повышения экономичности электроэнергетических систем на водном транспорте с использованием функций нечеткой логики 422

Голоскоков К. П., Чиркова М. Ю. Расчет затрат времени на преобразование информации в судовых системах 432

CONTENST

OPERATION OF WATER TRANSPORT, NAVIGATION 229

Kuznetsov A. L., Kirichenko A. V., Shcherbakova-Slyusarenko V. N. Assessment of the equipment demand in container supply chains 229

Akmaykin D. A., Khomenko D. B., Klueva S. F. Overview features and perspectives of modern automated ship route planning systems 237

Ermakov S. V. Study of vessel speed mode on the open straight section of Kaliningrad sea canal 252

Deryabin V. V. Kinematic model of vessel motion 260

Karetnikov V. V., Kozik S. V., Sokolova I. A. Influence of fatigue skipper on ensuring security of navigation 272

Malikova T. E., Yanchenko A. A., Volnov I. N. The model of massive handling cargo flow for import with the use of preliminary informing technology 280

Eglit Ya. Ya., Tsiveleva M. A. Simulation of the process of customs operations and conducting customs control in transport system as a queuing system 288

Popov G. B. Modelling of marine terminal gate on the side of road transport 296

Soloviev A. V. Environmental performance of inland navigation vessels 306

Kuptsov N. V. Research of bulk carriers actual dimensions for the port planning (technological solutions of marine terminals) 323

WATERWAYS AND HYDROGRAPHY 337

Kayuda A. V., Kolosov M. A. Development system of control and information system for safety of navigation 337

Volosukhin V. A., Bandurin M. A. Necessity of multifactor diagnostics of the Donsky shipping system in conditions of the growth of the water resources deficiency and safety of facilities 346

SHIP POWER PLANTS, SYSTEMS AND DEVICES 355

Yamanin A. I., Zhukov V. A. Assessment of the strength rods with different cross-section of the rod 355

Gorbaneva E. A., Yakovlev P. V. Research of behaviour of high-viscosity liquid in transit in the tanker tank in operating time of auxiliary system of heating 364

Vinogradov A. A. A study of load distribution of marine diesel-generator sets in parallel operation 373

ELECTRICAL EQUIPMENT AND SYSTEMS 380

Nichiporenko N. T., Sivachenko B. N. Comparative analysis of the potential informative capacity of coastal and ship radar stations 380

Samoseiko V. F., Sharashkin S. V. Control of the reluctance motor with an anisotropic magnetic conductivity of rotor in ship propulsion system 390

Shakhnov S. F., Ageeva A. A. Construction of control system of differential subsystem of glonass/gps with use of the method of mathematical processing of signal parameters of differential correction 402

Zhelezniak A. A. The modernization of management system of electrical power plant of the fishing vessel with controllable pitch propeller 414

№ 2

2017

EDITOR-IN-CHIEF

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

Deputy Editor-in-Chief
A. P. Nyrkov
doctor of technical Sciences, Prof.
NyrkowAP@gumrf.ru

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

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

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

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

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

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

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

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

Editorial Collegium:

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

INFORMATION TECHNOLOGY AND AUTOMATION IN TRANSPORT 422

Dmitrienko D. V., Chertkov A. A., Saburov S. V. The algorithm of a formance gain of electroenergy systems for water transport using fuzzy logic 422

Goloskokov K. P., Chirkova M. Y. Calculation of time spent on the conversion information in the ship systems 432

ЭКСПЛУАТАЦИЯ ВОДНОГО ТРАНСПОРТА, СУДОВОЖДЕНИЕ

DOI: 10.21821/2309-5180-2017-9-2-229-236

ASSESSMENT OF THE EQUIPMENT DEMAND IN CONTAINER SUPPLY CHAINS

A. V. Kirichenko[1], A. L. Kuznetsov[1], V. N. Shcherbakova-Slyusarenko[2]

[1] – Admiral Makarov State University of Maritime and Inland Shipping, St. Petersburg, Russian Federation
[2] – Yanino Logistics Park LLC, Leningrad Region, Russian Federation

At the current stage of the transport science development, with widely spread of stochastic and object-oriented approaches, soft computation techniques and other results of discrete mathematics, the conventional analytical calculations based on algebraic and even arithmetic formulae seem to be archaic an inefficient. In the same time, their role as instruments for verification of the most advanced and complicated simulation model cannot be overestimated. Any model which adequacy is not proved has no pragmatic value. The transport practice shows also that many technologic assessments should be done in real time, within the operational control. This fact exclude the majority of laborious apparatus calculations available only for academic specialists. On the other hand, the results of those assessments often expected to give only raw estimations required to percept the key trends or general properties of the systems under study, thus not requiring exhaustive accuracy and leaving a big room for uncertainty. The paper describes simple static models to be used as benchmarking tools in the design of complicated supply chains. These methods could also find an application for validation, calibration and verification of imitation models simulating complex intermodal container transportation systems. The results produced by the described approach could define general parameters of the transportation systems both in operation and under design. Specifically, they can forecast the demand for the transportation vehicle and equipment for route and terminal design.

Keywords: global container trade, route, container, vessel, cargo flow.

For citation:
Aleksandr L. Kuznetsov, Kirichenko, Aleksandr V. and Victoria N. Shcherbakova-Slyusarenko. "Assessment of the equipment demand in container supply chains." *Vestnik Gosudarstvennogo universiteta morskogo i rechnogo flota imeni admirala S.O. Makarova* 9.2 (2017): 229–236. DOI: 10.21821/2309-5180-2017-9-2-229-236.

УДК 656.613.1

ОЦЕНКА ТРЕБОВАНИЙ К ОБОРУДОВАНИЮ В КОНТЕЙНЕРНЫХ СЕТЯХ ДОСТАВКИ

А. Л. Кузнецов[1], А. В. Кириченко[1], В. Н. Щербакова-Слюсаренко[2]

[1] – ФГБОУ ВО «ГУМРФ имени адмирала С. О. Макарова», Санкт-Петербург, Российская Федерация
[2] – ООО «Логистический парк «Янино», Ленинградская область, Российская Федерация

На современном этапе развития транспортной науки, характеризующемся широким использованием статистических и объектно-ориентированных подходов, «мягких» вычислений и прочих достижений дискретной математики, расчетно-аналитические методы, использующие простые алгебраические и даже арифметические формулы, представляются архаичными и малоэффективными. В то же время их роль как инструментов поверки самых изощренных имитационных моделей трудно переоценить. Любая модель, адекватность которой не может быть объективно доказана, имеет ничтожную прагматическую ценность. Ряд эксплуатационных расчетов, как показывает практика, необходимо производить

оперативно, в режиме диспетчерского управления. Это исключает применение громоздких аппаратных вычислений, доступных в основном для специалистов. С другой стороны, результаты подобных расчетов зачастую носят оценочный характер, необходимый для понимания каких-либо тенденций развития или укрупненных свойств исследуемых систем. Таким образом, важным оказывается порядок результирующих цифр и не требуется исчерпывающая точность определяемых результатов, т. е. расчеты производятся «на определенном уровне неопределенности». В работе описываются простые статические модели, которые используются как инструмент бенчмаркинга при решении практических задач планирования сложных сетей поставки и как эталоны при установлении валидности, калибровке и доказательства адекватности имитационных моделей комплексных интермодальных сетей контейнерной доставки грузов. Результаты моделирования позволят определить фактически необходимые технологические параметры действующих контейнерных систем грузораспределения, в том числе спрогнозировать потребность в транспортных средствах — линейных и фидерных, уточнить актуальные составы парков контейнеров, включая количества в движении порожнём, в грузу, находящихся на хранении и в ремонте, спрогнозировать количество погрузочно-разгрузочных мест на проектируемых терминалах и потребность в основном перегрузочном оборудовании.

Ключевые слова: мировая контейнерная торговля, маршрут, контейнер, судно, грузопоток.

Для цитирования:
Кузнецов А. Л. Оценка требований к оборудованию в контейнерных сетях доставки / А. Л. Кузнецов, А. В. Кириченко, В. Н. Щербакова-Слюсаренко // Вестник Государственного университета морского и речного флота имени адмирала С. О. Макарова. — 2017. — Т. 9. — № 2. — С. 229–236. DOI: 10.21821/2309-5180-2017-9-2-229-236.

Введение

Рост мировой торговли за последние 20 лет составил 6,3 % в год. При этом, если в 1990 г. контейнерные перевозки составляли лишь 6 % от общего объема морских перевозок, то к 2011 г. их доля составила уже 16,5 %. В абсолютном выражении, за этот период контейнерный трафик вырос в семь раз, а средняя вместимость судна-контейнеровоза удвоилась. Вследствие этого мировая инфраструктура морских перевозок была вынуждена интенсивно реструктуризироваться, что потребовало приватизации и значительных инвестиций [1] – [4].

Объем мировой контейнерной торговли в 2015 г. составил 160 млн TEU (эквивалент 20-футового контейнера) по груженым контейнерам, в то время как мировые контейнерные порты перевалили 700 млн TEU. Если считать, что с учетом порожних контейнеров объем внешнеторговых перевозок составил 200 млн TEU, то каждый контейнер был перевален в среднем в 3,5 портах. Это свидетельствует о существенной доле трансшипмента в мировых перевозках [5] – [11].

Современные оценки, полученные Всемирным советом судоходства (WSC), свидетельствуют о том, что мировой флот контейнерных судов имеет совокупную емкость, равную 17 млн TEU (дополнительно 3 млн TEU должны вскоре вступить в эксплуатацию).

Количество контейнеров, задействованных сегодня в морских перевозках, по оценкам этой же организации, составляет 17 млн единиц, или 27 млн TEU. Всего количество контейнеров в мире оценивается на уровне 20 млн единиц, или 32 млн TEU [12] – [15].

Как показали исследования, выполненные в публикациях [16] – [20], в ходе эксплуатации контейнерного парка объективно возникают следующие вопросы прикладного характера: *Как стыкуются между собой названные цифры? В каких отношениях находятся между собой ключевые параметры системы морских контейнерных перевозок?* Найденные ответы позволят определить фактически необходимые технологические параметры действующих контейнерных систем грузораспределения, в том числе спрогнозировать потребность в транспортных средствах — линейных и фидерных, уточнить актуальные составы парков контейнеров, включая количества в движении порожнём, в грузу, а также находящихся на хранении и в ремонте, спрогнозировать количество погрузочно-разгрузочных мест на проектируемых терминалах и потребность в основном перегрузочном оборудовании.

Оценка потребностей системы морской транспортировки

Имеются три основных группы маршрутов морской контейнерной системы транспортировки: между Европой и Юго-Восточной Азией (длиной 11500 миль), Транстихоокеанская (8000 миль) и Трансатлантическая (4000 миль) — рис. 1.

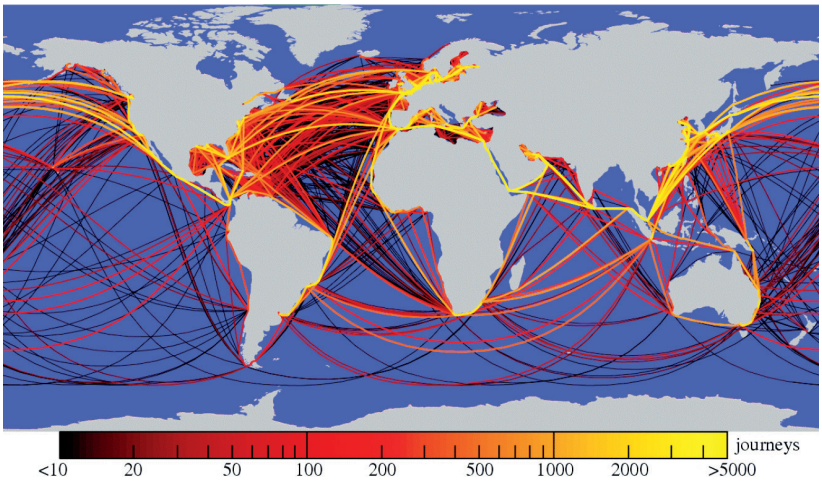


Рис. 1. Структура маршрутов мировой контейнерной системы

Каждая из групп маршрутов допускает определенную группировку и обобщение, имеющие целью выделение тех или иных основных изучаемых свойств (рис. 2).

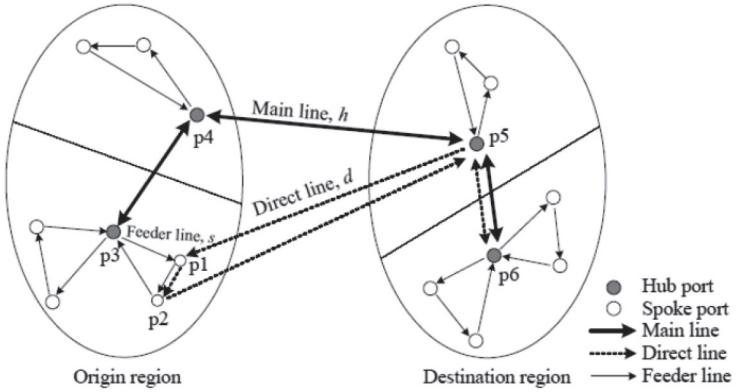


Рис. 2. Функциональная классификация контейнерных маршрутов

В целях выполняемого анализа даже эта структура является избыточной, поскольку изучаемыми категориями являются магистральные маршруты, фидерные линии и концевые маршруты (железнодорожные и автомобильные) — рис. 3.

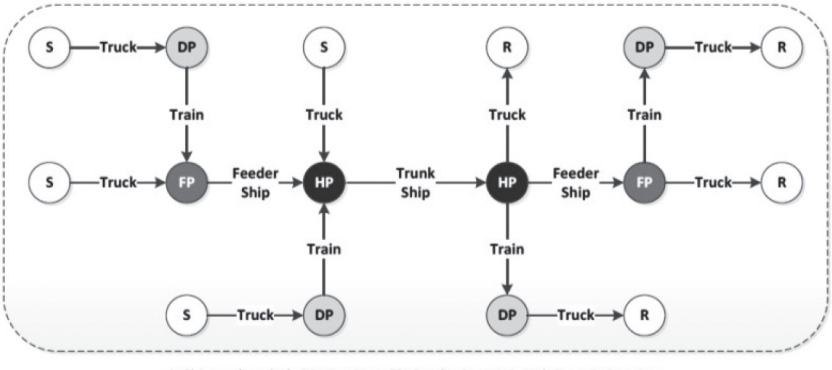


Рис. 3. Распределение контейнерных маршрутов по видам транспорта

Каждое из торговых направлений имеет свой грузооборот, позволяющий определить средневзвешенную эквивалентную длину мировой морской транспортировки L (морских миль), на которую осуществляется перевозка годового объема Q (TEU / год). На этом магистральном направлении используются суда с различной вместимостью D_i (TEU), доля которых в грузопотоке составляет величину α_i. Каждое из этих судов имеет свою эксплуатационную скорость V_i (уз), обеспечивающую суточный пробег $24V_i$ миль и позволяющую пройти маршрут в одну сторону за $t^i_{\text{ход}} = \dfrac{L}{24V_i}$ сут. Обработка судна типа i в порту производится за $t^i_{\text{порт}}$ сут, что обеспечивает время кругового рейса $t^i_{\text{рейс}} = 2(t^i_{\text{ход}} + t^i_{\text{порт}})$.

За год судно типа i совершает количество рейсов $n^i_{\text{рейс}} = \dfrac{365}{t^i_{\text{рейс}}}$ и вносит вклад в годовой грузопоток $q_i = 2D_i \cdot n^i_{\text{рейс}}$. Поскольку частичный объем грузопотока, реализуемый судном типа i, $Q_i = \alpha_i \cdot Q$, и этот грузопоток образуются N_i судами ($Q_i = N_i\, q_i$), имеем $N_i\, q_i = \alpha_i\, Q$, откуда получаем число судов типа i на маршруте как $N_i = \dfrac{\alpha_i Q}{q_i}$. Общее число судов различной вместимости составит величину $N = \sum N_i$, а их суммарная контейнеровместимость — $N_{\text{TEU}} = \sum D_i N_i$. При этом в каждый момент времени из этого количества судов доля $\dfrac{t^i_{\text{ход}}}{t^i_{\text{ход}} + t^i_{\text{порт}}}$ будет находиться в движении, а доля $\dfrac{t^i_{\text{порт}}}{t^i_{\text{ход}} + t^i_{\text{порт}}}$ — стоять под обработкой в морских портах.

Расчеты для магистрального направления показывают, что перевозка 2 000 000 TEU в год требует около 3000 судов общей вместимостью 11,3 млн TEU. При этом 2790 судов будут находиться в движении, а 256 судов — стоять под обработкой в портах по обоим концам магистрального направления. Кроме контейнеров, находящихся на борту судов, в портах будут находиться контейнеры, ожидающие погрузки или вывоза. При сроке хранения $T_{\text{хр}}$ объем контейнеров на складах порта составит величину $E = Q\dfrac{T_{\text{хр}}}{365}$, или дополнительно 5,5 млн TEU.

Таким образом, перевозки по магистральным направлениями потребуют всего 16,8 млн TEU (11,3 млн TEU на судах и 5,6 млн TEU в портах) — рис. 4, *а*. Из магистральных портов некоторая доля контейнеров будет доставляться в фидерные порты. Использование рассуждений, подобных приведенным для магистрального направления, позволит дать для фидерных направлений еще около 1600 судов (более мелких) общей вместимостью 1,2 млн TEU (рис. 4, *б*).

С учетом ранее изложенного общая контейнеровместимость магистрального и фидерного флота по модели составит около 13 млн TEU, а объем хранения в магистральных и фидерных портах — еще дополнительно 13 млн TEU. Соответственно морские перевозки в системе магистральных и фидерных линий потребуют флота суммарной провозной способностью 13 млн TEU и парка контейнеров, составляющего 26 млн TEU.

Цифры, полученные в отношении морских перевозок, показывают недогруженность мирового флота, а в отношении парка задействованных контейнеров оказываются достаточно близки к приведенной во введении статистике. Существующая недостача в общем парке задействованных в перевозке контейнеров объясняется потребностью в них сухопутной составляющей.

а)

Грузооборот	Q	200 000 000	TEU/год]
Длина маршрута	L	8000	[миля]

α_i	D_i	V_i	$t^i_{\text{ход}}$	$t^i_{\text{порт}}$	$t^i_{\text{рейс}}$	$n^i_{\text{рейс}}$	q_i	Q_i	N_i	$D_i \cdot N_i$	На ходу	В порту
	[TEU]	[узел]	[сут]	[сут]	[сут]	[1/год]	[TEU/год]	[TEU/год]		[TEU]		
0,20	8 000	18	19	4	45	8	129 671	40 000 000	308	2 467 783	254	55
0,20	6 000	18	19	3	43	8	101 773	40 000 000	393	2 358 194	338	55
0,20	4 000	18	19	2	41	9	71 155	40 000 000	562	2 248 605	507	55
0,20	3 000	18	19	1	39	9	56 101	40 000 000	713	2 139 016	676	37
0,20	2 000	18	19	1	39	9	37 400	40 000 000	1 070	2 139 016	1 015	55
								суда:	**3 046**	**11 352 613**	2 790	256

Срок хранения	$T_{\text{хр}}$	5	[сут]

в порту: **5 479 452** [TEU]
Всего: **16 832 065** [TEU]

б)

Грузооборот	Q	200 000 000	TEU/год]
Длина маршрута	L	500	[миля]

α_i	D_i	V_i	$t^i_{\text{ход}}$	$t^i_{\text{порт}}$	$t^i_{\text{рейс}}$	$n^i_{\text{рейс}}$	q_i	Q_i	N_i	$D_i \cdot N_i$	На ходу	В порту
	[TEU]	[узел]	[сут]	[сут]	[сут]	[1/год]	[TEU/год]	[TEU/год]		[TEU]		
0,20	1 000	16	1	1	5	79	158 552	40 000 000	252	252 283	143	110
0,20	900	16	1	1	5	79	142 697	40 000 000	280	252 283	159	122
0,20	800	16	1	1	5	79	126 842	40 000 000	315	252 283	178	137
0,20	700	16	1	1	5	79	110 986	40 000 000	360	252 283	204	157
0,20	600	16	1	1	5	79	95 131	40 000 000	420	252 283	238	183
								суда:	**1 629**	**1 261 416**	921	708

Срок хранения	$T_{\text{хр}}$	7	[сут]

в порту: **7 671 233** [TEU]
Всего: **8 932 648** [TEU]

Рис. 4. Экранная расчетная форма
для перевозок по магистральным (*а*) и фидерным направлениям (*б*)

Оценка потребностей системы наземной транспортировки

В тех же упрощенных допущениях будем считать, что время движения состава по железной дороге составляет семь суток, а время обработки на железнодорожной станции — одни сутки. Таким образом, время кругового рейса составит 16 сут. За год один состав сможет совершить 23 рейса. При средней вместимости состава 120 TEU один состав в год может обеспечить грузооборот, равный 5475 TEU, и для реализации всего грузопотока, составляющего 100 000 000 TEU, потребуется 18 265 составов, на которых одновременно будет находиться 2,2 млн TEU.

При среднем сроке пребывания груза на концевом железнодорожном терминале, равном 3 сут, объем хранения составит 0,8 млн TEU, т. е. всего 3 млн TEU будут задействованы в работе системы обеспечений форленда. Считая потребность в контейнерном парке для обслуживания хинтерленда такой же, получим еще 3 млн TEU (рис. 5).

Грузооборот	Q	100 000 000	[TEU/год]
Время рейса		7	[сут]
Время обработки		1	[сут]
Время рейса		16	[сут]
Вместимость		120	[TEU]
Число рейсов		23	[1/год]
Вклад состава		5475	[TEU/год]
Число составов		18 265	
Запас на колесах		2 191 781	[TEU]

Срок хранения	$T_{\text{хр}}$	3	[сут]
Объем хранения		821 918	[TEU]

Рис. 5. Экранная расчетная форма для железнодорожных перевозок

Таким образом, контейнерный парк для обслуживания системы наземной транспортировки составит суммарно 6 млн TEU, которые вместе с контейнерами, задействованными в морских перевозках, дадут величину 32 млн TEU, соответствующую реальным статистическим данным.

Выводы

1. Описанный подход дает возможность оценить размер флота и численность парка контейнеров, задействованных в интегрированных перевозках грузов, в том числе национальных, региональных и корпоративных контейнерных системах.

2. В расчет берется вся цепочка: от мест хранения или производства до пунктов растаривания контейнеров, включая последовательно функционирующие звенья различных видов транспорта.

3. Приведенные методы позволяют выполнять технологическое проектирование промежуточных и концевых контейнерных терминалов в укрупненных показателях с позиций определения их потребности в технологическом (включая подъемно-транспортное) оборудовании.

4. Полученные результаты могут использоваться при установлении адекватности имитационных моделей, т. е. возникновении проблемы, в отсутствии решения которой указанные модели остаются лишь трудоемкими и затратными эвристиками.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Быкова Е.* Рынок международных контейнерных перевозок: основные игроки и тенденции развития [Электронный ресурс] / Е. Быкова. — Режим доступа: http://провэд.рф/analytics/research/6274-rinok-konteinerov.html/ (дата обращения – 07.03.2017).

2. *Никода К. В.* Текущее состояние и прогноз рынка контейнерных перевозок в России / К. В. Никода // Транспорт Российской Федерации. — 2013. — № 5 (48). — С. 46–51.

3. Обзор грузооборота морских портов России. Итоги 2015 года [Электронный ресурс]. — Режим доступа: http://www.logistic.ru/news/news.php?num=2016/01/13/51/31268176/ (дата обращения – 07.03.2017).

4. Обзор грузооборота морских портов России (январь – июль 2016 г.) [Электронный ресурс]. — Режим доступа: http://www.logistic.ru/news/news.php?num=2016/08/17/62/31281100/ (дата обращения – 07.03.2017).

5. Исследование рынка международных морских перевозок: контейнерных, трамперных, рефрижераторных. 2013 – 2020. Прогноз развития рынка. Global Market Research : эл. изд. — 2017. — 211 с.

6. Анализ мирового и российского рынка морских портовых комплексов. Емкость и потенциал развития рынка. 2013-2020. Прогноз развития рынка. Global Market Research / Эл. изд. — 2017. — 268 с.

7. Анализ рынка грузового железнодорожного транспорта и перевозок. Прогноз развития рынка. 2013–2020. Global Market Research / Эл. издание. — 2017. — 188 с.

8. Анализ рынка международных грузовых автоперевозок. Прогноз развития рынка. Global Market Research / Эл. изд. — 2017. — 332 с.

9. Прогноз рынка перевозок в России и СНГ. 2004-2020. Global Market Research / Эл. изд. — 2016. — 207 с.

10. Анализ рынка грузоперевозок в сети РЖД на стыке колеи 1520/1435. 2010-2020. Global Market Research / Эл. изд. — 2016. — 212 с.

11. Маркетинговое исследование степени удовлетворенности потребителей услугами железно-дорожного транспорта и опрос пассажиров автомобильного транспорта. Global Market Research / Эл. изд. — 2017. — 234 с.

12. One Hundred Container Ports 2016. Lloyds List [Электронный ресурс]: официальный сайт. — Режим доступа: https://www.lloydslist.com/ll/incoming/article534477.ece (дата обращения – 08.03.2017).

13. Top 50 World Container Ports. World Shipping Council [Электронный ресурс]: официальный сайт. — Режим доступа: http://www.worldshipping.org/about-the-industry/global-trade/top-50-world-container-ports/ (дата обращения – 08.03.2017).

14. Benefits of Liner Shipping. Efficiency [Электронный ресурс]: официальный сайт. — Режим доступа: http://www.worldshipping.org/benefits-of-liner-shipping/efficiency/ (дата обращения — 06.03.2017).

15. WSC посчитал потерянные контейнеры [Электронный ресурс]. — Режим доступа: http://www.sur.ru/en/node/2409/ (дата обращения – 01.03.2017).

16. *Кузнецов А. Л.* Кибернетический метод управления развитием морских портов/ А. Л. Кузнецов, А. В. Галин // Вестник Астраханского государственного технического университета. Серия: Морская техника и технология. — 2016. — № 3. — С. 93–97.

17. *Кузнецов А. Л.* Пространственное развитие портов / А. Л. Кузнецов, А. В. Галин // Инновации. — 2015. — № 2 (208). — С. 115–120.

18. *Кузнецов А. Л.* Синергетика как методологическая основа развития базовой инфраструктуры портоориентированной логистики/ А. Л. Кузнецов, А. В. Галин, А. В. Кириченко // Вестник Государственного университета морского и речного флота имени адмирала С. О. Макарова. — 2016. — № 6 (40). — С. 19–34. DOI: 10.21821/2309-5180-2016-8-6-19-34.

19. *Кузнецов А. Л.* Морская контейнерная транспортно-технологическая система: монография / А. Л. Кузнецов, А. В. Кириченко, А. А. Давыденко [и др.]. — СПб.: Изд-во МАНЭБ, 2017. — 320 с.

20. *Кузнецов А. Л.* Холистический подход к проектированию, созданию, управлению работой и развитием наземных контейнерных терминалов / А. Л. Кузнецов, А. В. Кириченко, В. Н. Щербакова-Слюсаренко, В. А. Погодин // Вестник Астраханского Государственного технического университета. — Серия: Морская техника и технология. — 2017. — № 1. — С. 97–107.

REFERENCES

1. Bykova, Y. Rynok mezhdunarodnykh konteynernykh perevozok: osnovnye igroki i tendencii. Web. 7 March 2017 <http://провэд.рф/analytics/research/6274-rinok-konteinerov.html/>.

2. Nikoda, K. V. “Current state and prognosis for containerized cargoes transportation market in Russia.” *Transport Rossiyskoy Federacii* 5(48) (2013): 46–51.

3. Obzor gruzooborota morskikh portov Rossii. Itogi 2015 goda. Web. 7 March 2017 <http://www.logistic.ru/news/news.php?num=2016/01/13/51/31268176/>.

4. Obzor gruzooborota morskikh portov Rossii (Jan – Jul 2016). Web. 7 March 2017 <http://www.logistic.ru/news/news.php?num=2016/08/17/62/31281100/>.

5. *Issledovanie rynka mezhdunarodnykh morskikh perevozok: konteynernykh, trampernykh, refrizheratornykh. 2013-2020. Prognoz razvitiya rynka. Global Market Research*. 2017.

6. *Analiz mirovogo i rossiyskogo rynka morskikh portovykh kompleksov. Yomkost’ i potencial razvitiya rynka. 2013-2020. Prognoz razvitiya rynka. Global Market Research.* 2017.

7. *Analiz rynka gruzovogo zheleznodorozhnogo transporta i perevozok. Prognoz razvitiya rynka. 2013-2020. Global Market Research*. 2017.

8. *Analiz rynka mezhdunarodnykh gruzovykh avtoperevozok. Prognoz razvitiya rynka. Global Market Research*. 2017.

9. *Prognoz rynka perevozok v Rossii i SNG. 2004-2020. Global Market Research*. 2016.

10. *Analiz rynka* грузо *perevozok v seti RZHD na styke koleyi 1520/1435. 2010-2020. Global Market Research*. 2016.

11. *Marketingovoe issledovanie stepeni udovletvorennosty potrebiteley uslugami zheleznodorozhnogo transporta i opros passazhirov avtomobilnogo transporta. Global Market Research*. 2017.

12. One Hundred Container Ports 2016. Lloyds List. Web. 8 March 2017 <https://www.lloydslist.com/ll/incoming/article534477.ece>.

13. Top 50 World Container Ports. World Shipping Council. Web. 8 March 2017 <http://www.worldshipping.org/about-the-industry/global-trade/top-50-world-container-ports/>.

14. Benefits of Liner Shipping. Efficiency. Web. 6 March 2017 <http://www.worldshipping.org/benefits-of-liner-shipping/efficiency/>.

15. WSC poschital poteryannye kontejnery. Web. 1 March 2017 <http://www.sur.ru/en/node/2409/>.

16. Kuznetsov, A. L., and A. V. Galin. “Cybernetic method of management of development of sea ports.” *Vestnik of Astrakhan State Technical University. Series: Marine Engineering and Technologies* 3 (2016): 93–97.

17. Kuznezov, A. L., and A. V. Galin. “Spatial development of ports.” *Innovations* 2(208) (2015): 115–120.

18. Kuznetsov, A. L, A. V. Galin, and A. V. Kirichenko. “The synergy as the methodological approach for the basical infrastructure of port-oriented logistics.” *Vestnik Gosudarstvennogo universiteta morskogo i rechnogo flota imeni admirala S.O. Makarova* 6(40) (2016): 19–34. DOI: 10.21821/2309-5180-2016-8-6-19-34.

19. Kuznetsov, A. L., A. V. Kirichenko, A. A. Davydenko, S. V. Latukhov, V. L. Mikheev, and V. A. Nikitin. *Morskaya kontejnernaya transportno-tekhnologicheskaya sistema: monografiya*. SPb.: Izd-vo MANEB, 2017.

20. Kuznetsov, Alexander L'vovich, Alexander Viktorovich Kirichenko, Victoria Nikolaevna Shcherbakova-Slyusarenko, and Vladimir Alekseyevich Pogodin. "The holistic approach for the design, creation, management of the operation and development of ground container terminals." *Vestnik of Astrakhan State Technical University. Series: Marine Engineering and Technologies* 1 (2017): 97–107.

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

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

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

Щербакова-Слюсаренко Виктория Николаевна —
кандидат технических наук,
генеральный директор
ООО «Логистический парк «Янино»
Российская Федерация, Ленинградская область,
Всеволожский район, д. Янино-1,
Торгово-логистическая зона «Янино-1», № 1
e-mail: *victorysch@mail.ru*

INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

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

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*

Shcherbakova-Slyusarenko, Victoria N. —
PhD, Chief Executive Officer
Yanino Logistics Park LLC
Vsevolozhsky District, Yanino-1 village,
Trade and logistics zone Yanino-1,
No. 1, Leningrad Region,
Russian Federation
e-mail: *victorysch@mail.ru*

Статья поступила в редакцию 10 марта 2017 г.
Received: March 10, 2017.

ВЕСТНИК
ГОСУДАРСТВЕННОГО УНИВЕРСИТЕТА
МОРСКОГО И РЕЧНОГО ФЛОТА ИМЕНИ АДМИРАЛА С. О. МАКАРОВА

DOI: 10.21821/2309-5180-2017-9-2-237-251

OVERVIEW FEATURES AND PERSPECTIVES OF MODERN AUTOMATED SHIP ROUTE PLANNING SYSTEMS

D. A. Akmaykin, D. B. Khomenko, S. F. Klueva

Maritime State University named after admiral G. I. Nevelskoi,
Vladivostok, Russian Federation

The article review and analyze the functional characteristics and features of modern navigation route planning systems and software components that perform routing functions. The most popular software «Navi-Planner» from Transas, «PassageManager» ChartCo, «Bon Voyage System» of StormGeo company, «Ship Performance Optimisation System» by MeteoGroup, «Commercial Marine Vessel Routing» from Jeppesen company. Software products have an intuitive graphical interface and to take into account weather factors in the planning and route optimization. Software Navi-Planner 4000 provides a safe and effective ships routing, and realize the plan of the route, taking into account weather factors. Software product PassageManager get access to all services of the company ChartCo. Product Bon Voyage System (BVS) optimizes the voyage due to weather conditions, and provide to obtain an estimate of the cost of the voiage in the planning, taking into account the ship's speed and the fuel consumption rate. Weather navigation system Ship Performance Optimisation System route planning (SPOS) permit to display on the ECDIS the optimal route and hydrometeorological conditions. Commercial Marine Vessel Routing offers routing services to ships, by accurately modeling the vessel movement taking into account the environment. Key features of VVOS application is the automatic construction of optimized routes. Knowledge of the features offered in the market of software ships routing component will facilitate the end user to select the appropriate application. It is noted, that in the case of recalculation route after each update of the weather forecast, crew join a personal approach to the selected route. In a case planning of the composite route in navigational obstacles and weather fronts, the human factor can lead to undesirable results. In the final part of the paper provides recommendations on the choice of the system, in depending of the navigators priorities.

Keywords: onboard navigation system, ship's route, route optimization, e-Chart, voyage plan.

For citation:
Akmaykin, Denis A., Dmitry B. Khomenko, Svetlana F. Klueva. "Overview features and perspectives of modern automated ship route planning systems." *Vestnik Gosudarstvennogo universiteta morskogo i rechnogo flota imeni admirala S.O. Makarova* 9.2 (2017): 237–251. DOI: 10.21821/2309-5180-2017-9-2-237-251.

УДК 629.12

ОБЗОР ФУНКЦИОНАЛЬНЫХ ВОЗМОЖНОСТЕЙ И ПЕРСПЕКТИВЫ СОВРЕМЕННЫХ АВТОМАТИЗИРОВАННЫХ СИСТЕМ ПЛАНИРОВАНИЯ МАРШРУТА СУДНА

Д. А. Акмайкин, Д. Б. Хоменко, С. Ф. Клюева

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

Целью работы является обзор и анализ функциональных характеристик и особенностей современных навигационных систем планирования маршрутов и программных компонент, выполняющих функции маршрутизации. Рассмотрены наиболее распространенные программные инсрументы «Navi-Planner» компании Транзас, «PassageManager» компании ChartCo, «Bon Voyage System» компании StormGeo, «Ship Performance Optimisation System» компании MeteoGroup, «Commercial Marine Vessel Routing» компании Jeppesen. Программные оболочки продуктов имеют интуитивно понятный графический интерфейс и позволяют учитывать погодные факторы в процессе формирования и оптимизации маршрута. Приложение Navi-Planner 4000 обеспечивает безопасную и эффективную предварительную прокладку, а также выполнение плана перехода по маршруту с учётом погодных факторов. Программная оболочка PassageManager позволяет получить доступ ко всем услугам компании ChartCo. Продукт Bon Voyage System (BVS) выполняет оптимизацию морского рейса по погодным условиям и позволяет получать оценку стоимости рейса

в процессе его планирования с учетом скорости судна и расхода топлива. Система погодной навигации планирования маршрутов Ship Performance Optimisation System (SPOS) позволяет отображать на экране ЭКНИС предлагаемый оптимальный маршрут и гидрометеорологическую обстановку. Commercial Marine Vessel Routing предлагает услуги по маршрутизации морских судов за счет точного моделирования движения судна с учетом окружающей обстановки. Основные возможности приложения VVOS заключаются в автоматическом построении оптимизированных маршрутов. Знание особенностей, предлагаемых на рынке программных компонент маршрутизации морских судов, облегчит конечному пользователю выбор соответствующего приложения. Отмечено, что в случае пересчета судоводителями маршрута после каждого обновления прогноза погоды добавляется субъективный подход экипажа к выбранному маршруту. При прокладке сложных маршрутов, при наличии навигационных препятствий и обхода метеорологических фронтов влияние человеческого фактора может привести к нежелательным результатам. В заключительной части работы приведены рекомендации по выбору системы в зависимости от поставленных задач.

Ключевые слова: навигационные бортовые системы, маршрут судна, оптимизация маршрута, электронные карты, план перехода.

Для цитирования:
Акмайкин Д. А. Обзор функциональных возможностей и перспективы современных автоматизированных систем планирования маршрута судна / Д. А. Акмайкин, Д. Б. Хоменко, С.Ф. Клюева // Вестник Государственного университета морского и речного флота имени адмирала С. О. Макарова. — 2017. — Т. 9. — № 2. — С. 237–251. DOI: 10.21821/2309-5180-2017-9-2-237-251.

Введение

В настоящее время мировые державы вкладывают значительные средства в развитие навигационных систем управления, повышающих безопасность мореплавания, экономическую эффективность использования судов с учетом факторов экологического порядка [1] – [6]. Основными направлениями разработок всемирно известных компаний Транзас, ChartCo, StormGeo, MeteoGroup, Jeppesen является развитие полуавтоматических и полуавтоматизированных навигационных систем, функционирующих по принципу беспилотного судовождения [7] – [14]. Для оказания помощи судоводителям эти компании оказывают услуги по представлению на суда всей необходимой для рейса информации в сжатом виде, т. е. в виде «выжимки» из всего перечня необходимой информации и инструментов по оптимизации маршрута перевозки. Среди представленных систем планирования маршрутов наиболее востребованными являются следующие: «Navi-Planner» компании Транзас, «PassageManager» компании ChartCo, «Bon Voyage System» компании StormGeo, «Ship Performance Optimisation System» компании MeteoGroup, «Commercial Marine Vessel Routing» компании Jeppesen. Разрабатываемые этими компаниями программные компоненты имеют различный функционал и ограничения по количеству предлагаемых сервисов. В связи с этим знание особенностей этих систем облегчит конечному пользователю выбор соответствующего приложения.

Задачи исследования

Целью работы является исследование особенностей предлагаемых на рынке систем и инструментов по оптимизации маршрутов движения судов. Для выполнения поставленной цели необходимо решить следующие задачи:

– выполнить обзор и анализ функционала и программных компонент современных систем планирования маршрутов;

– исследовать, каким образом решены возможности построения маршрутов судов и выполнена оптимизация маршрутов;

– исследовать, какие из рассматриваемых систем предлагают возможность формирования маршрута судна с учетом гидрометеорологических факторов и как эта задача решена;

– провести анализ программного интерфейса систем маршрутизации, способов визуализация результатов, обеспечить детальность и наглядность, компонент панели оператора.

В научных публикациях отечественных и зарубежных авторов, появившихся в течение последних десяти лет, посвященных вопросам безопасности мореплавания, актуальной является тема исследования и совершенствования современных навигационно-информационных систем и программных продуктов, выполняющих планирование и оптимизацию маршрутов судов [1], [4], [7] – [20]. Автор работы [9] рассматривает особенности функционирования систем NavCom, Transas, dKart Navigator. Авторы работ [11] – [14] исследуют Bon Voyage System компании StormGeo. В работе [12] представлены приложения Ship Performance Optimisation System и Bon Voyage System. В работах [15] – [20] рассмотрены основные подходы к построению моделей подобных систем, приведены критерии, учитывающие безопасность движения судна по маршруту в заданной акватории моря.

Система Navi-Planner 4000. Всемирно известная Российская компания «Транзас» (http://www.transas.ru) предлагает навигационные и интегрированные бортовые системы для профессиональных моряков и любителей. Система Navi-Planner 4000 позволяет обеспечить безопасную и эффективную предварительную прокладку, а также выполнение плана перехода по маршруту [9], [10]. Navi-Planner 4000 отвечает требованиям Резолюции IMO A.916(22) —«Руководство по регистрации событий, связанных с навигацией» и Резолюции IMO A.893(21) — «Руководство по планированию рейса».

С точки зрения функциональности система Navi-Planner 4000 представляет собой приложение обработки электронных карт ЭКНИС [21], а также набор баз данных, приложений и сервисов, необходимых при выполнении предварительной прокладки. Система подходит как для использования на судне в качестве дублирующего приложения, так и для применения на берегу в качестве административного инструмента. Программное обеспечение Navi-Planner 4000 создает план перехода на основе электронного редактора курса, включающего:

– предварительную прокладку от порта к порту;

– автоматическую предварительную прокладку;

– контроль глубины под килем и просвета прохода под мостами;

– проверку предварительной прокладки на предмет навигационных опасностей и информирование о найденных опасностях;

– автоматический расчет опорных точек;

– точки предоставления докладов по радио;

– списки карт ENC и SENC для бумажных и электронных карт;

– экспорт / импорт предварительной прокладки;

– интеграцию с системой Navi-Sailor 4000 ЭКНИС;

– возможность получения онлайн корректуры бумажных карт и извещений от компании Thomas Gunn Technologies [9], [10];

– создание плана перехода от порта к порту и от причала до причала;

– поддержку процедур ISM и управления судном.

Интерфейс Navi-Planner 4000 с учетом описанных функций представлен на рис. 1.

Система Navi-Planner 4000 позволяет построить быстрый маршрут на основе таблиц расстояний из точки *A* в точку *B* через точку *C*. Маршруты рассчитываются на базе таблиц морских дистанций компании AtoBviaC и могут применяться для быстрого расчета расстояний, выбора электронных карт формата (S)ENC и их последующего приобретения, а также использоваться для детального выполнения предварительной прокладки и последующего создания плана рейса. Таблицы расстояний из точки *A* в точку *B*, через точку *C* предлагают разнообразные варианты формирования маршрутов и правила построения маршрута [9]. Погодная функциональность в системе Navi-Planner 4000 обеспечивает судоводителя инструментом по принятию оптимального решения при планировании маршрута с учетом погодных условий, оптимизируя при этом скорость и расход топлива, а также условия обеспечения безопасности мореплавания, экипажа судна и перевозимого груза.

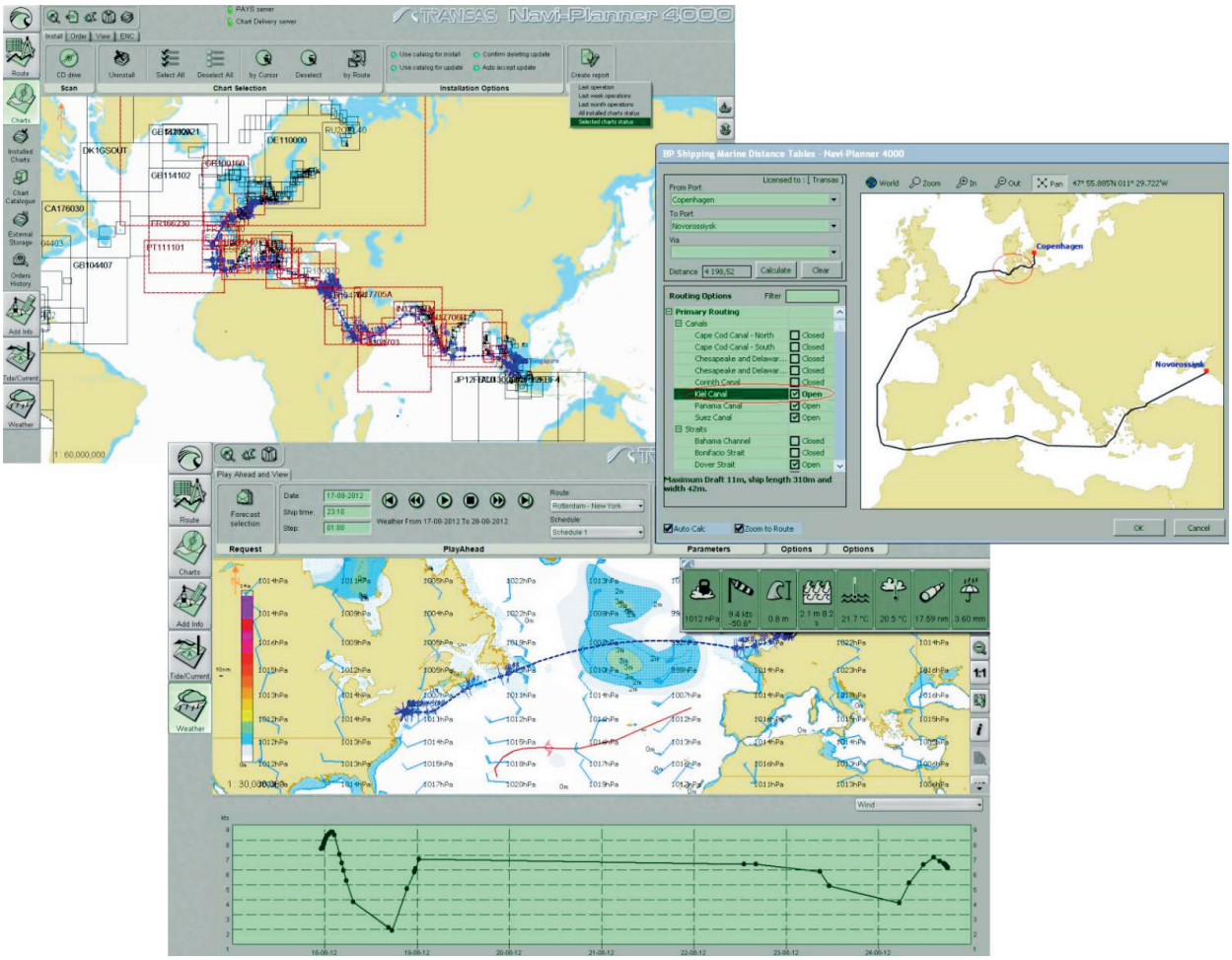


Рис. 1. Интерфейс системы Navi-Planner 4000

Данные о погоде поступают от метеорологической службы Meteo Consult. Поступающая информация включает следующие данные: давление воздуха, прогнозы ветра и волн, прогнозы тропических циклонов, температур, атмосферных осадков и границ льда.

Navi-Planner 4000 предлагает заказ и обработку карт, которые можно либо заказать предварительно, либо воспользоваться системой Pay As You Sail (PAYS). Клиент сервиса Navi-Planner располагает следующим выбором: получить только лицензии на использование карт выбором или готовые карты с сервера. Подготовка заказа включает предварительную стоимость заказа.

Предварительная прокладка основана на информации, получаемой по ходу маршрута в опорных точках, включающей также метеорологические и гидрологические данные. Плечи маршрута, промежуточные точки маршрута, расстояния бокового отклонения от курса и опорные точки можно создавать и редактировать в графической и табличной форме на основе системы координат WGS-84 [22]. Временные параметры маршрута рассчитываются с учетом (или без) ограничения скорости для каждого плеча маршрута, поверхностного и приливного течения.

Система ChartCo PassageManager. Другим поставщиком навигационной информации на суда является расположенная в Великобритании компания ChartCo (http://chartco.com). Согласно заявлению компании, она являются крупнейшим в мире поставщиком навигационной информации, включая навигационные электронные карты, пособия и цифровые продукты. Флагманским программным продуктом компании является программный комплекс PassageManager, интерфейс начальной страницы которого показан на рис. 2.



Рис. 2. Начальная страница статуса программы ChartCo PassageManager

Программа PassageManager позволяет получить доступ ко всем услугам компании ChartCo через интуитивно понятный графический интерфейс. Все бумажные и электронные продукты компании отображаются вместе с информацией о необходимой корректуре и статусе продукта с минимальными действиями со стороны пользователя. Приложения PassageManager разработаны с целью поддержки навигационных пособий, включающих бумажные и электронные издания на уровне современности, а также обеспечения судоводителей информацией, используемой в электронных картографических системах (ECDIS / ЭКНИС).

Данная программа позволяет судоводителям в автоматизированном режиме строить маршрут судна, используя предварительно составленные компанией ChartCo маршруты, с указанием расстояний (рис. 3). Она позволяет передавать полученные маршруты в наиболее распространенные системы ЭКНИС, а также обеспечивает полную интеграцию с некоторыми сторонними приложениями, например, такими, как TotalTide Адмиралтейства Великобритании. Использование продукта PassageManager позволяет получить информацию о портах, маршруте, приливно-отливных явлениях, данные о погоде и многое другое, а также помогает судоводителям создать всеобъемлющий, но полностью индивидуальный план перехода в течение нескольких минут.

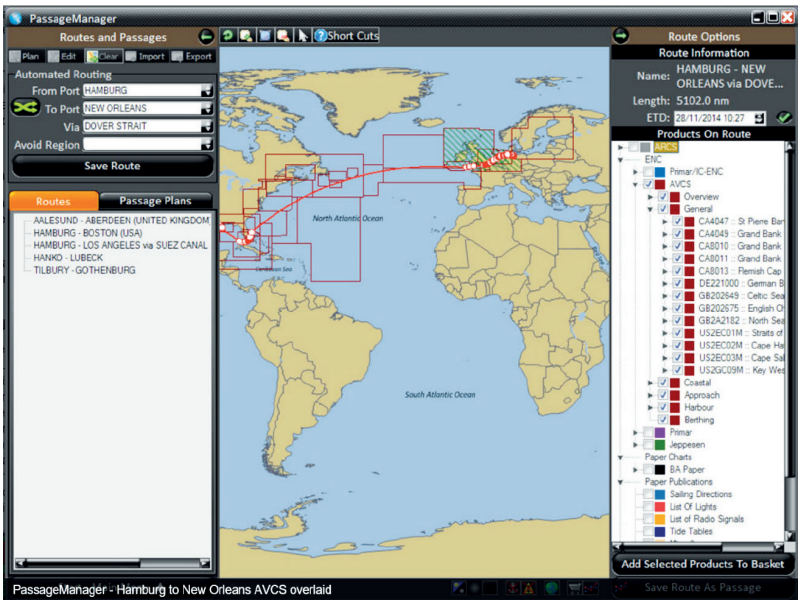


Рис. 3. Пример построения маршрута программой PassageManager из Гамбурга в Новый Орлена через Дуврский пролив

План перехода строится с соблюдением процедуры «Руководства по процедурам на мостике» и Конвенции ПДМНВ [23] и может быть адаптирован к потребностям каждого судна. После завершения планирования маршрута его можно сохранить в отдельный файл, экспортировать и отозвать для корректировки или отправить на утверждение в компанию судовладельца или ChartCo. Одной из функций продукта является стимулирование потребителей к более широкому использованию электронных данных. Продукт с помощью цветового кода уведомляет судоводителей о том, какая информация и какие пособия требуют обновления.

Использование PassageManager позволяет автоматически генерировать заказ навигационных изданий вдоль построенного маршрута и отправлять его для утверждения в офис компании или непосредственно в ChartCo. Из описания к программе можно сделать вывод о том, что построение маршрута осуществляется по заранее составленным ChartCo маршрутам из основных портов Мирового океана с возможностью корректировки штурманом ключевых точек поворота. Однако основным назначением программы является подбор и корректура электронных карт вдоль запланированного маршрута в судовой ЭКНИС.

Система Bon Voyage System. Калифорнийская компания StormGeo (http://www.awtworldwide.com) из Кремниевой долины является разработчиком продукта Bon Voyage System (BVS) [11] – [14]. BVS является продуктом с простым графическим интерфейсом оптимизации морского рейса по погодным условиям и стоимости бункера, а также инструментом, позволяющим получать оценку стоимости рейса в процессе его планирования с учетом скорости и расхода топлива. Расчеты осуществляются с учетом прогнозов погоды и течений на маршруте. Во внимание принимаются зоны пиратских нападений в Индийском океане и других частях Мирового океана (рис. 4).

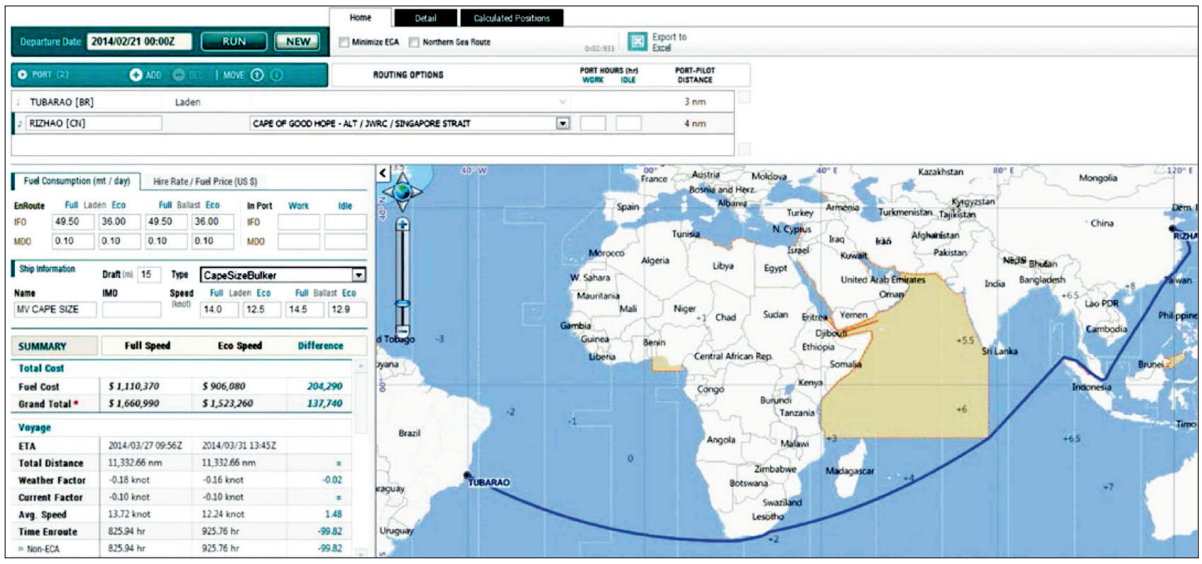


Рис. 4. Расчет маршрута из Бразилии в Китай в программе Bon Voyage System

Расчеты в BVS осуществляются через веб-интерфейс, позволяющий вносить параметры расхода топлива на полном ходу и в экономичном режиме.

Расчеты стоимости топлива учитывают требования по расходу топлива с высоким и низким содержанием серы по выбранному маршруту. При желании пользователь может выбрать опцию для ограничения времени движения на топливе с низким содержанием серы. В программном продукте BVS используется запатентованная климатологическая модель движения судна (CSR). На основе прогноза погоды и течения уточняются потери скорости на маршруте, что позволяет получать более точную оценку предполагаемого времени прибытия. Таким образом, пользователю предлагается оптимальный маршрут, учитывающий загрузку судна и бункеровку в рейсе.

Использование BVS, по заявлению разработчиков, имеет следующие преимущества:

– климатологическая модель движения судна собственной разработки дает точный прогноз потери скорости, тем самым обеспечивая более точные расчеты продолжительности рейса и его стоимости;

– за счет расчетов движения по отдельным отрезкам маршрута по дуге большого круга, BVS обеспечивает более точные расчеты;

– представление текущей погоды и течений вдоль маршрута.

BVS предлагает варианты движения через зоны движения, в которых запрещается использование судового топлива с содержанием серы более 1,5 %.

Программа Bon Voyage System с помощью широкополосной связи или электронной почты направляет на судно в сильно сжатом формате последнюю информацию о погоде и состоянии океана. Такой формат данных предназначен для минимизации расходов на связь. Эти данные затем используются для создания цветных карт и графиков, которые позволяют штурманам заранее просматривать и интерпретировать потенциальные проблемы (рис. 5).

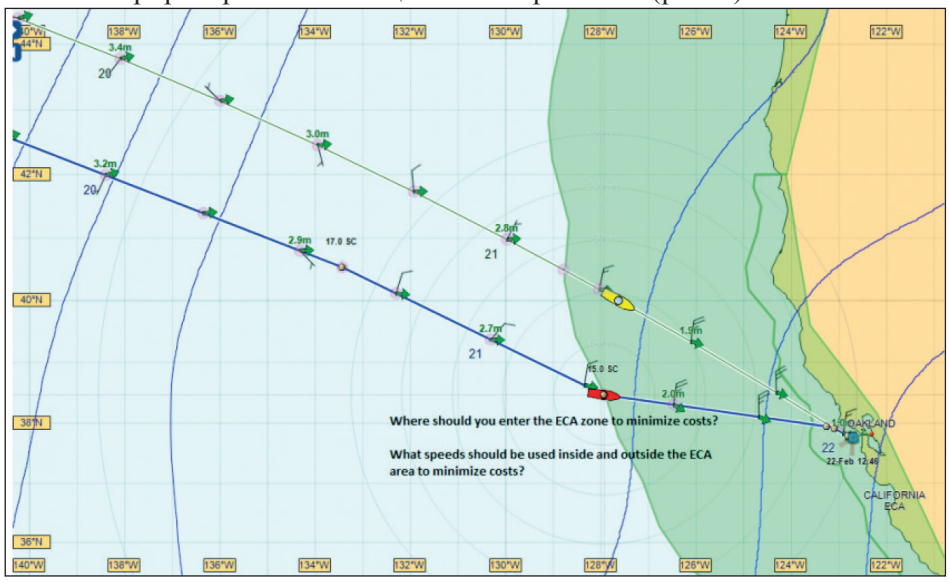


Рис. 5. Отображение текущей погоды и зон движения с использованием топлива с пониженным содержанием серы в программе Bon Voyage System

BVS предлагает алгоритм оптимизации движения по маршруту наряду с настройкой зависимости расхода топлива от скорости движения судна. Данная опция системы обеспечивает более точные оценки затрат на рейс. Для учета требований каждого конкретного рейса возможна установка ограничений по состоянию погоды и иных условий, оказывающих влияние на движение судна.

Из ранее изложенного следует, что построение маршрута осуществляется из перечня заранее выбранных компанией портов с выбором ключевых точек поворота или обхода препятствий на маршруте. В дальнейшем по предварительно выбранному маршруту осуществляется оптимизация перехода в зависимости от предпочтительного критерия: скорость, экономичность расхода топлива.

Однако для некоторых типов судов и переходов необходим более гибкий подход к выбору критериев перехода между безопасностью, скоростью и стоимостью с различным весом каждого из критериев в зависимости от ситуации. Выбор того, кому делегируется выбор приоритетов между представленными критериями, делится между перевозчиком-судовладельцем, капитаном и производителем программы в целях предотвращения опасных для перевозки маршрутов и ситуаций.

Система Ship Performance Optimisation System. Система погодной навигации планирования маршрутов Ship Performance Optimisation System (SPOS) нидерландской компании MeteoGroup

(http://www.meteogroup.com) со штаб-квартирой, расположенной в Лондоне, позволяет рассчитать оптимальный маршрут судна, учитывая состояние волнения, течений, ветра и других составляющих окружающей среды и характеристик судна (рис. 6) [12].

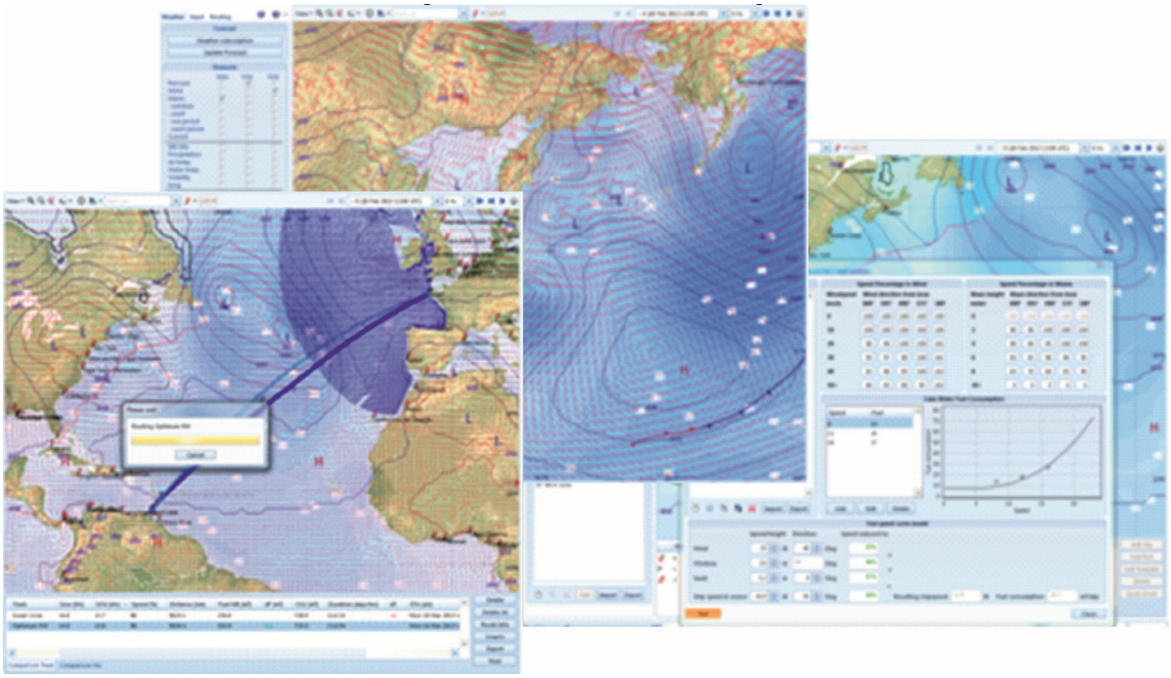


Рис. 6. Различные режимы системы SPOS

Данная система предоставляет на судно и постоянно обновляет в процессе движения по выбранному маршруту детальную информацию о состоянии погоды. Капитан и экипаж могут выбрать один из предложенных системой маршрутов и скорректировать его в процессе рейса. Маршрут обновляется каждый день с учетом последнего прогноза погоды.

Компания MeteoGroup позволяет осуществить интеграцию своего продукта в программное обеспечение основных мировых производителей электронно-картографических навигационных систем (ЭКНИС) и поставщиков навигационных карт, таких как PC Maritime с их продуктом Navmaster, компании Transas: NaviSailor, Global Navigation Solutions (GNS) с Voyager, Sperry Marine, Furuno и Адмиралтейство Великобритании в области e-Navigation.

Возможности системы позволяют передать данные спланированного в SPOS маршрута в ЭКНИС для осуществления безопасной и эффективной навигации вдоль запланированного маршрута. Предварительно капитан прокладывает маршрут в ЭКНИС и экспортирует его в папку SPOS. С использованием функционала SPOS, указав предпочтения по маршруту и ограничения по состоянию окружающей среды для судна, система предлагает ряд оптимальных маршрутов, из которых выбирается наиболее предпочтительный, экспортируемый затем в выбранный формат ЭКНИС. После этого маршрут загружается в судовую ЭКНИС для перепроверки и выполнения перехода.

Использование продукта SPOS позволяет отображать на экране ЭКНИС предлагаемый оптимальный маршрут и гидрометеорологическую обстановку. Комбинация SPOS и ЭКНИС, по заверениям компании позволяет наиболее эффективно использовать преимущества обеих этих систем для планирования оптимального маршрута.

Продукт компании MeteoGroup позволяет производить ежесуточный пересчет маршрута при получении обновленного прогноза погоды и предоставляет судоводителям обширные возможности по принятию решения о том, какой из предложенных маршрутов является предпочтительным. Такой подход в случае пересчета судоводителями маршрута после каждого обновления прогноза погоды добавляет субъективный подход экипажа к выбранному маршруту и необходимость манипуляций с файлами по импорту и экспорту информации между ЭКНИС и SPOS.

Система Commercial Marine Vessel Routing. Норвежская компания Jeppesen (http://ww1.jeppesen.com), являющаяся морским подразделением компании Boeing, предлагает ряд продуктов для оптимизации управления флотом компании и отдельными судами [15] – [17]. В частности, в качестве основного продукта система Commercial Marine Vessel Routing предлагает услуги по маршрутизации морских судов за счет точного моделирования движения судна с учетом окружающей обстановки (рис. 7).



Рис. 7. Построение маршрутов, анализ погоды и оптимизация рейсов компанией Jeppesen посредством услуги Commercial Marine Vessel Routing

Используемая информация постоянно обновляется и на основе динамически обновляемых данных осуществляется оптимизация маршрута. Прогноз погоды может достигать 15 дней. Для заказа услуги необходимо предоставить информацию о контактных данных лица, ответственного за переход на судне и в компании, типе и параметрах судна и груза, осадке, водоизмещении и скорости судна. Система Jeppesen строит оптимальный маршрут (рис. 8) на основе информации о порте отхода и предполагаемом времени отхода или текущих координатах судна, а также порте назначения и желательном времени прихода в порт назначения. Согласно утверждению компании Jeppesen, маршрут строится опытными морскими капитанами. Для корректировки и оптимизации оставшейся части маршрута заказчику достаточно раз в сутки сообщать в Jeppesen координаты судна.

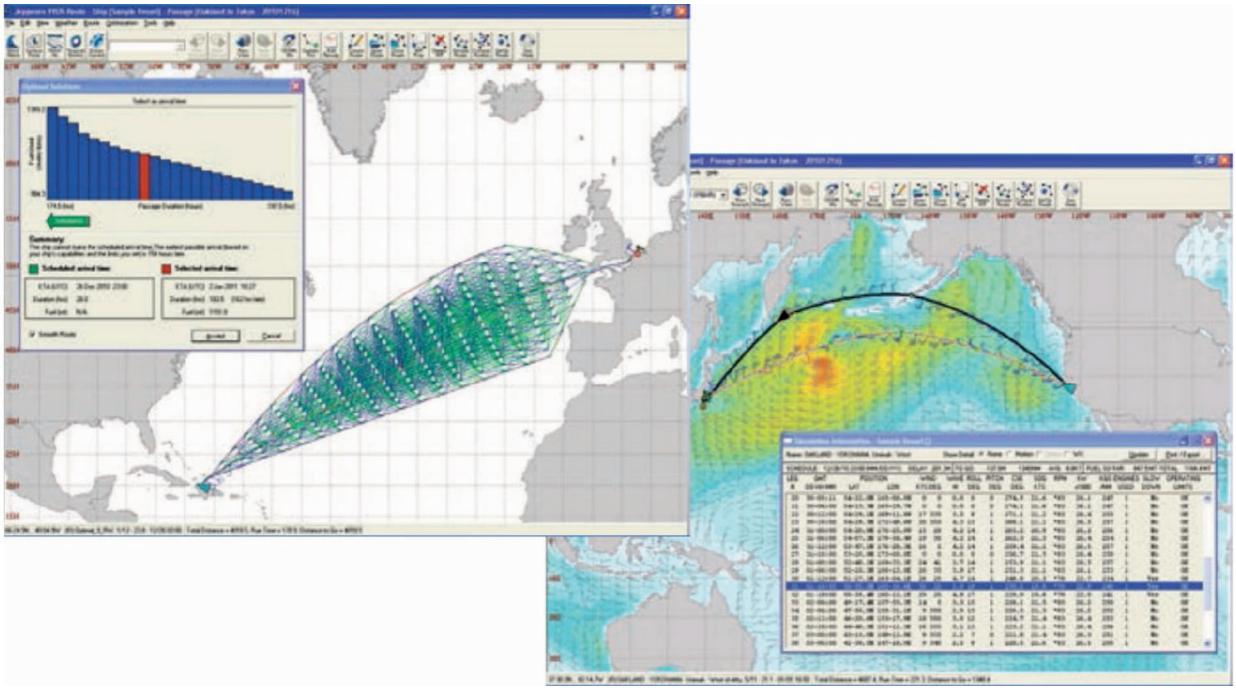


Рис. 8. Снимки экрана, приложения оптимизации движения судна и маршрутов VVOS от компании Jeppesen

Основные возможности приложения оптимизации движения судна и маршрутов VVOS от компании Jeppesen заключаются в автоматическом построении оптимизированных маршрутов. При этом пользователю предлагается выбрать компромиссный вариант между предполагаемым временем прибытия и расходом топлива, минимизацией скорости в целях экономии топлива для требуемого времени прибытия. Система Jeppesen на основе собственных моделей позволяет анализировать предлагаемые маршруты с учетом времени прихода, расхода топлива, дистанции, нагрузки на корпус, состояния моря и погодных условий. Составленные маршруты можно экспортировать в ЭКНИС, используя двадцать различных форматов. При наличии подписки на услуги Jeppesen возможна автоматизированная проверка глубин и иных навигационных опасностей. Интеграция с бортовыми системами электронной почты позволяет автоматически обновлять прогноз погоды.

Использование гидродинамического моделирования, алгоритмов оптимизации и прогнозов погоды с высоким разрешением позволяет системе VVOS анализировать модель движения судна, его двигателя и движителей и выдавать рекомендации по направлению движения и скорости, чтобы свести к минимуму повреждения судна, обусловленные тяжелыми погодными явлениями. Штурман может с помощью спутниковой связи в любое время загрузить последние прогнозы и заказать повторную оптимизацию маршрута.

Продукты компании Jeppesen предоставляют широкий перечень услуг по оптимизации маршрута. Участие опытных штурманов при планировании рейса, а также использование собственных математических моделей должно обеспечивать наилучшие варианты маршрута для судов, осуществляющих морские перевозки. Однако при прокладке сложных маршрутов, при наличии навигационных препятствий и обхода метеорологических фронтов влияние человеческого фактора может в некоторых случаях привести к нежелательным результатам. Для корректировки и пересчета маршрута в процессе движения необходима постоянная связь с компанией Jeppesen, а использование спутниковых прогнозов погоды в связи с ограничениями существующих в настоящее время спутниковых сканеров вносит дополнительную ошибку в оценку ситуации окружающей судно обстановки в районе плавания.

Сравнительная характеристика функционала систем навигации

На основе изложенной информации выполнено сравнение функционала рассмотренных в таблице систем маршрутизации судов.

Сравнение функций систем маршрутизации

Функции системы	Системы				
	Navi-Planner 4000	Passage Manager	Bon Voyage System	Ship Performance Optimisation System	Commercial Marine Vessel Routing
Предварительная прокладка от порта к порту	+	+	+	+	+
Автоматическая предварительная прокладка	+	–	–	–	+
Предварительна прокладка, выполняемая опытными штурманами	–	+	+	+	+
Контроль глубины под килем и просвета прохода под мостами	+	Нет данных	Нет данных	Нет данных	+
Проверка предварительной прокладки на предмет навигационных опасностей и информирование об обнаруженных опасностях	+	Нет данных	Нет данных	Нет данных	+

Окончание

Автоматический расчет опорных точек	+	–	–	–	+
Ввод опорных точек	–	+	+	+	+
Экспорт / импорт предварительной прокладки	+			+	+
Интеграция с системой ЭКНИС	+	+	–	+	+
Возможность получения онлайн корректуры бумажных карт и извещений	+	+	–	–	–
Создание плана перехода, от порта к порту и от причала до причала	+	+	+	+	+
Модель движения судна с учетом влияния окружающей среды	–	–	+	+	+
Точный прогноз потери скорости	–	–	+	+	+
Расчеты продолжительности рейса	–	–	+	+	+
Представление текущей погоды и течений вдоль маршрута	+	+	+	+	+
Автоматическая оптимизация маршрута судна	+	–	+	–	+

В зависимости от поставленных задач следует выбрать систему, которая наиболее полно выполнит поставленные задачи с учётом основных функций:

– Navi-Planner 4000 — погодная функциональность, заказ и обработка карт, оптимизация маршрута;

– Passage Manager — подбор и корректура электронных карт вдоль запланированного маршрута;

– Bon Voyage System — оптимизация морского рейса по погодным условиям;

– Ship Performance Optimisation System — погодная навигация планирования маршрутов;

– Commercial Marine Vessel Routing — автоматическое построение оптимизированных маршрутов.

Выводы

Анализ функциональных возможностей современных систем планирования маршрута показывает широкие возможности системы оптимизации маршрутов движения морских судов и позволяет сделать следующие выводы.

1. Рассмотренные в статье системы компаний ChartCo и Транзас за счет наличия собственной базы навигационных карт предпочтительны при планировании маршрутов, проходящих вдоль берегов или в районах с большим количеством навигационных опасностей. Наличие откорректированных карт позволяет избежать опасных для навигации мест и оказывает судоводителям неоценимую помощь в случае любого изменения маршрута. Предложение компании StormGeo и Jeppesen больше подходит для трансокеанских маршрутов, так как содержит обширный функционал по анализу гидрометеорологической обстановки на маршруте и его последующему учету при планировании маршрута.

2. Для использования систем планирования маршрута с максимальной эффективностью системам планирования маршрутов требуется подключение к серверу компании и обновление информации два раза в сутки или чаще. В этом случае выполняется обновление маршрута с учетом изменения навигационной и гидрометеорологической информации [24], [25].

3. В качестве дополнительных функций, которые можно включить в функционал систем планирования маршрутов, предлагается использовать современные возможности обработки информации, имеющей разные форматы и физический смысл, а также использовать для оптимизации движения судна дополнительные возможности современного судового навигационного оборудования. Так, использование математического аппарата нечеткой логики на основе экспертных оценок о различных факторах, влияющих на безопасную перевозку, позволит строить маршрут с различной степенью экономичности, скорости и минимально выбранным уровнем безопасности и комфорта, а также с большей точностью учитывать особенности судна [26] – [28]. Учет локальной информации о состоянии судна и окружающей его обстановке (дополнительно к данным прогноза погоды, получаемым с берега с периодичностью от 4 ч до 24 ч) позволит иметь более подробный прогноз и точнее учитывать влияние окружающей среды на судно при построении оптимального маршрута движения [29], [30].

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Пачурин Г. В.* Эффективный судовой электронный управляющий комплекс / Г. В. Пачурин, С. А. Васильев, М. Н. Ребрушкин // Фундаментальные исследования. — 2015. — № 2 – 19. — С. 4171–4177.

2. *Васильев С. А.* Устройства повышения эффективности и экологичности работы флота / С. А. Васильев, Г. В. Пачурин, М. С. Васильев // Безопасность и экология технологических процессов и производств: тезисы докл. Всерос. конф. (Ростовская обл., п. Персиановский, 23 – 25 мая 2007 г.). — С. 21–28.

3. *Baldauf M.* Potentials of e-Navigation – Enhanced Support for Collision Avoidance / M. Baldauf, K. Benedict, C. Kruger // TransNav: International Journal on Marine Navigation and Safety of Sea Transportation. — 2014. — Vol. 8. — Nr. 4. — Pp. 613–617. DOI: 10.12716/1001.08.04.18.

4. *Burmeister H. C.* Interaction of Harsh Weather Operation and Collision Avoidance in Autonomous Navigation / H. C. Burmeister, W. C. Bruhn, L. Walthe // TransNav: International Journal on Marine Navigation and Safety of Sea Transportation. — 2015. — Vol. 9. — Nr. 1. — Pp. 31–40. DOI: 10.12716/1001.09.01.04.

5. *Benedict K.* Simulation Augmented Manoeuvring Design and Monitoring – a New Method for Advanced Ship Handling / K. Benedict, M. Kirchhoff, M. Gluch, S. Fischer, M. Schaub // TransNav: International Journal on Marine Navigation and Safety of Sea Transportation. — 2014. — Vol. 8. — Nr 1. — Pp. 131–141. DOI: 10.12716/1001.08.01.15.

6. *Baldauf M.* Energy-efficient Ship Operation – Training Requirements and Challenges / M. Baldauf, R. Baumler, A. Olcer, T. Nakazawa, K. Benedict, S. Fischer, M. Schaub // TransNav: International Journal on Marine Navigation and Safety of Sea Transportation. — 2013. — Vol. 7. — Nr 2. — Pp. 283–290. DOI: 10.12716/1001.07.02.16.

7. *Каретников В. В.* Основные аспекты использования современных инфокоммуникационных технологий для обеспечения беспилотного судовождения на водном транспорте / В. В. Каретников, И. В. Пащенко, 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.

8. *Зайцев А. И.* «MARINET» — научный морской сегмент национальной технологической инициативы / А. И. Зайцев // Флотэксперт. — 2015. — № 6. — С. 14–15.

9. *Булах Е. Г.* Современное состояние отечественных электронных картографических систем / Е. Г. Булах // Научные труды Дальневосточного государственного технического рыбохозяйственного университета. — 2015. — Т. 35. — С. 66–73.

10. *Kasyk L.* An analysis of discrepancies in search areas in a diagram of an expanding square search / L. Kasyk, K. Pleskacz, G. Bugajski // Zeszyty Naukowe/Akademia Morska w Szczecinie. — 2016. — No 45 (117). — Pp. 94–98. DOI: 10.17402/091.

11. *Brindusa C.* Ship-board weather routing systems / C. Brindusa // *Universitatii Maritime Constanta. Analele*. — 2014. — Vol. 15. — № 21. — С. 45–48.

12. *Wisniewski B.* Comparison of ship performance optimization systems and the bon voyage onboard routing system / B. Wisniewski, M. Szymanski // 47 Scientific Journals of the Maritime University of Szczecin. — 2016. — No. 47. — Pp. 106–115. DOI: 10.17402/156.

13. *Szymanski M.* Navigational and legislative constraints for optimization of ocean routes in the Northern Pacific Ocean / M. Szymanski, B. Wisniewski // 48 Scientific Journals of the Maritime University of Szczecin. — 2016. — No. 48. — Pp. 96–104. DOI: 10.17402/182.

14. *Szymanski M.* Application of Bon Voyage 7.0 (AWT) to programming of an ocean route of post-Panamax container vessel in transpacific voyage Seattle – Pusan 26.08.2015, 1600UTC – 05.09.2015, 2100UTC / Maciej Szymański, Bernard Wiśniewski // 48 Scientific Journals of the Maritime University of Szczecin. — 2016. — No. 48. — Pp. 182–186. DOI: 10.17402/193.

15. *Huntington H. P.* Vessels, risks, and rules: planning for safe shipping inbering strait / H. P. Huntington, R. Daniel, A. Hartsig, K. Harun, M. Heiman, R. Meehan, G. Noongwook, L. Pearson, M. Prior-Parks, M. Robards, G. Stetson // Marine Policy. — 2015. — Vol. 51. — Pp. 119–127. DOI: 10.1016/j.marpol.2014.07.027.

16. *Ronen D.* Marine inventory routing: shipments planning / D. Ronen // Journal of the Operational Research Society. — 2002. — Vol. 53. — Is. 1. — Pp. 108–114. DOI: 10.1057/palgrave.jors.2601264.

17. *Halvorsen-Weare E. E.* Routing and scheduling in a liquefied natural gas shipping problem with inventory and berth constraints / E. E. Halvorsen-Weare, K. Fagerholt // Annals of Operations Research. — 2013. — Vol. 203. — Is. 1. — Pp. 167–186. DOI: 10.1007/s10479-010-0794-y.

18. *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.

19. *Kobayashi E.* Advanced Navigation Route Optimization for an Oceangoing Vessel / E. Kobayashi, T. Asajima, N. Sueyoshi // International Journal on Marine Navigation and Safety of Sea Transportation. — 2011. — Vol. 5. — № 3. — Pp. 377–383.

20. *Romeo B.* Weather and oceanographic influence on the maritime navigation / B. Romeo, S. Ionut-Cristian // *Universitatii Maritime Constanta. Analele*. — 2014. — Vol. 15. — № 21. — Pp. 29–34.

21. *Вагущенко Л. Л.* Судовые навигационно-информационные системы / Л. Л. Вагущенко. — Одесса: Феникс, 2004. — 302 с.

22. Руководство по Всемирной геодезической системе-1984 (WGS-84) / ред. ИКАО. — Канада, Квебек: ИКАО, 2002. — 149 с.

23. Международная конвенция о подготовке и дипломировании моряков и несении вахты 1978 года (ПДМНВ-78) с поправками (консолидированный текст). — СПб., 2010. — 806 с.

24. *Акмайкин Д. А.* Проект системы оперативного анализа и оптимизации движения морских судов / Д. А. Акмайкин, С. Ф. Клюева, П. А. Салюк // Вестник Государственного университета морского и речного флота имени адмирала С. О. Макарова. — 2015. — № 1 (29). — С. 229–236.

25. *Акмайкин Д. А.* Формирование модели экспертной системы оценки безопасности движения судна / Д. А. Акмайкин, С. Ф. Клюева, А. Д. Москаленко, М. А. Москаленко // Транспортное дело России. — 2015. — № 6. — С. 203–206.

26. *Акмайкин Д. А.* Повышение безопасности мореплавания на парусных прогулочных судах с помощью программно-аппаратных средств / Д. А. Акмайкин, В. В. Ярощук, Д. А. Бушко // Наука и техника транспорта. — 2012. — № 2. — С. 23–31.

27. *Акмайкин Д. А.* Оптимизация пути движения парусного судна с учетом ветроволнового прогноза по маршруту следования / Д. А. Акмайкин, В. В. Ярощук, П. К. Назаренко, Д. С. Нечепуренко // Транспортное дело России. — 2014. — № 4. — С. 17–20.

28. *Akmaykin D. A.* “Optimization of the search algorithm for the shortest route / D. A. Akmaykin, S. F. Klyueva, O. A. Bukin, P. A. Salyuk // “Stability and Control Processes” in Memory of VI Zubov (SCP), 2015 International Conference. — IEEE, 2015. — Pp. 545–548.

29. *Акмайкин Д. А.* Обработка радиолокационной информации программно-аппаратными средствами / Д. А. Акмайкин, Д. Б. Хоменко, Д. В. Клюев, Е. Н. Фалина // Автоматизация процессов управления. — 2012. — № 4. — С. 62–66.

30. *Лоскутов Н. В.* Некоторые аспекты обработки радиолокационной информации в системах управления движением судов / Н. В. Лоскутов, Д. А. Акмайкин // Сб. докладов XIII Междунар. конф. «Радиолокация, навигация и связь». — Воронеж, 2007. — С. 1731–1740.

REFERENCES

1. Pachurin, G. V., S. A. Vasilev, and M. N. Rebrushkin. “Efficiency of courts electronic control complex.” *Fundamental research* 2-19 (2015): 4171–4177.

2. Vasil’ev, S. A., G. V. Pachurin, and M. S. Vasil’ev. “Ustroistva povysheniya effektivnosti i ekologichnosti raboty flota.” *Bezopasnost’ i ekologiya tekhnologicheskikh protsessov i proizvodstv: tezisy dokl. Vseros. konf. (Rostovskaya oblast’, p. Persianovskii, 23-25 maya 2007 g.)*: 21–28.

3. Baldauf, M., K. Benedict, and C. Krüger. "Potentials of e-Navigation–Enhanced Support for Collision Avoidance." *TransNav: International Journal on Marine Navigation and Safety of Sea Transportation* 8.4 (2014): 613–617. DOI: 10.12716/1001.08.04.18.

4. Burmeister, H-C., W. C. Bruhn, and L. Walther. "Interaction of harsh weather operation and collision avoidance in autonomous navigation." *TransNav: International Journal on Marine Navigation and Safety of Sea Transportation* 9.1 (2015): 31–40. DOI: 10.12716/1001.09.01.04.

5. Benedict, K., M. Kirchhoff, M. Gluch, S. Fischer, and M. Schaub. "Simulation Augmented Manoeuvring Design and Monitoring–a New Method for Advanced Ship Handling." *TransNav: International Journal on Marine Navigation and Safety of Sea Transportation* 8.1 (2014): 131–141. DOI: 10.12716/1001.08.01.15.

6. Baldauf, Michael, R. Baumler, A. Olcer, T. Nakazawa, K. Benedict, S. Fischer, and M. Schaub. "Energy-efficient Ship Operation–Training Requirements and Challenges." *TransNav: International Journal on Marine Navigation and Safety of Sea Transportation* 7.2 (2013): 283–290. DOI: 10.12716/1001.07.02.16.

7. Karetnikov, V. V., I. V. Pashchenko, and A. I. 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.

8. Zaitsev, A. I. "MARINET" – nauchnyj morskoj segment nacional'noj tehnologicheskoj iniciativy." *Flotjekspert* 6 (2015): 14–15.

9. Bulakh, E. G. "Current state of domestic electronic cartographical systems." *Nauchnye trudy Dal'nevostochnogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo rybokhozyaistvennogo universiteta* 35 (2015): 66–73.

10. Kasyk, Lech, Krzysztof Pleskacz, and Grzegorz Bugajski. "An analysis of discrepancies in search areas in a diagram of an expanding square search." *Zeszyty Naukowe/Akademia Morska w Szczecinie* 45(117) (2016): 94–98. DOI: 10.17402/091.

11. Brindusa, Chiotoroiu. "Ship-board weather routing systems." *Universitatii Maritime Constanta. Analele* 15.21 (2014): 45–48.

12. Wiśniewski, Bernard, and Maciej Szymański. "Comparison of ship performance optimization systems and the bon voyage onboard routing system." *47 Scientific Journals of the Maritime University of Szczecin* 47 (2016): 106–115. DOI: 10.17402/156.

13. Szymański, Maciej, and Bernard Wiśniewski. "Navigational and legislative constraints for optimization of ocean routes in the Northern Pacific Ocean." *48 Scientific Journals of the Maritime University of Szczecin* 48 (2016): 96-104. DOI: 10.17402/182.

14. Szymański, Maciej, and Bernard Wiśniewski. "Application of Bon Voyage 7.0 (AWT) to programming of an ocean route of post-Panamax container vessel in transpacific voyage Seattle–Pusan 26.08. 2015, 1600UTC–05.09. 2015, 2100UTC." *48 Scientific Journals of the Maritime University of Szczecin* 48 (2016): 182-186. DOI: 10.17402/193.

15. Huntington, Henry P., Raychelle Daniel, Andrew Hartsig, Kevin Harun, Marilyn Heiman, Rosa Meehan, George Noongwook, Leslie Pearson, Melissa Prior-Parks, Martin Robards, and George Stetson. "Vessels, risks, and rules: Planning for safe shipping in Bering Strait." *Marine Policy* 51 (2015): 119–127. DOI: 10.1016/j.marpol.2014.07.027.

16. Ronen, David. "Marine inventory routing: Shipments planning." *Journal of the Operational Research Society* 53.1 (2002): 108–114. DOI: 10.1057/palgrave.jors.2601264.

17. Halvorsen-Weare, Elin E., and Kjetil Fagerholt. "Routing and scheduling in a liquefied natural gas shipping problem with inventory and berth constraints." *Annals of Operations Research* 203.1 (2013): 167–186. DOI: 10.1007/s10479-010-0794-y.

18. 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.

19. Kobayashi, E., T. Asajima, and N. Sueyoshi. "Advanced Navigation Route Optimization for an Oceangoing Vessel." *International Journal on Marine Navigation and Safety of Sea Transportation* 5.3 (2011): 377–383.

20. Romeo, Bosneagu, and Scurtu Ionut-Cristian. "Weather and Oceanographic Influence on the Maritime Navigation." *Universitatii Maritime Constanta. Analele* 15.21 (2014): 29–34.

21. Vagushchenko, L. L. *Sudovye navigatsionno-informatsionnye sistemy*. Odessa: Feniks, 2004.

22. *Rukovodstvo po Vsemirnoi geodezicheskoi sisteme - 1984 (WGS-84)*. Kanada, Kvebek: IKAO, 2002.

23. *International Convention on Standards of Training, Certification and Watchkeeping for Seafarers, 1978 (STCW 1978), as amended (consolidated text)*. SPb.: AO "CNIIMF", 2010.

24. Akmaykin, Denis Aleksandrovich, Svetlana Fedorovna Klyueva, and Pavel Anatolievich Salyuk. "Operational system design analysis and optimization of maritime traffic." *Vestnik Gosudarstvennogo universiteta morskogo i rechnogo flota imeni admirala S. O. Makarova* 1(29) (2015): 229–236.

25. Akmaykin, D., S. Klyueva, A. Moskalenko, and M. Moskalenko. "Creation of assessment of maritime safety expert system model." *Transport business of Russia* 6 (2015): 203–206.

26. Akmaykin, D. A., V. V. Yaroshchuk, and D. A. Bushko. "Increasing of safety of navigation on sailing pleasure vessels by means of software and hardware." *Science and Technolody in Transport* 2 (2012): 23–31.

27. Akmaykin, D., V. Yaroschuk, P. Nazarenko, and D. Nechepurenko. "Optimization of the sailing ship path windchill-wave forecast along the route." *Transport business of Russia* 4 (2014): 17–20.

28. Akmaykin, Denis A., S. F. Klyueva, O. A. Bukin, and P. A. Salyuk. "Optimization of the search algorithm for the shortest route." *"Stability and Control Processes" in Memory of VI Zubov (SCP), 2015 International Conference*. IEEE, 2015: 545–548.

29. Akmaykin, D. A., D. B. Khomenko, D. V. Kluev, and E. S. Falina. "Processing of Radar Data by Softwareand Hardware Facilities." *Automation of Control Processes* 4 (2012): 62–66.

30. Loskutov, N. V., and D. A. Akmaikin. "Nekotorye aspekty obrabotki radiolokatsionnoi informatsii v sistemakh upravleniya dvizheniem sudov." *Sbornik dokladov KhIII Mezhdunarodnoi konferentsii «Radiolokatsiya, navigatsiya i svyaz'»*. Voronezh, 2007: 1731–1740.

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

Акмайкин Денис Александрович —
кандидат физико-математических наук, доцент.
Морской государственный университет
имени адмирала Г. И. Невельского
690003, Российская Федерация, Владивосток,
ул. Верхнепортовая, 50а
e-mail: *akmaykin@msun.ru*

Хоменко Дмитрий Борисович —
кандидат технических наук
Морской государственный университет
имени адмирала Г. И. Невельского
690003, Российская Федерация, Владивосток,
ул. Верхнепортовая, 50а
e-mail: *khomenkodmitriy.b@gmail.com*

Клюева Светлана Федоровна —
кандидат технических наук.
Морской государственный университет
имени адмирала Г. И. Невельского
690003, Российская Федерация, Владивосток,
ул. Верхнепортовая, 50а
e-mail: *klsvetlkl@gmail.com*

INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Akmaykin, Denis A. —
PhD, associate professor
Maritime State University named
after admiral G. I. Nevelskoi
50a Verkhneportovaya Str.,
Vladivostok, 690003, Russian Federation
e-mail: *akmaykin@msun.ru*

Khomenko, Dmitry B. —
PhD
Maritime State University named
after admiral G. I. Nevelskoi
50a Verkhneportovaya Str., Vladivostok,
690003, Russian Federation
e-mail: *khomenkodmitriy.b@gmail.com*

Klueva, Svetlana F. —
PhD
Maritime State University named
after admiral G. I. Nevelskoi
50a Verkhneportovaya Str., Vladivostok,
690003, Russian Federation
e-mail: *klueva@msun.ru*

Статья поступила в редакцию 23 декабря 2016 г.
Received: December 23, 2016.

ВЕСТНИК
ГОСУДАРСТВЕННОГО УНИВЕРСИТЕТА
МОРСКОГО И РЕЧНОГО ФЛОТА ИМЕНИ АДМИРАЛА С. О. МАКАРОВА

DOI: 10.21821/2309-5180-2017-9-2-252-259

STUDY OF VESSEL SPEED MODE ON THE OPEN STRAIGHT SECTION OF KALININGRAD SEA CANAL

S. V. Ermakov

Baltic Fishing Fleet State Academy FSBEI HE «KSTU»,
Kaliningrad, Russian Federation

A description of the procedure and results of a long AIS-monitoring speed of vessel following on the open straight section of Kaliningrad Sea Canal are given.

For monitoring purposes used information placed on the public official sources: the instantaneous values of the vessels speed directly at the time of the passage of the canal, and in the last period, as well as vessel draft (site marinetraffic.com), port daily schedule and traffic log (site FGBU "Administration of the Baltic sea ports").

During the monitoring period from 20 July 2015 to 20 July 2016 made observations in relation to 2518 passage of vessels by the open straight section of KSC (both the entrance and exit from the port of Kaliningrad). The maximum speed was recorded for each of the vessels reached at the investigated area. As a result of processing the whole array of vessel speed data determined that 16,8% pass accompanied by a violation of (excess) of the absolute speed limit of 10 knots, and more than half of cases (52,9%) vessels followed a speed exceeding the allowed normative document ("Compulsory regulations") for its draft.

About 70% of violations of the speed mode characterized by excessive speed is not more than 1 knot. In 21,6 % of cases, the excess is in the range of 1 to 2 knots. The highest value of fixed speed was 12,8 knots, and the highest value of excess was 4,8 knots.

The presented results may be used as an information base for a comprehensive study of the problems of ensuring the safety of vessel traffic in the ports and on the approaches to it.

Keywords: Kaliningrad Sea Canal, speed mode, monitoring.

For citation:
Ermakov, Sergey V. "Study of vessel speed mode on the open straight section of Kaliningrad Sea Canal." *Vestnik Gosudarstvennogo universiteta morskogo i rechnogo flota imeni admirala S.O. Makarova* 9.2 (2017): 252–259. DOI: 10.21821/2309-5180-2017-9-2-252-259.

УДК 656.61.052

ИССЛЕДОВАНИЕ СКОРОСТНОГО РЕЖИМА СУДОВ НА ОТКРЫТОМ ПРЯМОЛИНЕЙНОМ УЧАСТКЕ КАЛИНИНГРАДСКОГО МОРСКОГО КАНАЛА

С. В. Ермаков

Балтийская государственная академия рыбопромыслового флота ФГБОУ ВО «КГТУ»,
Калининград, Российская Федерация

Приведены описание процедуры и результаты длительного АИС-мониторинга скоростного режима судов, следующих по открытому прямолинейному участку Калининградского морского канала.

В целях мониторинга использована информация, размещаемая в открытых официальных источниках: мгновенные значения скорости судов как непосредственно в момент прохода канала, так и за прошедший период, а также осадка судов (сайт marinetraffic.com), суточный план-график и журнал движения судов в порту Калининград (сайт ФГБУ «Администрации морских портов Балтийского моря»).

В течение мониторинга, в период с 20 июля 2015 по 20 июля 2016 г., произведены наблюдения в отношении 2518 проходов судов как на выход из порта, так и на вход в порт Калининград. Для каждого из судов было зафиксировано максимальное значение скорости, достигнутое на исследуемом участке. В результате обработки всего массива данных о скорости судов определено, что 16,8 % проходов сопровождалось нарушением (превышением) абсолютного ограничения скорости, равного 10 уз, а в более половине случаев (52,9 %) суда шли со скоростью, превышающей разрешенную нормативным документом («Обязательными постановлениями») для их осадки.

Около 70 % нарушений скоростного режима характеризовалось превышением скорости не более чем на 1 уз. В 21,6 % случаев превышение находилось в пределах 1 –2 уз. Наибольшее из зафиксированных значений скорости составило 12,8 уз, а максимальное превышение — 4,8 уз.

Результаты представленного мониторинга могут быть использованы в качестве информационной базы для комплексного исследования проблем обеспечения безопасности движения судов в портах и на подходах к ним.

Ключевые слова: Калининградский морской канал, скоростной режим, мониторинг.

Для цитирования:
Ермаков С. В. Исследование скоростного режима судов на открытом прямолинейном участке Калининградского морского канала / С. В. Ермаков // Вестник Государственного университета морского и речного флота имени адмирала С. О. Макарова. — 2017. — Т. 9. — № 2. — С. 252–259. DOI: 10.21821/2309-5180-2017-9-2-252-259.

Введение

Одним из условий безопасного прохождения судном той или иной акватории является соблюдение установленного скоростного режима, который регламентируется в зависимости от стесненности и глубины акватории плавания, загрузки судна, обстоятельств плавания и многих других факторов. Соблюдение скоростного режима если и не даёт гарантию безопасного судовождения, то, как минимум, снижает риск аварийных происшествий. И, наоборот, превышение установленной скорости делает много большей вероятность столкновений судов [1], посадок на мель и т. д. По этой причине скоростной режим судов является объектом многих исследований [2] – [6].

При плавании на акватории портов портовые власти имеют право ограничивать скорость движения судов. Это право предоставляется им «Общими правилами плавания и стоянки судов в морских портах Российской Федерации и на подходах к ним», в соответствии с п. 12 которых «ограничения по скорости движения судов на акватории морского порта с учетом особенностей акватории морского порта, гидротехнических сооружений, средств навигационного оборудования, интенсивности движения, типов и размерений судов устанавливаются обязательными постановлениями» [7].

В свою очередь, актуальные «Обязательные постановления в морском порту Калининград» [8, п. 40] следующим образом регламентируют скоростной режим в Калининградском морском канале: «*Скорости движения судна в Калининградском морском канале не должны превышать: для судов с осадкой до четырех метров — девяти узлов; для судов с осадкой от четырех до шести метров — восьми узлов; для судов с осадкой от шести до семи метров — семи узлов; для судов с осадкой более семи метров — шести узлов. На открытом участке Калининградского морского канала (между пикетами № 77 – 116) в Калининградском заливе скорость судна может быть увеличена относительно указанных выше на один узел*». Таким образом, скорость судов в открытой части КМК не должна превышать 10 уз.

В процессе исследования безопасности излучения лазерных створных маяков «СКАЛС» [9], при котором проводился мониторинг минимальной скорости судов на открытом прямолинейном участке Калининградского морского канала (КМК) [10], [11], было обнаружено, что многие суда следуют по указанной акватории с превышением нормативно установленной скорости. Этот факт послужил поводом для более детального исследования скоростного режима судов на указанном участке КМК.

Краткое описание акватории

Исследуемая акватория — прямолинейный участок КМК — находится между 77 и 116 пикетами, т. е. составляет порядка 3,9 км, или около 2,1 мили. Глубины в канале подвержены изменениям и здесь периодически проводятся дноуглубительные работы. Грунт — ил или ил с песком. Наименьшая ширина составляет 80 м. Проектная глубина равна 10,5 м. Типовой фрагмент карты с результатами промеров глубин, выполненных 6 апреля 2015 г., представлен на рис. 1.

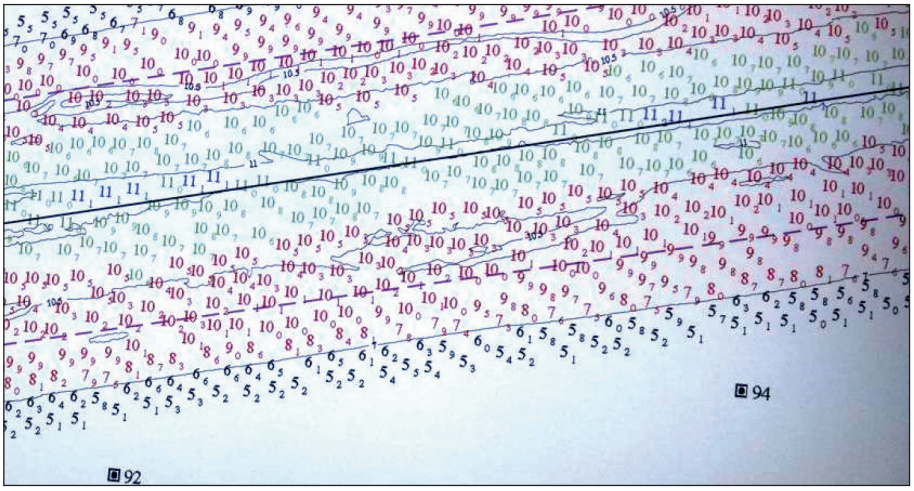


Рис. 1. Результаты промеров глубин

Для прохождения открытой прямолинейной части КМК при заходе в порт Калининград необходимо на траверзе знаков Створной и Севастопольской косы осуществить поворот влево на створ Прибрежный (76°), оставив по корме створ Севастопольский. При выходе из порта необходимо не доходя 50 м до траверза пары № 7 повернуть вправо на створ Севастопольский, оставив по корме створ Прибрежный. Направление движения — 256° .

Описание эксперимента

Для оценки скоростного режима судов в рамках исследования в период с 20 июля 2015 г. по 20 июля 2016 г. был проведён длительный практически сплошной АИС-мониторинг движения судов в Калининградском морском канале. Для проведения эксперимента был использован доступный интернет-ресурс — сайт marinetraffic.com (рис. 2), получающий и отображающий информацию о скорости судов с их АИС-транспондеров. Подобный эксперимент является допустимым в научных исследованиях [12] – [15].

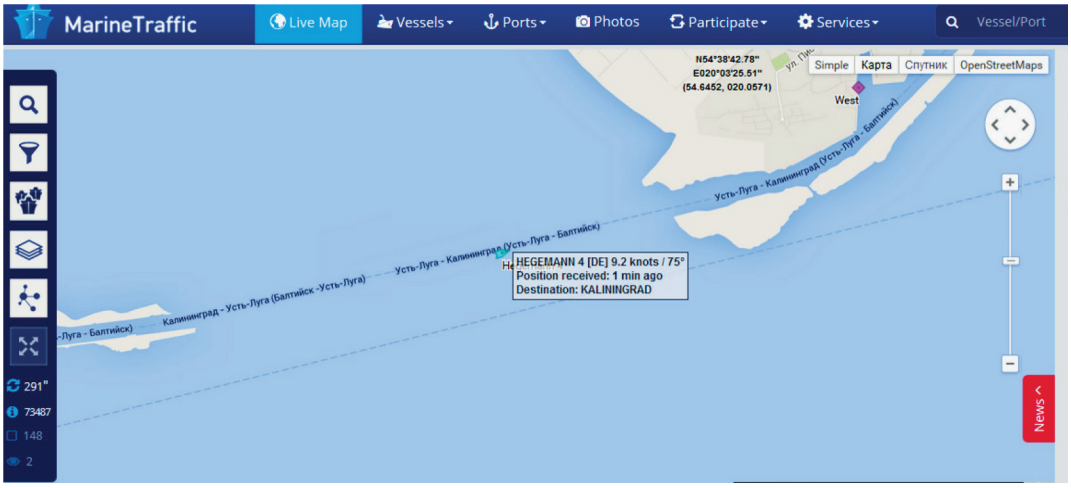


Рис. 2. Источник текущей информации о скорости судна

С целью ежесуточного планирования эксперимента и определения размеров и осадки проходящих судов была использована официальная информация из суточного плана-графика (рис. 3) и журнала движения судов в порту Калининград (рис. 4), размещаемая на сайте ФГБУ «Администрации морских портов Балтийского моря», а также информация, полученная с указанного выше интернет-ресурса.

СКАП Главная | Заявки СГДС | СГДС | Заявки Portcall | Суда в порту | Журнал движений

Предыдущий план | Следующий план

Калининград: Плановый день 29.05.2016

Операция	Время (СГДС)	Судно	Длина м.	Осадка м.	Агент	Код ИМО	Флаг	Тип	Маршрут (СГДС)	Лоцманская компания	№ зап.
1 Ввод судов	15:02 29.05.2016	БЕЛТЕРВИДЕ	110,78	6,0	НОВОБАЛТ ТЕРМИН.	9313797	Нидерланды	Сухогрузное	МОРЕ - ПР.БУЙ - НОВОБТ(пр.б.)	РМП СЗБФ	19524
1 Ввод судов	17:00 29.05.2016	ИМПЕРИАЛ	225,00	11,2	ПВЛ	9321926	Хорватия	Балкер	МОРЕ - ПР.БУЙ - ВНРЕЙД	РМП СЗБФ	19523
1 Ввод судов	19:00 29.05.2016	СИТИ ОФ АМСТЕРДАМ	99,92	5,0	ПВЛ	9174751	О-в Мен	Автомобилевоз	МОРЕ - ПР.БУЙ - 83-Б	РМП СЗБФ	19528
1 Ввод судов	03:00 30.05.2016	КОНГЕР	101,15	4,0	ТРАНСМАРИН П.С.	9122227	Антигуа и Барбуд	Контейнеровоз	МОРЕ - ПР.БУЙ - 6-ТП	РМП СЗБФ	19529
3 Перестановка	18:00 29.05.2016	СВЕДИКА ХАВ	82,48	2,5	С/Р ПРЕДП.ПРЕГОЛ	8605478	Багамские о-ва	Грузовое	ПРЕГ-5 - ДОК430	РМП СЗБФ	19522

Рис. 3. Суточный план-график движения судов в порту Калининград

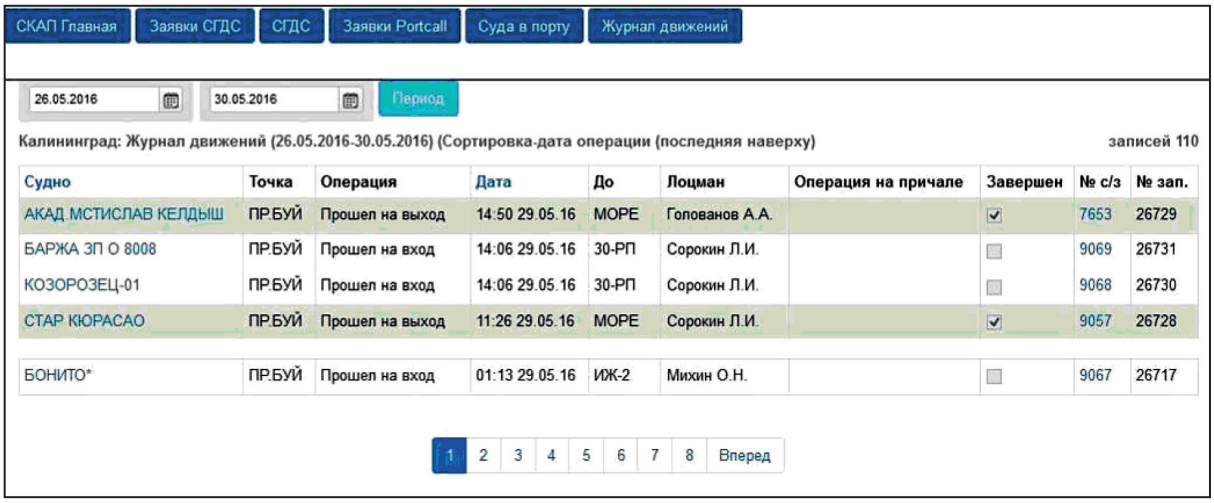


Рис. 4. Журнал движения судов в порту Калининград

В связи с тем, что эксперимент представлял собой протяженные по времени наблюдения, были использованы дополнительные возможности сайта marinetraffic.com, предоставляемые зарегистрированным пользователям и заключающиеся в построении траекторий судов с сопутствующей всплывающей информацией о скорости (рис. 5).

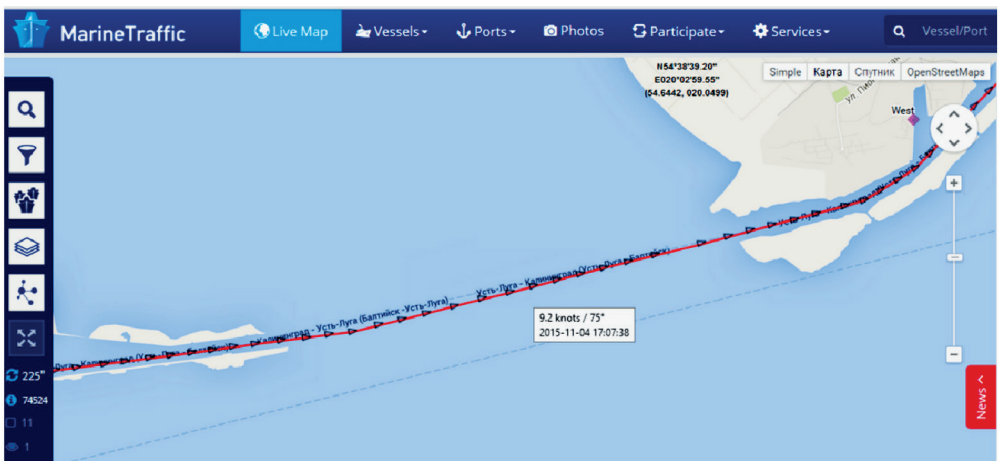


Рис. 5. Траектория движения судна с отметками АИС

Не каждое судно проходило открытую прямолинейную часть КМК с корректно функционирующим транспондером АИС. Естественно, что в процессе эксперимента регистрировались только суда, имевшие как минимум одну отметку. Однако, как правило, отметок было несколько (их количество достигало двадцати). В таком случае выбиралась максимальная скорость, так как цель эксперимента — исследовать скоростной режим судов с позиции максимальных скоростей прохождения рассматриваемого участка КМК. Кроме скорости фиксировалась также осадка судна, так как ограничения по скорости установлены «Обязательными постановлениями» в зависимости от осадки.

Результаты наблюдения за каждым судном фиксировались в специальной таблице, выдержка которой представлена в виде табл. 1.

Таблица 1

Результаты мониторинга максимальной скорости судов при прохождении прямолинейного открытого участка КМК (выдержка)

Номер прохода	Дата	Время	Направление	Название судна	Тип	Флаг	Длина, м	Ширина, м	$d_{ср}$, м	Скорость, уз	Кол-во отм.
1801	26.03.16	14:51	Вх.	Arkonia	С.г.	BB	89,56	13,17	4,0	9,0	5
1802	26.03.16	16:58	Вых.	Anja	С.г.	AG	84,78	12,0	4,5	8,5	10
1803	26.03.16	17:03	Вых.	Gala	С.г.	AG	88,2	13,6	5,9	7,9	11

Результаты эксперимента

За время проведения мониторинга было зафиксировано 2518 проходов судов (в среднем около семи проходов за день), при этом на вход в порт Калининград проследовало 1249 судов, на выход из порта — 1269 судов.

Наибольшее количество проходов (24) было зафиксировано 8 декабря 2015 г. Максимальные значения скорости судов варьировались от 3,0 до 12,8 уз, а среднее значение составило 9,0 уз. Со скоростью 12,8 уз 1 апреля 2016 г. из Калининграда выходил кипрский контейнеровоз длиной 121,85 м, шириной 18,45 м и осадкой 5,5 м. Однако наибольшее превышение над допустимым значением скорости было достигнуто другим контейнеровозом (флаг — Нидерланды, длина — 137,5 м, ширина — 21,54 м). При осадке 7,7 м, которую имело судно при входе в порт 7 июля 2016 г., допустимая скорость составляла 7 уз, фактическая — 11,8 уз. Таким образом, контейнеровоз превысил скорость на 4,8 уз. Распределение максимальных значений скорости показано в табл. 2 и на рис. 6.

Таблица 2

Распределение максимальных значений скоростей судов при их следовании на открытом прямолинейном участке Калининградского морского канала

Количество судов	Наибольшая скорость судна, уз						
	менее 5	от 5 до 6	от 6 до 7	от 7 до 8	от 8 до 9	от 9 до 10	более 10
На вход	28	42	130	300	480	238	31
На выход	22	70	163	389	472	135	18
Всего	50	112	293	689	952	373	49

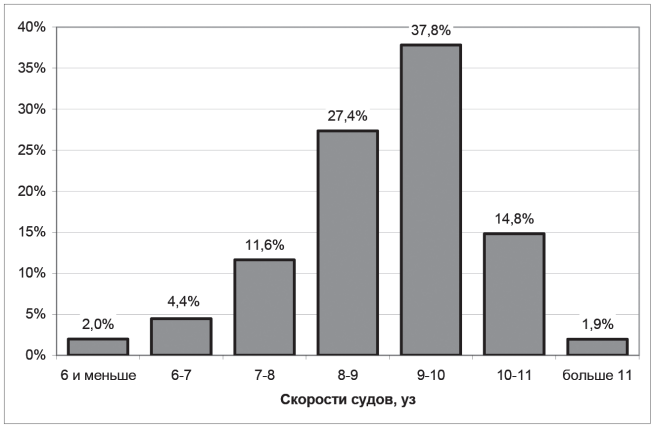
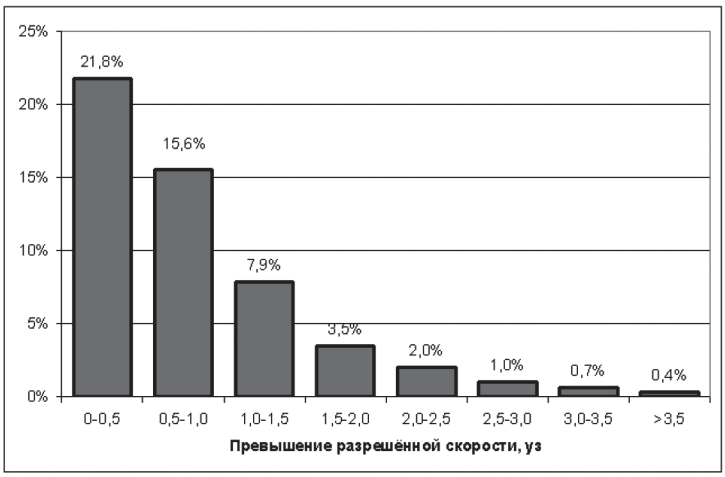


Рис. 6. Распределение максимальных значений скоростей судов

Таким образом, из рис. 6 очевидно, что даже без учёта осадки немалое количество судов (16,8 %) превышало максимально допустимую скорость, равную 10 уз. Однако если учитывать осадку судов, то оказывается, что более половины из них (точнее, 52,9 %) превышают скорость, установленную «Обязательными постановлениями». Диаграммы, представленные на рис. 7, а также полигон скоростей (рис. 8) позволяют оценить величину превышения установленного значения скорости.

а)



б)



Рис. 7. Распределение значений превышения скорости:
а — в процентах от общего количества проходящих судов;
б — в процентах от общего количества нарушений

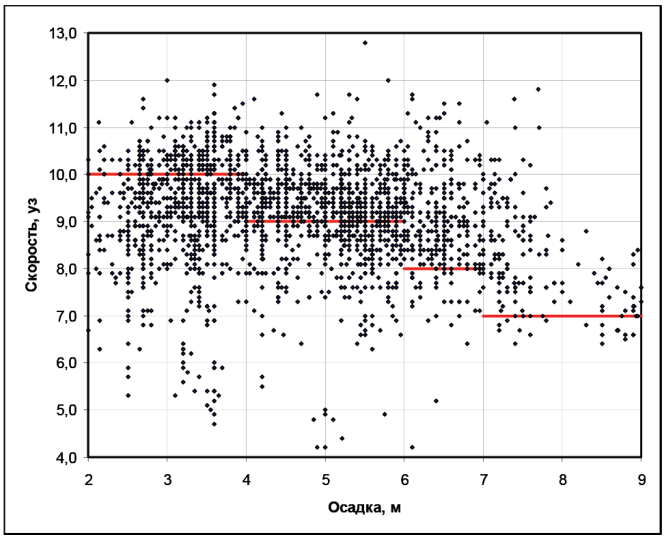


Рис. 8. Полигон скоростей

С точки зрения угрозы навигационной безопасности плавания наиболее очевидным возможным следствием превышения скорости является касание грунта вследствие значительного скоростного проседания. Кроме того, движение судов с превышением скорости влияет на целостность и сохранность Калининградского морского канала как гидротехнического сооружения и навигационного оборудования КМК. Указанные, а также иные возможные проблемы, связанные с нарушениями судами установленного скоростного режима, являются предметом отдельного исследования, в основу которого могут быть положены представленные на рис. 6 – 8 результаты эксперимента.

Выводы

1. Ограничение местными правилами (в случае российских портов — «Обязательными постановлениями») скорости движения судов на акватории портов является юридически традиционным актом. Вместе с тем исследование скоростного режима судов на открытом прямолинейном участке Калининградского морского канала, продолжающееся ровно один год, показало, что игнорирование этих ограничений является также традиционным явлением — более половины судов превышают допустимый законом предел скорости.

2. Представленные результаты мониторинга могут быть в числе прочего использованы в целях отдельного комплексного компетентного исследования, объектом которого будет административно-правовое регулирование в морских портах Российской Федерации, а предметом — действия уполномоченных органов в случае нарушения судами под флагом РФ и иностранными судами Правил плавания в порту и требований международных конвенций.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Коростылев И. Ф.* Столкновение судов и их причины / И. Ф. Коростылёв // Научные труды Дальневосточного государственного технического рыбохозяйственного университета. — 2012. — № 25. — С. 69–74.

2. *Андреев Ю. Г.* Способ выбора допустимой скорости прохода судов под мостами / Ю. Г. Андреев // Вестник Государственного университета морского и речного флота имени адмирала С. О. Макарова. — 2012. — № 3. — С. 171–175.

3. *Бобровский Д. И.* О выборе безопасной скорости судна при вхождении в поворот / Д. И. Бобровский // Научные проблемы транспорта Сибири и Дальнего Востока. — 2007. — № 1. — С. 77–79.

4. *Коноплев М. А.* Применение аппарата нечёткой логики для определения понятия «безопасная скорость» / М. А. Коноплев // Эксплуатация морского транспорта. — 2008. — № 3. — С. 37–41.

5. *Седова Н. А.* Системы поддержки принятия решений для определения безопасной скорости судна / Н. А. Седова, В. А. Седов // Информационные технологии. Радиоэлектроника. Телекоммуникации. — 2016. — № 6-2. — С. 204–210.

6. *Седова Н. А.* Удержание судна на курсе на базе нечёткой логики с учётом скорости судна / Н. А. Седова, В. С. Перечёсов, В. А. Седов / Автоматизация процессов управления. — 2013. — № 2 (32). — С. 74–79.

7. Общие правила плавания и стоянки судов в морских портах Российской Федерации и на подходах к ним (утв. приказом Минтранса РФ №140 от 20.08.2009, в ред. приказа Минтранса РФ № 69 от 22.03.2010).

8. Обязательные постановления в морском порту Калининград (утв. Приказом Минтранса РФ № 335 от 05.11.2013).

9. *Савельев В.* Научная школа лазерной навигации в МГАВТ: пример развития инновационных технологий / В. Савельев, С. Чибиряев // Речной транспорт (XXI век). — 2007. — № 2. — С. 63–64.

10. *Ермаков С. В.* Оценка безопасности излучения лазерных створных маяков / С. В. Ермаков // Безопасность жизнедеятельности. — 2015. — № 1 (180). — С. 15–21.

11. *Ермаков С. В.* Результаты мониторинга минимальной скорости судов при прохождении открытого прямолинейного участка Калининградского морского канала // Инновационная наука. — 2016. — № 8-2. — С. 38–40.

12. *Головченко Б. С.* Сбор данных о движении судов с сайта marinetraffic.com / Б. С. Головченко // Информационные технологии. Радиоэлектроника. Телекоммуникации. — 2013. — № 3. — С. 74–81.

13. *Головченко Б. С.* Информационная система сбора данных о движении судов на морской акватории / Б. С. Головченко, В. М. Гриняк // Вестник Государственного университета морского и речного флота имени адмирала С. О. Макарова. — 2014. — № 2 (24). — С. 156–162.

14. *Головченко Б. С.* Информационная система сбора данных трафика морской акватории / Б. С. Головченко, В. М. Гриняк // Научно-техническая информация. — Серия 2. Информационные процессы и системы. — 2014. — № 8. — С. 24–28.

15. *Гриняк В. М.* О планировании вычислительных экспериментов при исследовании методов обеспечения безопасности коллективного движения судов / В. М. Гриняк, А. С. Аникеева, Н. Ю. Васильченко, Е. Г. Гусев // Современные наукоемкие технологии. — 2016. — № 4-2. — С. 230–234.

REFERENCES

1. Korostelev, I. F. “Ships collisions and thei’s causes.” *Nauchnye trudy Dal’nevostochnogo gosudarstvennogo tehnicheskogo rybokhozyaistvennogo universiteta* 25 (2012): 69–74.

2. Andreev, Yu. G. “Methods of choice of permissible speed when piloting through the bridge span.” *Vestnik Gosudarstvennogo universiteta morskogo i rechnogo flota imeni admirala S.O. Makarova* 3 (2012): 171–175.

3. Bobrovskij, D.I. “O vybore bezopasnoj skorosti sudna pri vhozhdenii v povorot.” *Nauchnye problemy transporta Sibiri i Dal’nego Vostoka* 1 (2007): 77–79.

4. Konoplev, M. A. “Abstract from article “Fuzzy Logic in safe speed determination”.” *Jekspluatacija morskogo transporta* 3 (2008): 37–41.

5. Sedova, N. A., and V. A. Sedov. “Sistemy podderzhki prinjatija reshenij dlja opredelenija bezopasnoj skorosti sudna.” *Informacionnye tehnologii. Radiojelektronika. Telekommunikacii* 6-2 (2016): 204–210.

6. Sedova, Nelli Alekseevna, Vladimir Sergeevich Perechesov, and Viktor Alexandrovich Sedov. “Keeping the course of ship based on fuzzy logic with regard to vessel speed.” *Automation of Control Processes* 2(32) (2013): 74–79.

7. *Obshchie pravila plavaniya i stoyanki sudov v morskikh portakh Rossiyskoy Federatsii i na podkhodakh k nim* (utv. prikazom Mintransa RF №140 ot 20.08.2009, v red. prikaza Mintransa RF №69 ot 22.03.2010).

8. *Obyazatel’nye postanovleniya v morskom portu Kaliningrad* (utv. prikazom Mintran-sa RF №335 ot 05.11.2013).

9. Savel’ev, V. and S. Chibiryaev. “Nauchnaya shkola lazernoy navigatsii v MGAVT: primer razvitiya innovatsionnykh tekhnologiy.” *Rechnoy transport (XXI vek)* 2 (2007): 63–64.

10. Ermakov, S. V. “Safety Assessment of the Laser Leading Lights Radiation.” *Bezopasnost’ zhiznedeyatel’nosti* 12(180) (2015): 15–21.

11. Ermakov, S. V. “Rezul’taty monitoringa minimal’noy skorosti sudov pri prokhozhdenii otkrytogo pryamolineynogo uchastka Kaliningradskogo morskogo kanala.” *Innovatsionnaya nauka* 8-2 (2016): 38–40.

12. Golovchenko, B. S. “Sbor dannykh o dvizhenii sudov s sayta marinetraffic.com.” *Informatsionnye tekhnologii. Radioelektronika. Telekommunikatsii* 3 (2013): 74–81.

13. Golovchenko, B. S., and V. M. Grinyak. “Information System for Vessels Traffic Data Capture.” *Vestnik Gosudarstvennogo universiteta morskogo i rechnogo flota imeni admirala S.O. Makarova* 2(24) (2014): 156–162.

14. Golovchenko, B. S., and V. M. Grinyak. “Informatsionnaya sistema sbora dannykh trafika morskoy akvatorii.” *Nauchno-tekhnicheskaya informatsiya. Seriya 2: Informatsionnye protsessy i sistemy* 8 (2014): 24–28.

15. Grinyak, V. M., A. S. Anikeeva, N. Yu. Vasilchenko, and E. G. Gusev. “On numerical experiments for ship collision avoidance methods research.” *Modern high technologies* 4-2 (2016): 230-234.

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРЕ

Ермаков Сергей Владимирович —
старший преподаватель
Балтийская государственная академия
рыбопромыслового флота ФГБОУ ВО «КГТУ»
236035, Российская Федерация, Калининград,
ул. Молодежная, 6
e-mail: *esv.klgd@mail.ru*

INFORMATION ABOUT THE AUTHOR

Ermakov, Sergey V. —
Senior Lecturer
Baltic Fishing Fleet State Academy
FSBEI HE «KSTU»
6 Molodezhnaya Str., Kaliningrad, 236035,
Russian Federation
e-mail: *esv.klgd@mail.ru*

Статья поступила в редакцию 19 декабря 2016 г.
Received: December 19, 2016.

ВЕСТНИК
ГОСУДАРСТВЕННОГО УНИВЕРСИТЕТА
МОРСКОГО И РЕЧНОГО ФЛОТА ИМЕНИ АДМИРАЛА С. О. МАКАРОВА

DOI: 10.21821/2309-5180-2017-9-2-260-271

KINEMATIC MODEL OF VESSEL MOTION

V. V. Deryabin

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

Vessel's motion model is proposed. It is based on the use of random number generator's implementation to input signal forming, such as heading, longitudinal and transverse components of its speed over ground. On the basis of input data with numerical integration methods (Newton-Cotes formulas) vessel's geodetic latitude and longitude on geocentric ellipsoid are calculated. While input components vector forming, its range and maximum absolute value derivatives limits are taken into account. The possibility of sample time setting is also available. Each model start leads to new navigational situation generation with preset duration. Model can also operate with relative to water vessel's speed measurements, and let to imitate some special cases of its motion. The use of the model in 200000 case-situations with different number of abscissas in Newton-Cotes formulas do not let to conclude about any numerical solutions convergence with number of abscissas incrementing. In considered model situations maximum value of difference between trajectories is 417 m per four sailing time hours. Trajectories' maximum difference values for algorithms, using only even or only odd number of abscissas approximately 50 % less than for algorithms, one of which uses even and other odd number of abscissas. More wide input components' derivatives limits cause more significant differences between Newton-Cotes solutions with different number of abscissas. Proposed kinematic model may be used for new algorithms' testing, provided they involve vessel's kinematic parameters only.

Kewords: vessel's motion, kinematics, modeling, numerical integration, Newton-Cotes formulas.

For citation:
Deryabin, Victor V. "Kinematic model of vessel motion." *Vestnik Gosudarstvennogo universiteta morskogo i rechnogo flota imeni admirala S.O. Makarova* 9.2 (2017): 260–271. DOI: 10.21821/2309-5180-2017-9-2-260-271.

УДК. 656.61.052:527.61

КИНЕМАТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ ДВИЖЕНИЯ СУДНА

В. В. Дерябин

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

Предложена модель движения судна, основанная на использовании датчиков случайных чисел при формировании компонент входного сигнала: курса, продольной и поперечной составляющих абсолютной скорости. На основе входных данных численным интегрированием (формулы Ньютона–Котеса) получаются геодезические широта и долгота судна на поверхности общеземного эллипсоида. При формировании компонент входного вектора учитываются диапазоны их возможных значений, а также предельные по модулю скорости их изменений. Имеется также возможность задания дискретности модели по времени. Каждый запуск модели приводит к генерации новой навигационной ситуации заданной продолжительности. Модель может работать и в случае измерений относительной скорости судна, а также она позволяет имитировать некоторые частные случаи его движения. Работа модели в 200000 случаев модельных ситуаций с различным числом узлов, используемых в формулах Ньютона–Котеса, не позволяет сделать вывод о сходимости численного решения по мере возрастания их количества. Максимальное за четыре часа плавания различие траекторий составило при этом 417 м в рассмотренных модельных ситуациях. Наибольшие различия траекторий для алгоритмов, использующих только чётное или только нечётное число узлов, примерно на 50 % меньше, чем для алгоритмов, один из которых использует нечётное, а другой чётное количество узлов. Более широкие допустимые пределы производных компонент входного сигнала приводят к более заметным различиям решений на основе формул Ньютона–Котеса

с разным числом узлов. Предложенная кинематическая модель может быть использована для тестирования новых алгоритмов, в которых оказываются задействованными лишь кинематические параметры движения судна.

Ключевые слова: движение судна, кинематика, моделирование, численное интегрирование, формулы Ньютона–Котеса.

Для цитирования:

Дерябин В. В. Кинематическая модель движения судна / В. В. Дерябин // Вестник Государственного университета морского и речного флота имени адмирала С. О. Макарова. — 2017. — Т. 9. — № 2. — С. 260–271. DOI: 10.21821/2309-5180-2017-9-2-260-271.

Введение

При решении ряда прикладных задач навигации и управления движением судна нередко приходится обращаться к использованию той или иной математической модели его движения. К таким задачам относятся, например, синтез оптимального закона стабилизации судна на курсе или траектории, разработка алгоритма фильтрации его скорости или координат, построение имитационной модели движения судна при входе / выходе из порта и др. Использование математической модели позволяет проверить работоспособность создаваемых алгоритмов на стадии их разработки перед проведением натурных экспериментов. Основная проблема использования математических моделей состоит в их адекватности, степени близости моделируемого движения к реальному, которая зависит от вида конкретной модели, а также положенных в её основу теоретических и практических знаний.

Все математические модели движения судна можно условно разделить на две группы. Первую группу составляют «динамические» модели, в которых используются зависимости, учитывающие силовые (причинные) воздействия на судно в заданных условиях плавания [1]. Ко второй группе относятся «кинематические» модели, в основе которых лежат соотношения, связывающие между собой только кинематические параметры судна (ускорение,скорость, координаты).Примером такой модели являются соотношения, по которым осуществляется переход от измеренных значений курса и абсолютной скорости судна к его географическим координатам.

Динамические и кинематические модели судна могут использоваться для проверки адекватности новых алгоритмов моделирования его движения [2] – [4]. Использование динамических моделей для тестирования сопряжено с трудностями следующего характера. Во-первых, существует проблема адекватности самой модели. Методики, используемые для вычисления воздействующих на судно отдельных сил, имеют конечную точность, которая не может быть гарантирована для всех условий плавания. В этом заключается структурная неадекватность. Более того, физические параметры конкретного судна, его движительно-рулевого комплекса известны также неточно. В этом состоит параметрическая неадекватность. Во-вторых, выполнить проверку для всех существующих судов, параметры которых используются в динамических моделях, также практически невозможно.

Кинематическая модель может быть использована для проверки адекватности новых алгоритмов, в которых задействованными оказываются только кинематические параметры судна. При таком подходе снимается вопрос о «динамической» адекватности модели движения судна, важной составляющей которого является проблема выбора методики расчёта конкретных сил, действующих на корпус судна в заданных условиях плавания. Остаётся вопрос о «кинематической» адекватности, попытки решения которого изложены в настоящей статье.

Описание рассматриваемых задач

Уравнения движения судна. Рассмотрим уравнения счисления пути на поверхности общеземного эллипсоида [5]:

$$\begin{aligned}\frac{d\varphi}{dt} &= \frac{V_{x1}\cos K - V_{y1}\sin K}{M};\\ \frac{d\lambda}{dt} &= \frac{V_{x1}\sin K + V_{y1}\cos K}{N\cos\varphi},\end{aligned} \tag{1}$$

где φ, λ — соответственно геодезические широта и долгота центра тяжести судна; V_{x1} и V_{y1} — продольная и поперечная составляющая абсолютной скорости судна соответственно; K — его истинный курс; M — радиус кривизны меридианного эллипса в точке, где расположен центр тяжести судна; N — радиус кривизны первого вертикала в той же точке. (Предполагается, что углы крена и дифферента судна в процессе плавания равны нулю).

Главные радиусы кривизны зависят от широты φ и определяются следующим образом:

$$M = \frac{a(1-e^2)}{\sqrt{(1-e^2\sin^2\varphi)^3}};\quad N = \frac{a}{\sqrt{1-e^2\sin^2\varphi}},$$

где a — большая полуось эллипсоида; e —эксцентриситет меридианного эллипса.

Введём обозначения: $V_N = V_{x1}\cos K - V_{y1}\sin K$; $V_E = V_{x1}\sin K + V_{y1}\cos K$, где V_N, V_E — соответственно северная и восточная составляющие абсолютной скорости судна на эллипсоиде.

Интегрированием соотношений (1) при начальных условиях $\varphi_0 = \varphi(0)$, $\lambda_0 = \lambda(0)$ получим следующие выражения:

$$\begin{aligned}\varphi(t) &= \varphi_0 + \int_0^t \frac{V_N(t)}{M(\varphi)}dt;\\ \lambda(t) &= \lambda_0 + \int_0^t \frac{V_E(t)}{N(\varphi)\cos\varphi}dt.\end{aligned} \tag{2}$$

Данные соотношения позволяют перейти от измеренных значений курса и скорости к координатам судна в любой момент времени t. Они будут применимы и для случая, когда вместо составляющих абсолютной скорости известны её относительные аналоги, и расчёт координат выполняется относительно водной массы. Поведение судна в соответствии с моделью (2) может быть также описано в терминах «вход – выход»:

$$Y = F_m(X), \tag{3}$$

где $X = (K, V_{x1}, V_{y1})^T$ — входной сигнал; $Y = (\varphi, \lambda)^T$ — выходной сигнал; F_m — преобразование, выполняемое моделью.

Непосредственное использование соотношений (2) и (3) предполагает, что подынтегральные выражения в (2) известны как аналитические функции времени, но в действительности известны лишь их временные последовательности, полученные на основе дискретных значений курса и скорости судна. При этом преобразование F_m заменяется преобразованием $\tilde{F}_m$, которое обязательно включает тот или иной метод численного интегрирования.

Кинематическая модель. Намечается следующая схема построения кинематической модели. Задаётся дискретность модели Δt и кратное ей общее время плавания T. В блоке входа формируются псевдослучайная последовательность входного вектора $X(0)$, $X(1)$, ..., $X(l)$, где $l = (T / \Delta t)$.

Рассмотрим работу входного блока более подробно. Задаются границы области возможных значений каждой компоненты вектора X. Пусть $V_{x\min}$, $V_{y\min}$, $K_{\min}$ — нижние (левые), а $V_{x\max}$, $V_{y\max}$, $K_{\max}$ — верхние (правые) границы указанных диапазонов. В начальный момент времени на основе датчика случайных чисел равномерного распределения определяется псевдослучайное число из промежутка возможных значений компоненты, которое и принимается как значение компоненты в текущий момент времени. В последующий момент времени вновь работает датчик и определяется соответствующее значение компоненты с учётом максимально допустимой скорости её изменения.

Максимально допустимые по модулю значения производных: $\max|\dot{V}_x|$, $\max|\dot{V}_y|$, $\max|\dot{K}|$, задаются перед работой модели. Например, если $V_x(i)$ — значение компоненты в текущий момент времени, то в следующий момент она может принимать значение из промежутка $V_x(i)-\Delta t\cdot\max|\dot{V}_x|\le V_x(i+1)\le V_x(i)+\Delta t\cdot\max|\dot{V}_x|$, находясь при этом в заданных общих пределах $V_{x\min}\le V_x(i+1)\le V_{x\max}$. Процедура выполняется для всех моментов времени плавания. Аналогично формируются псевдослучайные временные выборки других двух компонент.

Если ограничения по производным установить нулевыми, то получается кинематическая модель постоянного в течение всего периода плавания входного сигнала. Другой важный частный случай, который может быть реализован моделью, — это удержание судна на заданном курсе $\bar{K}=K(0)$ с ошибкой регулирования $\pm\varepsilon_K$. В таком случае во все моменты времени, отличные от начального, значение курса выбирается по закону равномерного распределения из промежутка $K(0)-\varepsilon_K\le K(i)\le K(0)+\varepsilon_K$. При этом также необходимо учитывать конечность угловой скорости поворота судна.

Знаменатель подынтегрального выражения второго уравнения в соотношениях (2) обращается в нуль на полюсах. Поэтому перед началом работы модели необходимо также задать границы возможных значений начальной широты $\varphi_{\min}$, $\varphi_{\max}$, руководствуясь наибольшей величиной модуля скорости судна на промежутке времени плавания T:

$$\begin{aligned}\varphi_{\max}&=90^\circ-\frac{T}{a(1-e^2)}\sqrt{\left(\max(|V_{x\min}|,V_{x\max})\right)^2+\left(\max(|V_{y\min}|,V_{y\max})\right)^2}-\Delta\bar{\varphi};\\ \varphi_{\min}&=-\varphi_{\max},\end{aligned}\qquad(4)$$

где $\Delta\bar{\varphi}$ — гарантированный модуль разности широт между точкой траектории судна и полюсом эллипсоида (запас широты).

Затем входные последовательности подаются в блок численного интегрирования, реализующий соотношения (2) на конкретном эллипсоиде (с параметрами a, e). На выходе блока интегрирования получаются временные последовательности геодезических координат судна $\varphi(t)$, $\lambda(t)$. Общая схема кинематической модели судна представлена на рис. 1.



Рис. 1. Схема кинематической модели судна

Таким образом, параметры кинематической модели движения судна следующие:

– дискретность модели Δt;

– общее время плавания T, кратное Δt;

– параметры эллипсоида (a, e^2);

– границы промежутков возможных значений курса и составляющих (продольной и поперечной) абсолютной скорости: $V_{x\min}, V_{y\min}, K_{\min}, V_{x\max}, V_{y\max}, K_{\max}$;

– максимально допустимые модули производных: $\max|\dot{V}_x|, \max|\dot{V}_y|, \max|\dot{K}|$;

– запас широты $\Delta\overline{\varphi}$.

Блок-схема алгоритма кинематической модели приведена на рис. 2.

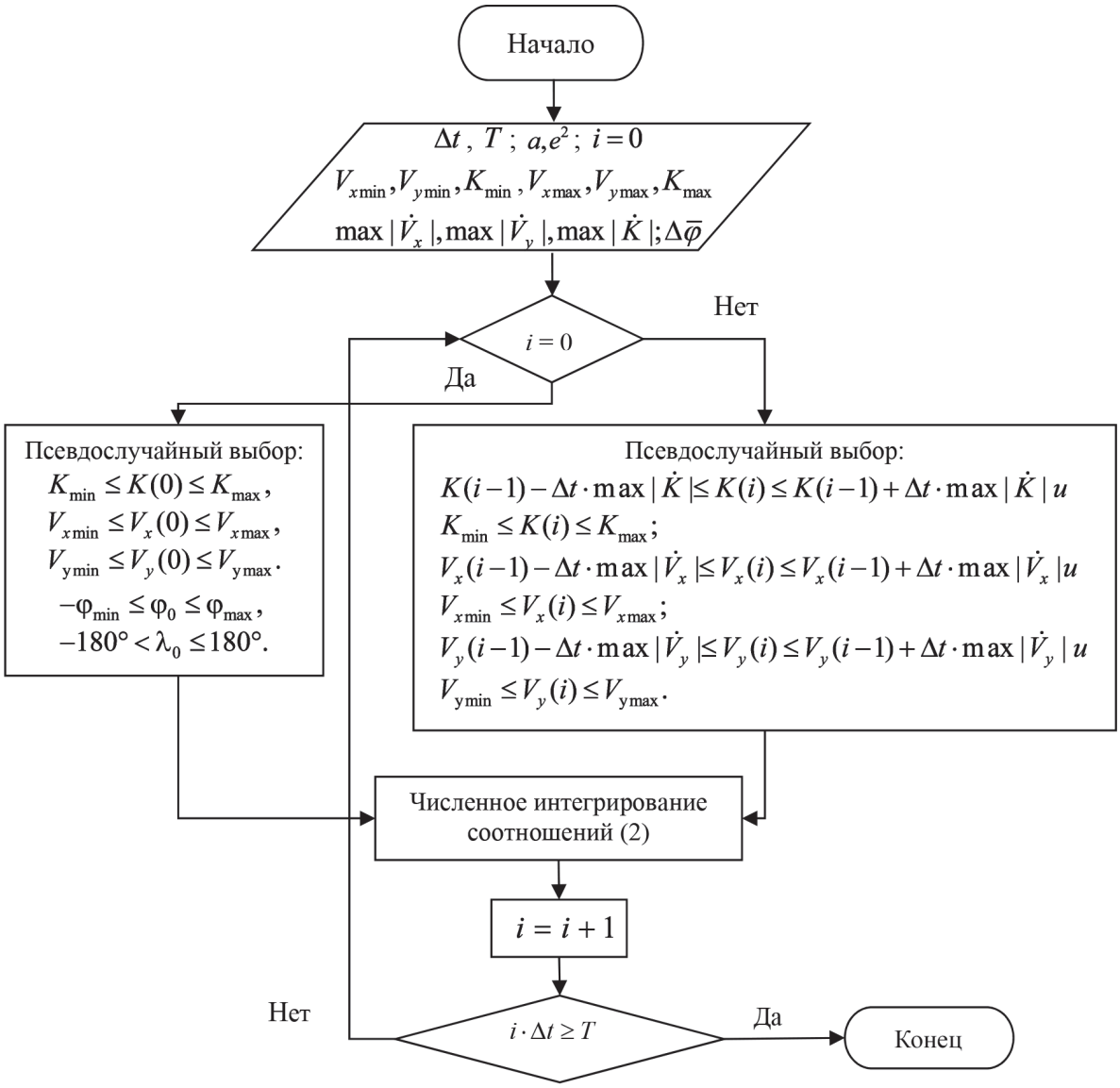


Рис. 2. Блок-схема алгоритма кинематической модели

Важную роль в кинематической модели играет алгоритм численного интегрирования, на основе которого определяются координаты в соответствии с соотношениями (2). Рассмотрим этот вопрос более подробно.

Выбор алгоритма численного интегрирования. Значения подынтегральных функций в (2) могут быть получены лишь в отдельные моменты времени, разделённые дискретностью Δt. Типичным значением Δt для судовых навигационных систем является 1 с. Таким образом, задача численного интегрирования должна решаться с учётом того, что выбрать узлы квадратурной формулы не представляется возможным. Для решения задач численного интегрирования на равномерной оси узлов хорошо подходят квадратурные формулы Ньютона–Котеса [6] – [8]. На каждом участке интегрирования используются несколько последовательных значений подынтегральной

функции $f_0, f_1, \ldots, f_j, \ldots f_n$ в моменты времени $t_0, t_1, \ldots, t_j, \ldots t_n$, т. е. задействуются $m = n - 1$ отрезков, имеющих длину шага Δt.

Для оценки погрешности численного интегрирования на основе формул Ньютона–Котеса необходимо знать наибольшее значение, которое принимает производная (вторая или выше) подынтегральной функции на участке интегрирования $\Delta t \cdot m$.

Для формулы трапеций (при $n = 2$) выражение остаточного члена R_n имеет следующий вид [9]: $R_2 = -\frac{1}{12}\Delta t^3 f''(\xi),\ t_j < \xi < t_j + \Delta t$. Выражение для наибольшей методической погрешности E_n для участка интегрирования Δt имеет вид $E_2 = \max_{\Delta t}\left|f''(t)\right| \cdot \frac{\Delta t^3}{12}$, и для её определения необходимо знать вторую производную подынтегральной функции $f''(t)$. Запишем вторую производную подынтегральной функции по времени для первого уравнения системы (2):

$$f''(t) = [V_N / M]'' = \frac{MM^2V_N'' - M^2M''V_N - 2M^2M'V_N' + 2M(M')^2V_N}{M^4}. \quad (5)$$

Для подынтегральной функции второго уравнения соотношений (2) аналогичное выражение получается путём замены $V_N := V_E;\ M := N\cos\varphi$.

Выражение (5) представляет собой комбинацию элементарных арифметических операций, поэтому, если известны границы областей неопределённости отдельных величин V_N, V_N', V_N'', M', M'', то можно определить границы области неопределённости величины $f''(t) = [V_N / M]''$ [10], а затем, получив оценку её модуля, рассчитать наибольшее значение модуля методической погрешности E_2 на участке интегрирования Δt. Общая методическая погрешностьопределяется как сумма погрешностей всех участков.

Сделаем ряд замечаний. Во-первых, предельные значения производных скорости V_N', V_N'' могут быть получены лишь на основе численного дифференцирования, т. е. приближённо. Более того, для квадратурных формул более высокого порядка требуется знание производных V_N''' и выше, значения которых определяются двукратным и более численным дифференцированием, что значительно снижает точность. Во-вторых, общая оценка методической погрешности может получиться слишком завышенной, так как на каждом участке интегрирования предполагается самый худший случай, когда производная имеет наибольшее по модулю значение. Тем более очевидно, что в реальных условиях плавания данное предположение, как правило, не выполняется. Указанные соображения затрудняют оценку методической погрешности численного интегрирования способов Ньютона–Котеса на основе остаточных членов квадратурных формул.

Для определения приемлемого метода численного интегрирования поступим следующим образом. Будем рассматривать квадратурные формулы от метода трапеций, когда $n = 2$, до метода, когда $n = 7$ (табл. 1).

Таблица 1

Алгоритмы численного интегрирования Ньютона–Котеса

Название метода	Количество узлов интегрирования n	Количество отрезков интегрирования m	Квадратурная (расчётная) формула для участка интегрирования длиной $\Delta t \cdot m$
Метод трапеций	2	1	$\frac{\Delta t}{2}(f_0 + f_1)$
Метод Симпсона 1/3	3	2	$\frac{\Delta t}{3}(f_0 + 4f_1 + f_2)$
Метод Симпсона 3/8	4	3	$\frac{3\Delta t}{8}(f_0 + 3f_1 + 3f_2 + f_3)$

Таблица 1
(*Окончание*)

Метод Буля	5	4	$\frac{2\Delta t}{45}\left(7f_0+32f_1+12f_2+32f_3+7f_4\right)$
Ньютона–Котеса (6 уз)	6	5	$\frac{5\Delta t}{288}\left(19f_0+75f_1+50f_2+50f_3+75f_4+19f_5\right)$
Ньютона–Котеса (7 уз)	7	6	$\frac{\Delta t}{140}\left(41f_0+216f_1+27f_2+272f_3+27f_4+216f_5+41f_6\right)$

Запустим кинематическую модель 100000 раз, используя каждый из алгоритмов, приведённых в табл. 1. Параметры кинематической модели выберем следующие:

– дискретность модели $\Delta t = 1$с ;

– общее время плавания $T = 4 \cdot 3600$с (кратно Δt);

– параметры эллипсоида WGS-84 (a = 6378137 м; $e^2 = 2\alpha - \alpha^2 = 2(1/298{,}257223563) -$ $- (1/298{,}257223563)^2 \approx 0{,}00669437999$;

– границы промежутков возможных значений курса и составляющих скорости $V_{x\min} = 0$; $V_{y\min} = -5$ уз; $K_{\min} = 0$; $V_{x\max} = 30$ уз; $V_{y\max} = 5$ уз; $K_{\max} = 360°$;

– максимально допустимые модули производных $\max|\dot{V}_x| = 0{,}09$ м/с^2; $\max|\dot{V}_y| = 0{,}01$ м/с^2; $\max|\dot{K}| = 12°/\text{с}$ (ограничения по производным для компонент скорости устанавливаются исходя из предположения о том, что время от нулевых до их наибольших значений составляет не более 3 мин, ограничения производной по курсу — поворот на 360° может быть выполнен в течение 30 с);

– запас широты $\Delta\overline{\varphi} = 30'$.

Различие траекторий, полученных с использованием двух различных алгоритмов, характеризуется в каждой модельной ситуации максимумом модуля невязки на промежутке времени плавания T. Обозначим данную величину символом $c_{\max}$. В качестве невязки на текущий момент плавания t используется расстояние между двумя соответствующими точками траекторий, вычисленное в прямоугольной геоцентрической системе координат. Для перехода от геодезических координат к прямоугольным пространственным координатам x, y, z используются стандартные соотношения [11]:

$$x = N\cos\varphi\cos\lambda;$$
$$y = N\cos\varphi\sin\lambda;$$
$$z = \left(1-e^2\right)N\sin\varphi.$$

Моделирование выполнялось в программной оболочке MATLAB R2015b.

Результаты эксперимента приведены в табл. 2, представляющей собой диагональную матрицу с нулевыми элементами по главной диагонали (симметричные элементы показаны один раз). Каждый элемент матрицы есть наибольший максимум модуля невязки траекторий (в метрах), полученных при помощи различных алгоритмов. Например, на пересечении строки «Метод Буля» со столбцом «Метод Симпсона 3/8» стоит число 176,9, которое означает, что в 100000 четырёхчасовых модельных ситуаций наибольшее взаимное отклонение траекторий, полученных с использованием данных алгоритмов, за четыре часа составило 176,9 м. В ходе эксперимента широта судна находилась в пределах от –87,7657° до +87,7348°.

Таблица 2

**Работа кинематической модели в режиме «тихой воды»
(100000 ситуаций — четырёхчасовых плаваний)**

Название метода интегрирования	Метод трапеций	Метод Симпсона 1/3	Метод Симпсона 3/8	Метод Буля	Ньютона–Котеса (6 уз)	Ньютона–Котеса (7 уз)
Метод трапеций	0 м	–	–	–	–	–
Метод Симпсона 1/3	113,3	0	–	–	–	–
Метод Симпсона 3/8	**69,1**	144,6	0	–	–	–
Метод Буля	144,7	**34**	176,9	0	–	–
Ньютона–Котеса (6 уз)	**94,7**	149	**117,8**	180,7	0	–
Ньютона–Котеса (7 уз)	262	**150,8**	295,4	**122,9**	285,3	0

Соображения, по которым устанавливались ограничения для производных компонент входного сигнала, более соответствуют ситуации плавания судна на тихой воде. В условиях волнения, вызывающего качку судна, пределы ускорений могут значительно расшириться. Для их оценки будем использовать методику, приведённую в Правилах Российского морского регистра судоходства [12], в соответствии с которой расчётные значения ускорений центра тяжести судна в условиях качки определяются таким образом:

$$\begin{aligned} \bar{a}_x &= 0{,}1(100/L)^{1/3} g\varphi_r; \\ \bar{a}_y &= 0{,}2(100/L)^{1/3} g\varphi_r, \end{aligned} \qquad (6)$$

где $\bar{a}_x, \bar{a}_y$ — соответственно продольная и поперечная составляющие ускорения центра тяжести судна, вычисленные при нулевых углах дифферента и крена; L — длина судна; $g = 9{,}81$ м/с^2 — ускорение свободного падения; φ_r — коэффициент, равный единице для судов неограниченного района плавания. Для судна длиной 60 м расчёты по формулам (6) дают следующие оценки границ возможных значений ускорений: $\max|\dot{V}_x| = 1{,}16$ м/с^2; $\max|\dot{V}_y| = 2{,}33$ м/с^2.

Исходя из предположения о гармоническом характере изменения курса судна на качке, запишем:

$\Delta K = A_\psi \sin\left(\frac{2\pi}{\tau_\psi} t\right)$, где ΔK — колебания курса около среднего положения; A_ψ — амплитуда и τ_ψ — период рыскания судна на волнении. Взяв производную по времени, получаем соотношение $\Delta\dot{K} = 2\pi\frac{A_\psi}{\tau_\psi}\cos\left(\frac{2\pi}{\tau_\psi} t\right)$, из которого следует, что наибольшее по модулю значение производной есть выражение $2\pi\frac{A_\psi}{\tau_\psi}$. Приняв $A_\psi = 30°$, $\tau_\psi = 10$ с, получаем ограничение по производной курса:

$$\max|\dot{K}| = 2\pi\frac{A_\psi}{\tau_\psi} = 2\pi\frac{30°}{10\ \text{с}} \approx 19°/\text{с}.$$

Повторим описанный выше эксперимент с новыми параметрами: $\max|\dot{V}_x| = 1{,}16$ м/с^2; $\max|\dot{V}_y| = 2{,}33$ м/с^2; $\max|\dot{K}| = 19°$/с. Результаты представлены в табл. 3. В ходе эксперимента широта судна находилась в пределах от –87,5738° до +87,601°.

Таблица 3

Работа кинематической модели в режиме «качки»
(100000 ситуаций — четырёхчасовых плаваний)

Название метода интегрирования	Метод трапеций	Метод Симпсона 1/3	Метод Симпсона 3/8	Метод Буля	Ньютона–Котеса (6 уз)	Ньютона–Котеса (7 уз)
Метод трапеций	0 м	–	–	–	–	–
Метод Симпсона 1/3	173,3	0	–	–	–	–
Метод Симпсона 3/8	**98,7**	198,1	0	–	–	–
Метод Буля	224,2	**51**	239,8	0	–	–
Ньютона–Котеса (6 уз)	**148,3**	227,8	**182,3**	277	0	–
Ньютона–Котеса (7 уз)	364,2	**205,1**	403,2	**173,3**	417	0

Выводы

По результатам проведённых экспериментов можно сделать следующие выводы.

1. Видно, что с увеличением производных компонент входного сигнала увеличивается взаимное различие траекторий, полученных при помощи различных алгоритмов численного интегрирования. Так, в условиях «тихой воды» максимальное отличие траекторий (наибольшее значение $c_{\max}$) составляет 295,4 м, а для условий, которые могут наблюдаться при качке, аналогичная величина составляет уже 417 м. Более того, каждый элемент табл. 3 больше соответствующего элемента табл. 2. Подобное положение дел согласуется с представлениями, согласно которым фактический характер изменения подынтегральной функции на интервале интегрирования влияет на методическую погрешность используемого численного метода. Чем быстрее может меняться подынтегральная функция, тем больше может быть отклонение от предполагаемой полиномиальной зависимости.

2. За четыре часа плавания 417 м — величина хоть и не большая, но всё-таки заметная, не пренебрежимо малая. Поэтому исследование алгоритмов численного интегрирования кинематических параметров движения судна — это актуальная научно-техническая проблема судовождения.

3. Оказалось, что сходимости к какому-то единому решению не наблюдается: взаимные отличия между алгоритмами по мере увеличения числа узлов n не уменьшаются. Например, взаимные отличия метода трапеций от метода Симпсона 1/3 (см. табл. 2) составляют 113,3 м, а методов Ньютона–Котеса с шестью-семью узлами — 285,3 м. Хотя, на первый взгляд, вполне закономерной представляется ситуация, когда последовательное увеличение узлов интегрирования обеспечивает сходимость к какому-то одному решению, принимаемому в качестве истинного.

4. Более того, выяснилось, что отличия результатов интегрирования внутри только чётных и только нечётных алгоритмов (показаны в табл. 2 и 3 полужирным шрифтом) меньше, чем отличия между чётными и нечётными алгоритмами (обычный шрифт). При этом под чётным алгоритмом понимается метод численного интегрирования с чётным количеством узлов, т. е. $n = 2, 4, 6$. Нечётный алгоритм — метод интегрирования с нечётным числом узлов, т. е. $n = 3, 5, 7$.Так, для режима «тихой воды» указанное отличие составляет $100\cdot(295{,}4–150{,}8) / 295{,}4 \approx 49$ % от наибольшего значения (между чётными и нечётными методами). Для режима «качки» аналогичная величина приближенно равна 51 %. Создаётся впечатление, что чётные и нечётные алгоритмы численного интегрирования как бы группируются около некоторых своих общих решений, различных для чётного и нечётного числа узлов. Возможно, подобное положение дел как-то связано с тем, что квадратурные формулы с нечётным числом узлов имеют преимущества по сравнению с формулами с чётным числом узлов в плане точности [6].

5. В плане отсутствия сходимости методов Ньютона–Котеса можно предположить, что с увеличением числа узлов интегрирования сходимость гарантированно наблюдается в случаях, когда вид подынтегральной функции описывается точным аналитическим выражением, но сам интеграл точного решения не имеет. Подобная ситуация не характерна для плавания судна, так как в распоряжении имеются лишь временные последовательности значений подынтегральных функций, разделённых фиксированной дискретностью. В связи с этим особый интерес представляет сравнение методов Ньютона–Котеса в точных навигационных ситуациях, когда кинематические уравнения движения центра тяжести представляют собой аналитические функции времени.

6. Интересно также отметить, что среди нечётных алгоритмов интегрирования наименьшие взаимные отличия наблюдаются для методов Буля и Симпсона 1/3,среди чётных — для методов Симпсона 3/8 и трапеций. Минимальные отличия для пар чётных и нечётных алгоритмов зафиксированы для методов Симпсона 1/3 и трапеций. Указанные соотношения выдерживаются в обоих экспериментах. Кроме того, отличия от алгоритма, имеющего наименьшее число узлов (указан в названии столбцов табл. 2 и 3) по мере их увеличения (номера строк табл. 2 и 3) увеличиваются. Это справедливо как для однородных алгоритмов (оба либо чётные, либо нечётные в паре), так и для разнородных (один чётный, другой нечётный в паре). Закономерность можно проследить по первым трём столбцам табл. 2 и 3.

Предложена кинематическая модель движения судна, в которой на основе значений истинного курса судна и составляющих его абсолютной скорости определяются геодезические координаты центра тяжести судна на поверхности общеземного эллипсоида. Составляющие входного сигнала выбираются в каждый момент времени при помощи генераторов случайных чисел равномерного распределения из диапазонов их возможных значений с учётом ограничений по производным. На основе данных псевдослучайных временных выборок путём численного интегрирования определяются координаты судна. Структура модели допускает также её использование в случае измерений скорости относительно воды. Кроме того, параметры модели могут быть заданы так, чтобы обеспечить частные случаи движения судна (постоянным курсом и скоростью, удержание на заданном курсе). Каждый запуск модели приводит к генерации новой навигационной ситуации, заданной на конкретном отрезке времени плавания.

Рассмотренная кинематическая модель движения судна основана на принципе, согласно которому увеличение количества её запусков приводит к увеличению вероятности рассмотрения ситуации, которая может наблюдаться в реальности. Действительно, датчики случайных чисел могут сработать так, что реализации входных сигналов будут близки к тем, которые можно будет наблюдать при фактическом плавании судна. Данное свойство может быть использовано при тестировании новых алгоритмов. Следует отметить, что не последнюю роль при построении модели играет выбор алгоритма численного интегрирования. Как показали проведённые эксперименты, последовательное увеличение узлов интегрирования в формулах Ньютона–Котеса не приводит к сходимости данных алгоритмов к конкретному решению, что связано со спецификой численного интегрирования параметров движения в судовых условиях, когда вид подынтегральной функции не известен. В связи с этим вопрос выбора алгоритма численного интегрирования требует дальнейших исследований. Его решение может быть основано на использовании точных навигационных ситуаций, когда параметры движения судна связаны между собой аналитическими соотношениями. Другой важный вопрос, на который следует искать ответы, заключается в том, как определить достаточное количество модельных ситуаций, которые должны быть рассмотрены. Ведь очевидно, что при увеличении числа моделируемых ситуаций увеличивается вероятность того, что начнут появляться «похожие», практически эквивалентные уже рассмотренным ранее навигационные ситуации. Также актуальным является исследование работы применяемых в модели алгоритмов численного интегрирования в условиях погрешностей измерений курса и составляющих скорости судна.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Дмитриев С. П.* Задачи навигации и управления при стабилизации судна на траектории: научное издание / С. П. Дмитриев, А. Е. Пелевин. — СПб.: ГНЦ РФ ЦНИИ «Электроприбор», 2004. — 158 с.

2. *Дерябин В. В.*Нейросетевой метод прогноза счислимых координат места судна / В. В. Дерябин // Транспортное дело России. — 2014. — № 6.— С. 92–96.

3. *Дерябин В. В.* Прогноз счислимых координат судна на основе нейронных сетей / В. В. Дерябин // Транспортное дело России. — 2015. — № 4. — С. 159–165.

4. *Дерябин В. В.* Системы счисления пути судна на основе нейронных сетей / В. В. Дерябин // Транспортное дело России. — 2015. — № 5. — С. 137–142.

5. *Дмитриев С. П.* Высокоточная морская навигация / С. П. Дмитриев. — СПб.: Судостроение, 1991. — 222 с.

6. *Kythe P. K.* Handbook of computational methods for integration / P. K. Kythe, M. R. Schäferkotter. — Boca Raton: Chapman & Hall/CRC, 2005. — 598 p.

7. *Masjed-Jamei M.* Unified error bounds for all Newton–Cotes quadrature rules / M Masjed-Jamei // Journal of Numerical Mathematics. — 2015. — Vol. 23. — Is. 1. — Pp. 67–80. DOI:10.1515/jnma-2015-0006.

8. *Graca M. M.* A Simple Derivation of Newton-Cotes Formulas with Realistic Errors / M. M. Graca // Journal of Mathematics Research. — 2012. — Vol. 4. — No 5. — Pp. 34–48. DOI:10.5539/jmr.v4n5p34.

9. *Korn A. G.* Mathematical handbook for scientists and engineers: definitions, theorems, and formulas for reference and review / G. A. Korn, T. M. Korn. — N.Y.: Dover Publications, Inc., 2000. — 1130 p.

10. *Дерябин В. В.* Оценка точности решения системы двух линейных уравнений с двумя неизвестными / В. В. Дерябин // Эксплуатация морского транспорта. — 2010. — № 3. — С. 26–29.

11. ГОСТ 32453-2013. Глобальная навигационная спутниковая система. Системы координат. Методы преобразований координат определяемых точек: межгос. стандарт. — Введ. 01.07.2014. — М.: Стандартинформ, 2014. — 15 с.

12. Правила классификации и постройки морских судов. — СПб.: Российский морской регистр судоходства, 2015. — Т. 1. — 505 с.

REFERENCES

1. Dmitriev, S. P., and A. E. Pelevin. *Zadachi navigatsii i upravleniya pri stabilizatsii sudna na traektorii: nauchnoe izdanie*. SPb.: GNTs RF TsNII «Elektropri-bor», 2004.

2. Deryabin, V. V. “Neural network method of vessel’s dead reckoning position prediction.” *Transport business in Russia* 6 (2014): 92–96.

3. Deryabin, V. V. “Vessel’s dead reckoning track prediction on basis of neural networks.” *Transport business in Russia* 4 (2015): 159–165.

4. Deryabin, V. V. “Vessel’s dead reckoning systems on basis of neural networks.” *TransportbusinessinRussia* 5 (2015): 137–142.

5. Dmitriev, S. P. *Vysokotochnaya morskaya navigatsiya*. SPb.: Sudostroenie, 1991.

6. Kythe, Prem K., and Michael R. Schäferkotter. *Handbook of computational methods for integration*. Boca Raton: Chapman & Hall/CRC, 2005.

7. Masjed-Jamei, Mohammad. “Unified error bounds for all Newton–Cotes quadrature rules.” *Journal of Numerical Mathematics* 23.1 (2015): 67–80. DOI: 10.1515/jnma-2015-0006.

8. Graça, Mário M. “A Simple Derivation of Newton-Cotes Formulas with Realistic Errors.” *Journal of Mathematics Research* 4.5 (2012): 34–48. DOI:10.5539/jmr.v4n5p34.

9. Korn, Granino Arthur, and Theresa M. Korn. *Mathematical handbook for scientists and engineers: Definitions, theorems, and formulas for reference and review.* N.Y.: Dover Publications, Inc., 2000.

10. Deryabin, V. V. “Estimated accuracy of solution of two linear equations system with two unknown variables.” *Jekspluatacija morskogo transporta* 3 (2010): 26–29.

11. Russian Federation. State Standart GOST 32453-2013. Global navigation satellite system. Coordinate systems. Methods of transformations for coordinates of determinated points. M.: Standartinform, 2014.

12. *Pravila klassifikatsii i postroiki morskikh sudov.* SPb.: Rossiiskii morskoi registr sudokhodstva, 2015. Vol. 1.

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРЕ

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

INFORMATION ABOUT THE AUTHOR

Deryabin, Victor V. —
PhD
Admiral Makarov State University
of Maritime and Inland Shipping
5/7 Dvinskaya Str., St. Petersburg 198035,
Russian Federation
e-mail: *gmavitder@mail.ru*, *kaf _nav@gumrf.ru*

Статья поступила в редакцию 7 февраля 2017 г.
Received: February 7, 2017.

ВЕСТНИК
ГОСУДАРСТВЕННОГО УНИВЕРСИТЕТА
МОРСКОГО И РЕЧНОГО ФЛОТА ИМЕНИ АДМИРАЛА С. О. МАКАРОВА

DOI: 10.21821/2309-5180-2017-9-2-272-279

INFLUENCE OF FATIGUE SKIPPER ON ENSURING SECURITY OF NAVIGATION

V. V. Karetnikov, S. V. Kozik, I. A. Sokolova

Admiral Makarov State University of Maritime and Inland Shipping,
Saint-Petersburg, Russian Federation

The article deals with the psychological state of a person. Particular attention is given to states emerging in the labor market. The proposed methods allow to assess the dynamics of fatigue on the changes in the parameters of one of the fields of physical person. Specific examples demonstrate the principle organization applied research, prevention and correction techniques of adverse states. The article covers the area of expertise as engineering psychology, psychology, physiology and health, ergonomics, medicine transport. Applied orientation of functional states research focuses primarily on the search for adequate methods using estimation and prediction of their development. Now in diagnostic practice, preference is given to the physiological and psychophysiological methods. In the transition to a new method analysis it is necessary to develop diagnostics concepts in accordance with the features of this range of phenomena. Aware of the work, of the solution of the problem and not claiming it analysis, we have tried to consider a number of issues concerning the development of a common approach to the study of functional states and the creation of adequate procedures. The article summarizes the results of studies on the development of technologies aimed at improving the health and disease prevention in their professional activities skipper. Characterized in detail the basic methods of monitoring the human condition, the specific techniques and procedures. Emphasis is placed on the development of state monitoring methods navigator, bearing a running watch, are examples of modern methods of assessing the human condition.

Keywords: safety of navigation, fatigue, functional status, gas discharge visualization technique.

For citation:
Karetnikov, Vladimir V., Sergei V. Kozik, and Irina A. Sokolova. "Influence of fatigue skipper on ensuring security of navigation." *Vestnik Gosudarstvennogo universiteta morskogo i rechnogo flota imeni admirala S. O. Makarova* 9.2 (2017): 272–279. DOI: 10.21821/2309-5180-2017-9-2-272-279.

УДК 612/614/656.6

ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ УСТАЛОСТИ СУДОВОДИТЕЛЯ НА ПРОЦЕСС ОБЕСПЕЧЕНИЯ БЕЗОПАСНОСТИ СУДОХОДСТВА

В. В. Каретников, С. В. Козик, И. А. Соколова

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

В статье рассмотрено исследование влияния психологического состояния человека, такого как усталость, на его трудовую деятельность. Особенное внимание уделено описанию методов оценки усталости судоводителя во время несения ходовой навигационной вахты. Предложенные методы позволяют оценивать динамику усталости по изменениям параметров одного из физических полей человека. На конкретных примерах продемонстрированы принципы организации прикладных исследований, приемы профилактики и коррекции неблагоприятных состояний. Статья охватывает такие области знаний, как инженерная психология, психология, физиология и гигиена труда, эргономика, медицина на транспорте. Прикладная направленность исследований функциональных состояний ориентирует прежде всего на поиск адекватных методов оценки и прогнозирования их развития. Сейчас в диагностической практике предпочтение отдается физиологическим и психофизиологическим методикам. При переходе на новый уровень анализа возникает необходимость разработки концепции диагностики в соответствии с особенностями рассматриваемого круга явлений. Отдавая себе отчет в трудности решения поставленной задачи и не претендуя на ее исчерпывающий анализ, нами выполнена попытка рассмотреть ряд вопросов, касающихся выработки единого подхода к изучению функциональных состояний и создания адекватных процедур. В статье обобщены результаты исследований по созданию технологий, направленных на повышение работоспособности и профилактику заболеваний, характерных для профессиональной деятель-

ности судоводителя. Подробно охарактеризованы основные методы мониторинга состояния человека, конкретные методики и процедуры. Акцент ставится на разработке способов мониторинга состояний судоводителя, несущего ходовую вахту.

Ключевые слова: безопасность судоходства, усталость, функциональное состояние, метод газоразрядной визуализации.

Для цитирования:
Каретников В. В. Исследование влияния усталости судоводителя на процесс обеспечения безопасности судоходства / В. В. Каретников, С. В. Козик, И. А. Соколова // Вестник Государственного университета морского и речного флота имени адмирала С. О. Макарова. — 2017. — Т. 9. — № 2. — С. 272–279. DOI: 10.21821/2309-5180-2017-9-2-272-279.

Введение

На современном этапе развития общества наблюдается устойчивая тенденция усложнения профессиональной деятельности специалистов водного транспорта. Одной из наиболее важных причин этого является научно-технический прогресс, который привел к появлению принципиально новых образцов техники, сложных технологических производств, в результате чего деятельность специалистов становится все более опосредованной, в том числе и «искусственным интеллектом».

Анализы результатов исследований по обеспечению транспортной безопасности приводят к выводу о том, что, по всей видимости, одной из основных причин аварийности на водном транспорте является *человеческий фактор*. Это многоплановое понятие, под которым принято понимать совокупность способностей и возможностей индивида по приему, обработке, анализу различных видов информации, направленных на выработку и принятие разнообразных решений в различных условиях его функционирования. Необходимо отметить, что возможности человека адекватно разобраться в текущей ситуации и принять правильное решение могут снижаться существенным образом, если он находится, условно говоря, в «плохом», неработоспособном состоянии. Существует множество причин появления такого состояния. Появление этих причин может быть обусловлено влиянием факторов внешней среды, физиологии и психики конкретного человека и др.

Кроме того, причинами могут быть утомление и неуверенность в своих силах, начинающееся заболевание, недостаточная подготовленность к данному виду деятельности и даже переживания как приятного, так и неприятного характера. Иногда психофизиологические, психологические характеристики и особенности человека не соответствуют уровням сложности поставленных и решаемых задач, вопросов или проблем. Характеристики, возникающие при взаимодействии человека и технических систем, связывают с человеческим фактором. Ошибки, связанные с проявлением данного фактора, как правило непреднамеренные: человек выполняет ошибочные действия, оценивая их как правильные или наиболее подходящие в данном конкретном случае или ситуации.

С точки зрения управления человеческим фактором важным является предвидение возможности наступления такого состояния у человека в ходе исполнения им своих служебных обязанностей, а также констатация его возникновения непосредственно в период работы. Все это относится к деятельности судоводителя при несении ходовой вахты. Судоводителю одному на протяжении многих часов требуется управлять движением судна, обеспечивая его навигационную безопасность. В течение этого времени у него периодически могут возникать неблагоприятные функциональные состояния, которые, несомненно, будут сказываться на качестве принимаемых решений. В судовых условиях существует ряд факторов, способствующих появлению усталости, воздействие которых на членов экипажа создает предпосылки к аварийным ситуациям.

Описание рассматриваемых задач

Международно-правовые документы содержат ряд требований и рекомендаций, направленных на предупреждение усталости вахтенного персонала и предотвращение ее влияния на безо-

пасность плавания. Они касаются отдыха между вахтами, а также суточного и недельного режима труда и отдыха.

В соответствии с действующими нормативными документами [1] все лица, назначенные на должность вахтенного помощника капитана, вахтенного механика или лица рядового состава, несущего вахту, работа которых включает назначенные обязанности по обеспечению безопасности судоходства, предотвращению загрязнения и охране окружающей среды, должны иметь период отдыха не менее чем минимум 10 ч отдыха в любой 24-часовой период; 77 ч отдыха в любой семидневный период; часы отдыха могут быть разделены не более чем на два периода, один из которых должен иметь продолжительность 6 ч, а интервалы между последовательными периодами не должны превышать 14 ч. В таком случае утомление может рассматриваться как состояние, выражающееся в комплексе физиологических сдвигов в организме, а усталость как психическое переживание этого факта. Переутомление заключается в возникновении патологических сдвигов в организме, для устранения которого требуется медицинское вмешательство.

Усталость можно определить как снижение эффективности выполнения работы, ослабление работоспособности и производительности труда человека, его физических и умственных способностей под воздействием чрезмерной нагрузки на работе, неполноценного отдыха, который следует за периодом умственной или физической активности. Как правило, усталость сопровождается чувством раздражительности и сонливости. Она является состоянием физической и / или психической слабости, хотя и варьируется от общего состояния летаргии до специфического ощущения жжения в мышцах, вызванного длительной или интенсивной работой. Точного и законодательно закрепленного определения усталости моряков не существует, поэтому Международная морская организация (ИМО) использует следующее «рабочее» определение [1]: «*… снижение физических и (или) умственных возможностей в результате физического, умственного или эмоционального напряжения, которое может ослабить практически все физические возможности*».

Скорость реакции, координация движения, скорость принятия решений и способность сохранения равновесия — это биологические состояния, которым подвержены все лица, вне зависимости от наличия навыков, знаний или специального обучения. ИМО также указывает [1], что «*… последствия от негативного влияния человеческого фактора особенно опасны на морском транспорте*». Высокая техническая оснащенность и специфика отрасли требуют постоянного внимания и сосредоточения персонала. Для эффективного решения проблемы усталости на флоте требуется целостный подход [2], [3]. Для начала необходимо определить причины возникновения усталости. Такими причинами могут являться недостаточный сон, низкое качество сна, недостаточное время отдыха между рабочими периодами, низкое качество отдыха, стресс, утомительная работа, монотонная работа, шум, вибрация, движение судна, некачественная и невкусная пища, нездоровье, воздействие вредных веществ на организм, нарушение суточного ритма организма, избыточная рабочая нагрузка.

Для рассматриваемого случая можно ввести следующую классификацию усталости: *физическая усталость, умственная усталость, эмоциональная усталость*. Задача управления состоянием судоводителя сводится к поддержанию состояния устойчивой работоспособности (оптимального состояния) и предвидением наступления неблагоприятных состояний, чтобы было возможно принять организационные меры по устранению «человеческого фактора». Эффективность, обоснованность и целесообразность принятия тех или иных организационных мер (поддержание оптимального состояния судоводителя) напрямую зависит от объективной диагностики его текущего функционального состояния. Понятие «состояние» [4] является общеметодологической категорией. Его используют ученые в разных науках. В самом общем плане это понятие обозначает характеристику существования объектов и явлений, реализации бытия в данный момент и все последующие моменты времени.

Изучение проблемы состояний человека ведется по двум основным направлениям: *физиологии* и *психофизиологии*. Первое изучает функциональные состояния, второе — эмоциональные и психические состояния. Если речь идет о функциональных состояниях, то имеется в виду уро-

вень функционирования человека в целом или его отдельных функциональных систем (сенсорной, моторной, интеллектуальной), а когда говорят о психических состояниях, то речь идет о качественной специфике реагирования на ту или иную ситуацию (без учета функционирования). В действительности, поскольку в состояниях сочетаются уровневые и качественные характеристики, речь должна идти о психофизиологических состояниях.

Функциональное состояние работника — это комплекс характеристик тех функций и качеств человека, которые прямо или косвенно обуславливают выполнение трудовой деятельности. Выбор показателей для диагностики психофизиологических состояний должен быть целенаправленным и определяться исходя из структуры функциональной системы, выделяемой согласно критерию полезного результата деятельности работника [5] – [7]. Такой подход устраняет необходимость использования при диагностике как можно большего числа показателей и методик. Поэтому достаточно четырех показателей при условии, что они отражают все необходимые уровни и подсистемы целостной функциональной системы.

Основная часть

Для деятельности судоводителя на ходовой вахте характерна задействованность высших корковых (когнитивных) функций. Когнитивные функции тесно взаимосвязаны между собой. К ним относят наиболее сложные функции головного мозга: интеллект, речь, праксис, гнозис, память, внимание. На основании этого предположения для диагностики функционального состояния судоводителя нами выбраны показатели его интеллектуальной продуктивности и активности внимания. Традиционные тестовые методики психодиагностики малопригодны при изучении функциональных состояний (состояний работающего человека), так как в них отсутствует изначальная ориентация на анализ постоянных изменений предмета испытаний (функциональных состояний), возникающих в течение определенного периода времени.

Различные методики субъективной оценки функциональных состояний (опросные методики — опросники) должны иметь профессиональную специализацию, т. е. соответствовать и отражать специфические особенности профессии и структуру этой трудовой деятельности, а также достаточное количество адекватных и корректно сформулированных субъективных симптомов. Для оценки функционального состояния необходима специально сконструированная приборная методика, позволяющая проводить диагностику, не обременяя этой процедурой судоводителя. Физической основой такого прибора служит измерение параметров одного из физических полей человека [8].

По предварительно проведенным исследованиям наиболее перспективным для диагностики функционального состояния представляется изучение электронно-фотонного излучения человека [9]. Эффект свечения различных объектов, в том числе биологических, в электромагнитных полях высокой напряжённости известен уже более двух столетий [8]. И только благодаря российским изобретателям — супругам Кирлиан, обнаружившим независимо от других это явление в 1930 – 1940 гг., метод получил широкую известность. Поэтому во всем мире за этим изобретением прочно закрепилось название «эффект Кирлиан». В настоящее время под термином «эффект Кирлиан» понимают визуальное наблюдение или регистрацию на фотоматериале свечения газового разряда, возникающего вблизи поверхности исследуемого объекта при помещении последнего в электрическое поле высокой напряженности.

Наиболее технически разработанным методом регистрации спонтанной эмиссии электронов и фотонов с поверхности любого объекта является *метод газоразрядной визуализации* (ГРВ) [8]. Метод ГРВ — это компьютерная регистрация и анализ газоразрядного свечения ГРВ-грамм, любых биологических объектов, помещенных в электромагнитное поле высокой напряженности. Основная информация извлекается из характеристик излучения, которое представляет собой пространственно-распределённую группу участков различной яркости ГРВ-грамм [10] – [12]. Заключение даётся не путём изучения анатомических структур организма, а на основании конформных

преобразований и математической оценки ГРВ-грамм. Внешний вид прибора «ГРВ Компакт» [13] показан на рис. 1, а примеры ГРВ-грамм пальцев рук человека приведены на рис. 2.



Рис. 1. Прибор «ГРВ Компакт»

Для анализа функционального состояния судоводителя необходимо проанализировать ГРВ-грамм пальцев его рук, так как нейрофизиологам хорошо известен факт [9], свидетельствующий о том, что нервные окончания кончиков пальцев руки человека взаимосвязаны с отделами головного мозга, поэтому измерение электрической активности на кончиках пальцев руки может характеризовать активность работы головного мозга и его высших корковых (когнитивных) функций.

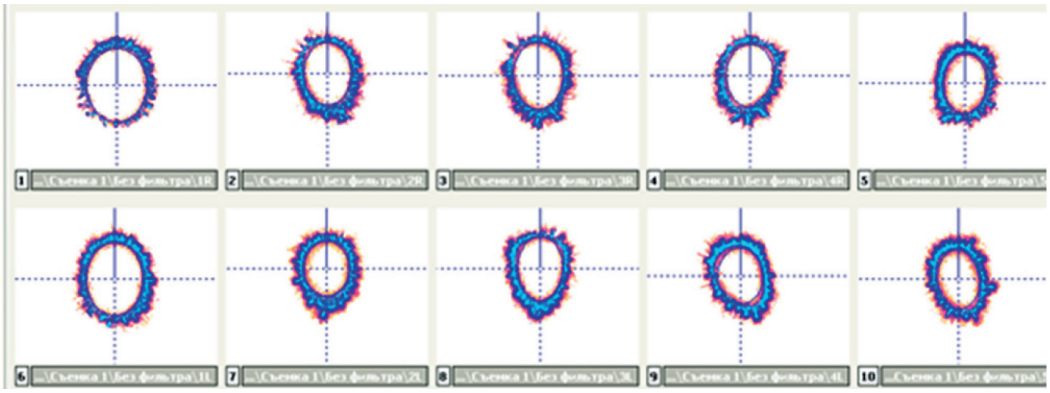


Рис. 2. Примеры ГРВ-грамм пальцев

Для получения качественных ГРВ-грамм человека необходимо соблюдать стандартность процедуры их измерения [9].

Для подтверждения возможности использования ГРВ-грамм при оценке функционального состояния судоводителя был проведен эксперимент, в ходе которого собрана уникальная репрезентативная база данных 950 человек обоего пола в возрасте от 14 до 70 лет. Каждый испытуемый в рамках стандартной процедуры профессионального психологического отбора проходил обследование по батарее психологических тестов, в которую входили тесты, позволяющие оценить выбранные параметры функционального состояния.

Выявление закономерностей связи и построение прогностических математических моделей осуществлялось по специально разработанному эвристическому алгоритму нахождения устойчивых для контрольной и экспериментальной выборки, статистически достоверных, многомерных регрессионных уравнений. Одновременно шел поиск наиболее информативных для нашей цели ГРВ-параметров. В результате проведенного эксперимента удалось разработать математические модели, позволяющие по данным ГРВ-грамма спрогнозировать выбранные параметры функционального состояния с коэффициентом корреляции 0,9. На базе разработанных математических моделей была создана специализированная программа «PsyhoDiagnostic», позволяющая измерить ГРВ-граммы и оценить параметры функционального состояния. Кроме того, была разработана уникальная методика оценки функционального состояния судоводителя, основные положения которой заключаются в следующем:

– измерение ГРВ-грамм, их визуальный контроль на возможные промахи, допущенные в процедуре измерения (рис. 3);

– расчет ГРВ-грамм и параметров оценки функционального состояния.

– анализ результатов оценки, представленных в индивидуальной или групповой форме (рис. 4).

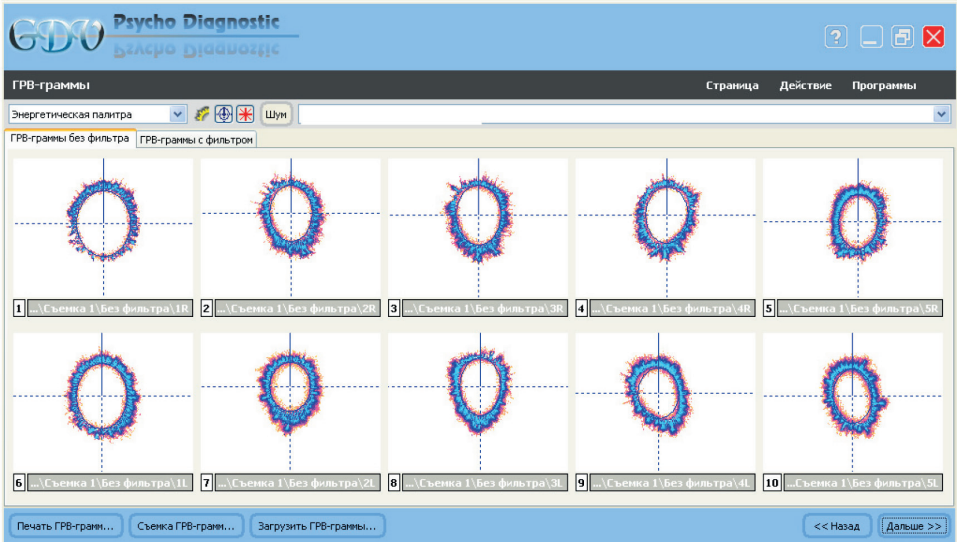
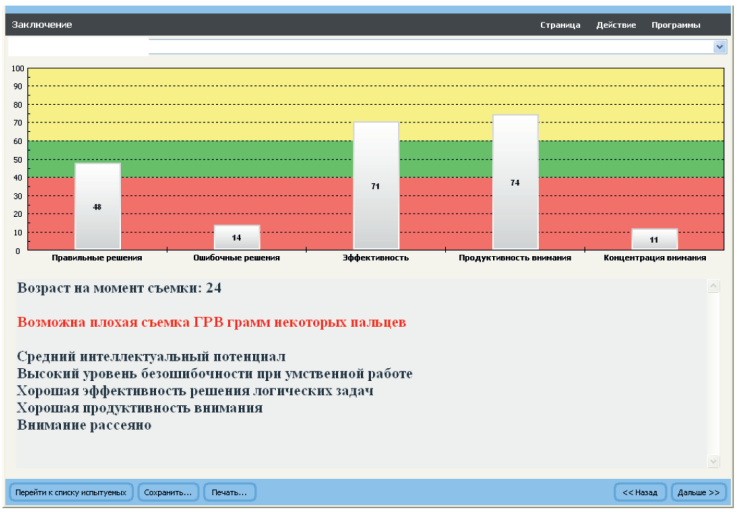


Рис. 3. Псевдоокрашенные результаты измерения ГРВ-грамм испытуемого без фильтра

а)



б)



Рис. *4*. Результаты оценки функционального состояния в индивидуальной (*а*) или групповой (*б*) форме

Для индивидуальной формы на рис. 4, *а* приводится пять столбцов, в которых показаны результаты анализа психологических качеств, характеризующих функциональное состояние испытуемого по оценке его когнитивных функций. Каждый из пяти параметров приводится в пересчете на 100-балльную систему. Показатели «*Правильные решения*», «*Ошибочные решения*», «*Эффективность*» моде-

лируют результаты интеллектуального психологического теста, совместная интерпретация которых свидетельствует об интеллектуальной активности на данный момент. Показатели «*Продуктивность внимания*» и «*Концентрация внимания*» моделируют показатели теста корректурной пробы, предназначенного для исследования внимания, характеризуют активность внимания испытуемого. Основным является показатель «*Концентрация внимания*», вспомогательным — «*Продуктивность внимания*».

Дальнейшие исследования направлены на выявление числовых границ рассчитанных параметров функционального состояния для вынесения заключения о возможности судоводителем адекватно принимать решения по обеспечению безопасности судовождения.

Заключение

Статья посвящена проблеме надежности выполнения функциональных обязанностей судоводителя при несении им ходовой вахты. Показано, что надежность выполнения обязанностей будет достигаться при отсутствии признаков усталости у судоводителя. Наиболее трудно оцениваемым параметром является *умственная усталость*. В то же время она наиболее и трудно диагностируема. Предложен подход для оперативной оценки умственной усталости путем измерения электронно-фотонного излучения поля, пальцев рук судоводителя. Исследования, направленные на оценку функциональных состояний и выработку решений по их корректировке и устранению, способствуют повышению эффективности труда судоводителей, улучшению их здоровья и повышению безопасности мореплавания и эксплуатации судов.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Резолюция ИМО А.772(18). Фактор усталости при укомплектовании судов экипажами и обеспечение безопасности.

2. *Панов Б. В.* Приоритеты психофизиологических исследований в медицине труда на транспорте / Б. В. Панов, А. Н. Пономаренко, А. И. Гоженко // Актуальные проблемы транспортной медицины. — 2008. — № 2 (12). — С. 026–030.

3. *Омаров М. А.* Поиск способов построения информационных систем оценивания сложности ситуации в медицине и на транспорте на примере конкретных ситуаций / М. А. Омаров, И. И. Цехмистро, А. А. Трубицин // Інформаційно-керуючі системи на залізничному транспорті. — 2015. — № 5 (114). — С. 66–75.

4. *Леонова А. Б.* Функциональные состояния: человека в трудовой деятельности / А. Б. Леонова, В. И. Медведев. — М., 2008. — 233 с.

5. *Кубасов Р. В.* Проблемы стресса и адаптации в морской медицине / Р. В. Кубасов, В. В. Лупачев, И. М. Бойко [и др.] // Морская медицина. — 2015. — Т. 1. — № 3. — С. 13–18.

6. Морская доктрина Российской Федерации // Морская медицина. — 2015. — Т. 1. — № 3. — С. 66–87.

7. *Поляков И. В.* Медицинская помощь работникам водного транспорта: состояние дел и перспективы развития / И. В. Поляков, В. В. Буров, А. С. Твердохлебов, С. Е. Желиховский // Эксплуатация морского транспорта. — 2007. — № 4. — С. 40–46.

8. *Коротков К. Г.* Принципы анализа в ГРВ биоэлектрографии / К. Г. Коротков. — СПб.: Реноме, 2007. — 286 с.

9. *Козик С. В.* Исследование эмпирических закономерностей ГРВ параметров и данных психодиагностики / С. В. Козик // Тезисы XII Междунар. науч. конгр. по биоэлектрографии. — СПб., 2008. — С. 47–49.

10. *Привалов В. Е.* 23-я Международная конференция «Лазерно-информационные технологии в медицине, биологии, геоэкологии на транспорте-2015» / В. Е. Привалов, В. А. Туркин, В. Г. Шеманин // Вестник Государственного морского университета им. адмирала Ф. Ф. Ушакова. — 2016. — № 2 (15). — С. 76–81.

11. *Вагин В. А.* Основные направления охраны здоровья работников водного транспорта Сахалинской области: монография / В. А. Вагин, Н. А. Капитоненко. — Хабаровск: Дальневосточный гос. мед. ун-т, 2008. — 143 с.

12. *Шафран Л. М.* Научные исследования по морской медицине в Украине: вехи истории и будущее / Л. М. Шафран, А. М. Войтенко, Е. П. Белобров [и др.] // Актуальные проблемы транспортной медицины. — 2007. — № 3 (9). — С. 014–020.

13. Прибор «ГРВ Компакт» [Электронный ресурс]. — Режим доступа: http://www.finer.ru/podg/content/grv-kompakt.html (дата обращения: 01.03.17).

REFERENCES

1. Resolution IMO A.772 (18). *Fatigue factor when manning ships and providing security.*

2. Panov, B. V., A. N. Ponomarenko, and A. I. Gozhenko. "Priorities of psychophysiological researches in medicine of labour on a transport." *Actual problems of transport medicine* 2(12) (2008): 026–030.

3. Omarov, M. A., I. I. Tsekhmistro, and A. A. Trubitsin. "Poisk sposobov postroeniya informatsionnykh sistem otsenivaniya slozhnosti situatsii v meditsine i na transporte na primere konkretnykh situatsii." *Informatsiino-keruyuchi sistemi na zaliznichnomu transporti* 5(114) (2015): 66–75.

4. Leonova, A. B., and V. I. Medvedev. *Funktsional'nye sostoyaniya: cheloveka v trudovoi deyatel'nosti*. M., 2008.

5. Koubassov, R. V., V. V. Lupachev, I. M. Boyko, M. V. Popov, and E. D. Koubassova. "Climate-geographic environments of main sea shipping regions that based in Archangelsk and health condition of sailor staffs." *Marine medicine* 1.3 (2015): 13–18.

6. "Morskaya doktrina Rossiiskoi Federatsii." *Marine medicine* 1.3 (2015): 66–87.

7. Polyakov, I. V., V. V. Burov, A. S. Tverdokhlebov, and S. E. Zhelikhovsky. "Medical assistance to water transport workers: the state of affairs and prospects for development." *Ekspluatatsiya morskogo transporta* 4 (2007): 40–46.

8. Korotkov, K. G. *Printsipy analiza v GRV bioelektrografii*. SPb.: Renome, 2007.

9. Kozik, S. V. "Issledovanie empiricheskikh zakonomernostei GRV parametrov i dannykh psikhodiagnostiki." *Tezisy KhII Mezhdunarodnogo Nauchnogo Kongressa po Bioelektrografii*. SPb., 2008. 47–49.

10. Privalov, V. E., V. A. Turkin, and V. G. Shemanin. "23-th international conference «Laser and information technologies in medicine, biology, geoecological and transport-2015»." *Vestnik gosudarstvennogo morskogo universiteta im. admirala F.F. Ushakova* 2(15) (2016): 76–81.

11. Vagin, V. A., and N. A. Kapitonenko. *Osnovnye napravleniya okhrany zdorov'ya rabotnikov vodnogo transporta Sakhalinskoi oblasti: monografiya*. Khabarovsk: Dal'nevostochnyi gos. med. un-t, 2008.

12. Shafran, L. M., A. M. Voytenko, E. P. Belobrov, A. V. Kuznetsov, O. Y. Netudykhatka, E. M. Psyadlo. "Scientific researches on maritime medicine in Ukraine: marks of the history and the future." *Actual problems of transport medicine* 3(9) (2007): 014–020.

13. Pribor "GRV Kompakt". Web. 01 March 2017 <http://www.finer.ru/podg/content/grv-kompakt.html>.

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ	INFORMATION ABOUT THE AUTHORS
Каретников Владимир Владимирович — доктор технических наук, доцент ФГБОУ ВО «ГУМРФ имени адмирала С.О. Макарова» 198035, Российская Федерация, Санкт-Петербург, ул. Двинская, 5/7 e-mail: *spguwc-karetnikov@yandex.ru*, *kaf_svvp@gumrf.ru*	**Karetnikov, Vladimir V.** — Dr. of Technical Sciences, associate professor Admiral Makarov State University of Maritime and Inland Shipping 5/7 Dvinskaya Str., St. Petersburg, 198035, Russian Federation e-mail: *spguwc-karetnikov@yandex.ru*, *kaf_svvp@gumrf.ru*
Козик Сергей Викторович — кандидат военных наук, доцент ФГБОУ ВО «ГУМРФ имени адмирала С.О. Макарова» 198035, Российская Федерация, Санкт-Петербург, ул. Двинская, 5/7 e-mail: *kaf_svvp@gumrf.ru*	**Kozik, Sergei V.**— PhD, associate professor Admiral Makarov State University of Maritime and Inland Shipping 5/7 Dvinskaya Str., St. Petersburg, 198035, Russian Federation e-mail: *kaf_svvp@gumrf.ru*
Соколова Ирина Александровна — 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: *kaf_svvp@gumrf.ru*	**Sokolova, Irina A.** — 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: *kaf_svvp@gumrf.ru*

Статья поступила в редакцию 6 марта 2017 г.
Received: March 6, 2017.

ВЕСТНИК
ГОСУДАРСТВЕННОГО УНИВЕРСИТЕТА
МОРСКОГО И РЕЧНОГО ФЛОТА ИМЕНИ АДМИРАЛА С. О. МАКАРОВА

DOI: 10.21821/2309-5180-2017-9-2-280-287

THE MODEL OF MASSIVE HANDLING CARGO FLOW FOR IMPORT WITH THE USE OF PRELIMINARY INFORMING TECHNOLOGY

T. E. Malikova[1], A. A. Yanchenko[1], I. N. Volnov[2]

[1] – Maritime State University named after Admiral G.I. Nevelskoi, Vladivostok, Russian Federation
[2] – Far Eastern Federal University, Vladivostok, Russian Federation

The paper describes the process of constructing model of handling container cargo flows for import at seaport, which allows reproducing the behaviour of the system under consideration based on the analysis of existing relations between its elements, as well as identifying the marginal possibilities of handling under the institution of the preliminary informing of customs authorities. To implement this simulation the authors make the system analysis of the technology for handling import container cargo flow since a ship's unloading prior to an actual removal of containers out of the port territory. Therewith, the unloading operations and placement of containers in storage areas, customs clearance procedures and customs control of both inbound vessel and cargo and release of containers according to the customs procedure declared are considered as the single process. The characteristic feature of the process under consideration is the relocation of the part of the operations relating to the customs clearance and customs control of the container flow even before vessel's arrival at seaport, as well as coupling already existing technologies of interaction between transport market participants with the technology of preliminary informing of customs authorities in marine transport first being implemented. As a result, the flowchart for processing import cargo flow with the use of technology of preliminary informing of customs authorities within the technological process of massive handling video system is developed. The present massive handling system flowchart can be used for constructing discrete event-driven simulation of the import container flow handling process at the seaport on the platform of the relevant specific software.

Keywords: container shipping, marine transport, cargo handling process, preliminary informing, simulation modeling.

For citation:
Malikova, Tatiana E., Anna A. Yanchenko, and Igor N. Volnov. "The model of massive handling cargo flow for import with the use of preliminary informing technology." *Vestnik Gosudarstvennogo universiteta morskogo i rechnogo flota imeni admirala S.O. Makarova* 9.2 (2017): 280–287. DOI: 10.21821/2309-5180-2017-9-2-280-287.

УДК 656.073.235: 656.073.28

МОДЕЛЬ МАССОВОГО ОБСЛУЖИВАНИЯ ИМПОРТНОГО ГРУЗОПОТОКА С ПРИМЕНЕНИЕМ ТЕХНОЛОГИИ ПРЕДВАРИТЕЛЬНОГО ИНФОРМИРОВАНИЯ

Т. Е. Маликова[1], А. А. Янченко[1], И. Н. Вольнов[2]

[1] — Морской государственный университет им. Г. И. Невельского, Владивосток, Российская Федерация
[2] — Дальневосточный федеральный университет, Владивосток, Российская Федерация

В статье представлен процесс построения модели переработки импортных контейнерных грузопотоков в порту, позволяющий воспроизвести поведение исследуемой системы на основе анализа существующих взаимосвязей между ее элементами и определить предельные возможности переработки грузов в условиях применения института предварительного информирования таможенных органов. С целью реализации имитационной модели был проведен системный анализ технологии переработки импортного контейнерного потока с момента разгрузки судна до фактического вывоза контейнеров с территории порта. При этом в качестве единого технологического процесса были рассмотрены операции по выгрузке и размещению контейнеров в зоне хранения, операции, связанные с проведением таможенного оформления и таможенного

контроля судна, а также прибывшего на нем груза, выпуска контейнеров в соответствии с заявленной таможенной процедурой. Отличительной особенностью рассматриваемого процесса является перенос части операций, связанных с таможенным оформлением и таможенным контролем контейнерного потока еще до прибытия судна в порт и сопряжение уже существующих технологий взаимодействия участников транспортного рынка с вновь внедряемой технологией предварительного информирования таможенных органов на морском транспорте. В результате была разработана блок-схема переработки импортного контейнерного потока с применением технологии предварительного информирования таможенных органов в технологическом процессе в виде системы массового обслуживания. Представленная блок-схема системы массового обслуживания может быть использована для построения дискретно-событийной имитационной модели процесса переработки импортного контейнерного потока в порту на платформе соответствующего специализированного программного обеспечения.

Ключевые слова: контейнерные перевозки, морской транспорт, процесс грузопереработки, предварительное информирование, имитационное моделирование.

Для цитирования:
Маликова Т. Е. Модель массового обслуживания импортного грузопотока с применением технологии предварительного информирования / Т. Е. Маликова, А. А. Янченко, И. Н. Вольнов // Вестник Государственного университета морского и речного флота имени адмирала С.О. Макарова. — 2017. — Т. 9. — № 2. — С. 280–287. DOI: 10.21821/2309-5180-2017-9-2-280-287.

Введение

Внедрение института предварительного информирования таможенных органов на морском транспорте в настоящее время является не только актуальным, но и сложным процессом, требующим сопряжения уже существующей технологии взаимодействия участников транспортного рынка [1], [2] с требованиями новых таможенных информационных технологий [3]. Единый технологический процесс (ЕТП) взаимодействия всех участников транспортного рынка с таможенными органами можно условно разделить на три временных участка: время совершения операций до прибытия судна в порт, время от подачи таможенной декларации до выпуска товаров в свободное обращение (время нахождения контейнера на терминале под таможенным контролем) и время с момента выпуска товаров до фактического вывоза контейнера из порта. Институт предварительного информирования таможенных органов позволяет перенести часть операций, выполняемых на втором временном участке, на временной участок (до прибытия судна в порт) и в итоге сократить сроки нахождения импортного груза в порту. В результате реализации пилотного проекта ЕТП в морском порту Владивосток срок фактического пребывания контейнеров на терминале сократился на 4,5 сут [4].

Выполненные авторами исследования позволили выявить причины, усложняющие процесс реализации информационных таможенных технологий на морском транспорте. Среди них вариативный (плановые [5] и внеплановые перевозки [6]) процесс доставки груза в морской порт, в отличие от других видов транспорта, необходимость адаптации персонала к технологическому процессу информационного обмена между перевозчиком и таможенными органами, неготовность информационных баз данных, используемых в судоходных компаниях, формировать информационный поток в требуемом таможенными органами объеме [7]. В результате участники транспортного рынка при внедрении в свою работу технологии предварительного информирования таможенных органов понесут дополнительные затраты на разработку и внедрение программного обеспечения данного процесса [8]. Поэтому необходимо обосновать целесообразность данных затрат в логистической цепи поставки товаров.

Обоснование выбора математического аппарата для исследования

Одним из направлений исследования является разработка моделей и формальных методов, позволяющих оценить степень влияния предварительного информирования на ускорение технологических процессов с момента выгрузки до фактического вывоза контейнеров с территории порта. В качестве метода исследования было выбрано имитационное моделирование, так как данный математический аппарат позволяет воспроизвести поведение исследуемой системы на основе результатов анализа наиболее существенных взаимосвязей между ее элементами и определить предельные

возможности (сроки) переработки грузов в условиях применения технологии предварительного информирования таможенных органов. Кроме того, его возможности были использованы и хорошо зарекомендовали себя при анализе деятельности транспортных и портовых систем в исследованиях А. С. Балалаева, Р. Г. Король, И. В Кукушкина, А. П. Ныркова и др. Так, на основе дискретно-событийной имитационной модели было установлено соответствие параметров работы железнодорожной станции и порта, таких как перерабатывающая способность, время нахождения вагонов на станции с расчленением по операциям и др., заданным параметрам в системе при увеличении пребывающего вагонопотока, а также определены условия, при которых система не сможет функционировать и перерабатывать пребывающий вагонопоток [9]. В статьях [10], [11] на основе имитационной модели процессов переработки каботажных грузов построены основные алгоритмы программы, вычисляющей вероятностные характеристики процессов переработки каботажных грузов в порту. Результаты исследований, опубликованные в этих статьях, послужили отправной точкой для разработки имитационной модели системы массового обслуживания (СМО) импортного грузопотока с применением технологии предварительного информирования таможенных органов.

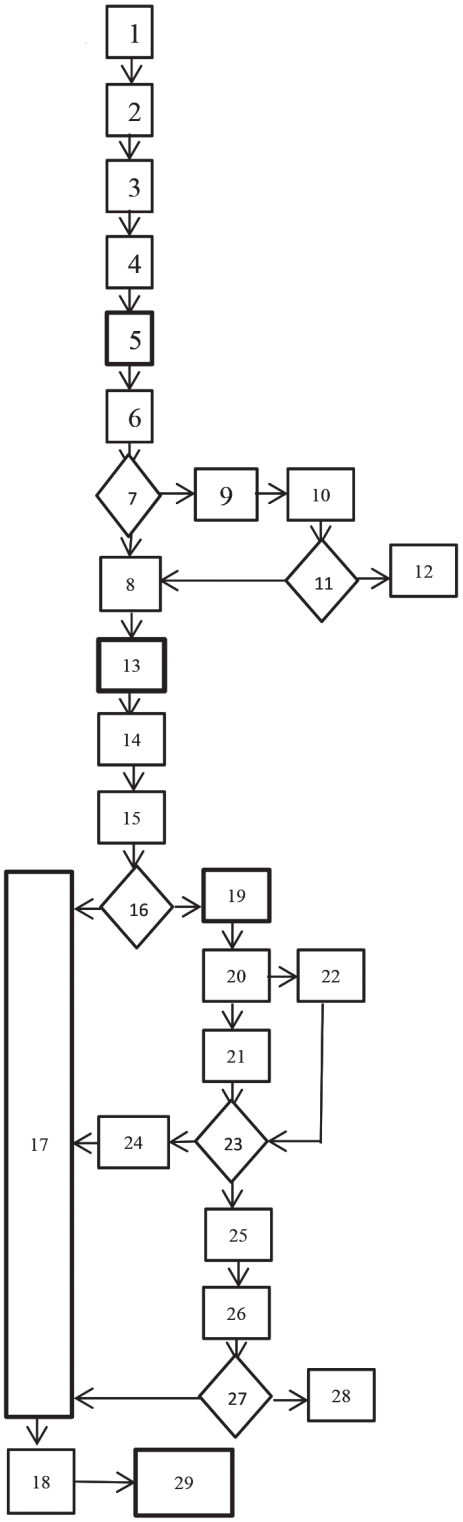
Основная часть

В статье рассматривается задача представления процессов переработки импортных контейнерных грузопотоков с применением технологии предварительного информирования таможенных органов в виде СМО. Для формирования имитационной модели технология переработки импортного контейнеропотока в морском порту была представлена в виде отдельных операций (рис. 1), разбитых на три временных блока, согласно проведенного авторами исследования ЕТП в морском порту Владивосток [4].

Первый блок (операции *1 – 13*). До прибытия судна в порт (не позднее чем за 24 ч) перевозчик подает предварительную заявку на прибытие судна в администрацию порта и в государственные контролирующие органы (ГКО), а также электронный пакет документов и сведений по судну в формате предварительного ПДС в комплексе программных средств «Портал Морской порт» Единой автоматизированной информационной системы таможенных органов (ЕАИС ТО). Таможенными органами осуществляется проверка представленного электронного пакета документов, в том числе по системе управления рисками (СУР), и принятие предварительных решений по судну и грузу (контейнерам). По прибытию судна перевозчик подает в таможенный орган окончательный ПДС, осуществляется сверка документов и сведений с информацией предварительного ПДС, назначается и проводится (при необходимости) государственный контроль (ГК) на судне. По результатам контрольных мероприятий таможенный орган выдает разрешение на разгрузку.

Второй блок (операции *14 – 16*). Осуществляется выгрузка контейнеров, перевозка и штабелирование на контейнерном терминале по *методу свободных мест*. После того как судно разгружено и контейнеры заняли свои места в отведенных им ячейках, грузовладельцы (декларанты) подают в таможенный орган (ТО) декларацию на товары (ДТ) и иные сопроводительные документы на контейнерную партию. Осуществляется проверка документов и сведений, сверка с ранее поданной электронной предварительной информацией о товаре (ПИТ) со сведениями о товаре, содержащимися в окончательном ПДС. По результатам принимаются или формализуются ранее принятые решения по контейнерным партиям.

Третий блок (операции *17 – 29*). В случае соблюдения декларантом условий выпуска (товар помещается под определенную таможенную процедуру) грузовладельцу дается разрешение на вывоз контейнера из порта. В случае срабатывания профилей риска, назначения таможенного осмотра с применением инспекционно-досмотрового комплекса и / или досмотра контейнер перемещается в досмотровую зону. По результатам проведения осмотра (досмотра) контейнер либо возвращается в ячейку на свое место, либо отправляется в специальную зону до решения вопроса об административном правонарушении (АПН). При решении декларантом вопроса по АПН (например, внесении обеспечения уплаты таможенных платежей при корректировке таможенной стоимости) товар выпускается (условно выпускается), и контейнер может быть вывезен из порта.



1 — подача предварительной заявки (ПЗ) на прибытие судна в администрацию порта (за 72 и 24 часа до прибытия) / передача ПЗ администрацией порта в ГКО / администрация порта информирует капитана о месте стоянки / уведомление администрацией порта ГКО о времени прибытия и месте стоянки (за 4 часа до прибытия);
2 — подача перевозчиком в ЕАИС ТО в электронном виде пакета документов и сведений о судне и грузах (предварительная ПДС) в КПС «Портал Морской порт» - за 24 ч или 4 часа до фактического прибытия;
3 — обработка ТО и ГКО информации, представленной в предварительной ПДС, проверка СУР / принятие предварительных решений по судну и грузу (по каждой товарной партии);
4 — передача предварительных решений по судну и грузу перевозчику (ввоз разрешен/запрещен);
5 — прибытие судна в порт;
6 — подача перевозчиком в ЕАИС ТО в электронном виде уточненного пакета документов и сведений о судне и грузах (окончательный ПДС);
7 — обработка ТО и ГКО информации, представленной в окончательном ПДС на основании предварительных решений, результатов СУР / принятие решений по судну и грузу (по каждой товарной партии);
8 — ввоз разрешен / разрешение на разгрузку;
9 — принятие решения о проведении ГК на судне;
10 — выезд Государственной комиссии на борт судна/ проведение ГК на борту судна;
11 — принятие решений ГК по судну и грузу (о пропуске судна, товаров на таможенную территорию ТС);
12 — ввоз запрещен;
13 — разгрузка судна;
14 — перевозка к месту временного хранения (на контейнерном терминале);
15 — информирование владельцем терминала грузовладельца (декларанта) и ТО о помещении контейнера на временное хранение / подача декларантом ДТ в ТО;
16 — проверка ТО документов и сведений, заявленных в ДТ (в том числе СУР) и иных сопроводительных документах по грузу / формализация ранее принятых решений;
17 — соблюдение декларантом условий выпуска;
18 — выпуск ТО контейнера в соответствии с заявленной таможенной процедурой (условный выпуск);
19 — риски выявлены / принятие решения ТО о проведении таможенного осмотра / досмотра;
20 — выставление ТО требования админ. порта на подачу контейнеров на осмотр / досмотр;
21 — доставка нужного контейнера из штабеля (если осуществляется осмотр / досмотр одного контейнера);
22 — доставка нескольких контейнеров (если осуществляется осмотр/досмотр партии контейнеров) / поиск и выставление недостающего контейнера;
23 — проведение таможенного осмотра / досмотра;
24 — правонарушения не выявлены;
25 — правонарушения выявлены;
26 — перевозка контейнера в спец. зону (по АПН);
27 — решение вопроса об АПН;
28 — условия выпуска декларантом не соблюдены / отказ в выпуске;
29 — вывоз контейнеров из порта

Рис. 1. Блок-схема переработки импортного контейнеропотока в морском порту

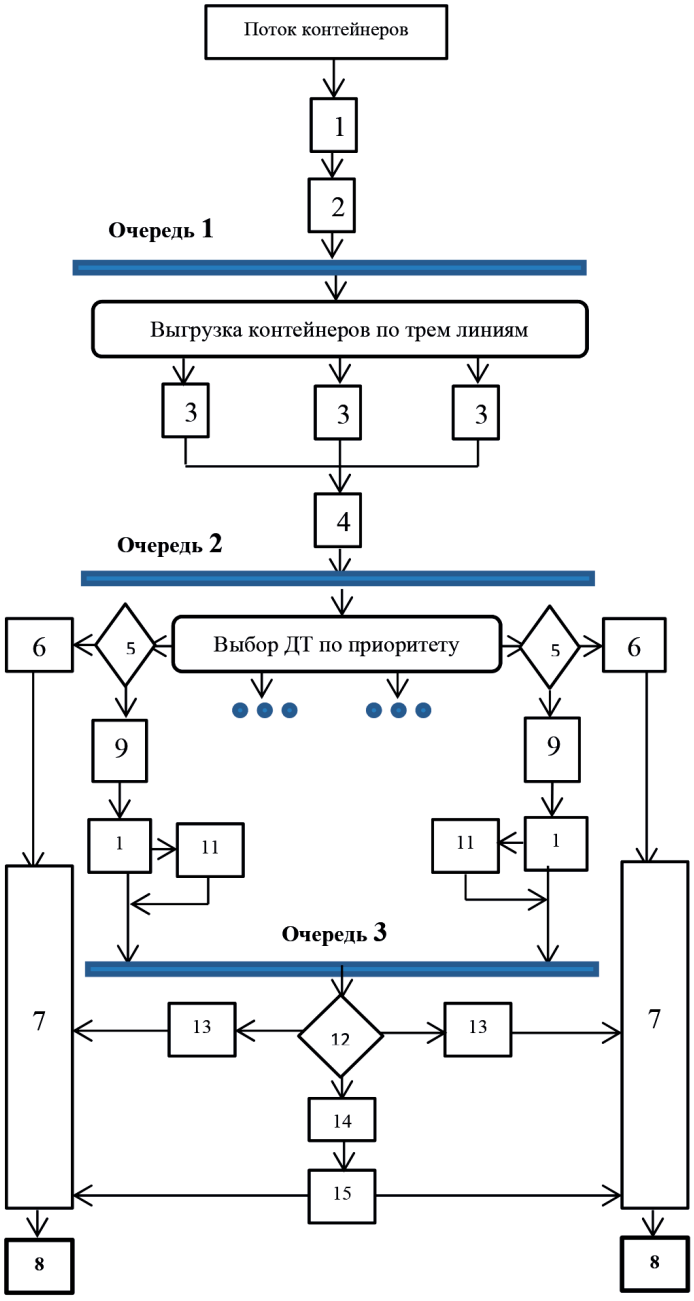
Для построения модели СМО были выполнены следующие операции:
– определено, какие элементы будут рассматриваться в виде заявок;
– установлены законы формирования заявок;
– выделены компоненты, которые можно представить в виде обслуживающих аппаратов (ОА);
– определена последовательность ОА, через которые будут перемещаться заявки;
– определены точки создания очередей и условия выбора из них;

– сформулированы дисциплины обслуживания и определены временные параметры обработки для каждого ОА, в том числе длительность и приоритетность, количество одновременно обслуживаемых заявок и др.;

– определены параметры, которые необходимо вычислять в процессе моделирования.

При построении модели массового обслуживания операции, не требующие существенных временных затрат и которые можно рассмотреть совместно с другими операциями без существенного ущерба для процесса моделирования (например, затраты, которые трудно вычленить), были опущены.

На рис. 2 представлена блок-схема рассмотренной ранее модели, содержащая три очереди. В качестве заявок в модели рассматривается поток контейнеров, а также поток документов и сведений, необходимых для прохождения таможенных формальностей (документы и сведения от перевозчика (ПДС), ДТ и иные сопроводительные документы). В виде ОА выступают отдельные портовые и таможенные операции.



1 — прибытие судна в порт / подача судовладельцем (перевозчиком) окончательного ПДС / дополнительная проверка ТО окончательного ПДС, формализация ранее принятых решений / проведение ГК на судне;
2 — ввоз разрешен / разрешение на разгрузку контейнеров;
3 — очередь 1 — разгрузка контейнеров по трем технологическим линиям / перевозка к месту временного хранения, штабелирование по методу свободных мест;
4 — информирование грузовладельца (декларанта) о прибытии контейнера(ров) / подача декларантом на контейнерную партию ДТ в таможенный орган;
5 — очередь 2 — выбор ДТ по приоритету: проверка ТО документов и сведений, заявленных в ДТ (в том числе СУР) и иных сопроводительных документах по грузу / формализация ранее принятых решений;
6 — соблюдение декларантом условий выпуска;
7 — выпуск контейнера (ров) разрешен;
8 — вывоз контейнеров из порта;
9 — выявление ТО риска / назначение таможенного осмотра (досмотра) / выставление ТО требования администрации порта на подачу контейнеров;
10 — выставление нужного контейнера (контейнеров) из штабеля на площадку осмотра (досмотра);
11 — поиск недостающего контейнера (при осмотре нескольких контейнеров контейнерной партии);
12 — очередь 3 — проведение таможенного осмотра / досмотра;
13 — АПН не выявлены;
14 — АПН выявлены;
15 — перемещение контейнера в спец. зону / решение декларанта с ТО вопроса об АПН

Рис. 2. Блок-схема модели массового обслуживания переработки контейнеров в порту

Первая очередь формируется из потока контейнеров, которые необходимо выгрузить с борта прибывшего судна. Контейнерный терминал ОАО «Владивостокский морской торговый порт» имеет три технологические линии для обработки судов, поэтому одновременно может принять для обработки три контейнера, остальные ожидают своей очереди.

Вторая очередь состоит из поданных ДТ, ожидающих проверки должностными лицами таможенных органов. В работе может находиться сразу несколько ДТ (в данном случае — две), их проверка может осуществляться параллельно. Следует отметить, что обработка некоторых ДТ требует больших временных затрат (например, большое число декларируемых товаров или несколько контейнерных партий в одной ДТ), а также оформление определенных категорий товаров может происходить в приоритетном порядке (скоропортящийся груз, экспресс-груз и др.). Таким образом, обработка очередной ДТ осуществляется с учетом приоритетов.

Третья очередь формируется перед осмотром контейнеров. Единовременно таможенный осмотр с применением инспекционно-досмотрового комплекса может проводиться только одного контейнера, остальные контейнера, попавшие под СУР, находятся в очереди на проведение контрольных операций. Причем количество таких контейнеров не превышает 20 % от всего прибывшего на судне контейнеропотока.

С целью проверки соответствия разработанной модели реальной системе переработки импортного контейнеропотока в порту прибытия был проведен анализ корректности результатов на «крайние» значения, а также аналитический подсчет характеристик (на основе статистических данных обработки контейнеропотока на контейнерном терминале и сравнение их с модельными результатами. Отклонение результатов моделирования СМО от показателей реальной системы составляет около 8,5 %, что свидетельствует о валидности разработанной модели.

Выводы

1. Следует отметить, что поступление контейнеров в систему носит случайный характер, состояния СМО изменяются скачком в момент прибытия нового судна в порт, его разгрузки, в момент подачи перевозчиком и владельцем контейнеров документов и сведений в таможенные органы, в момент проведения таможенного осмотра (досмотра). Таким образом, разработанная модель будет представлять собой систему, основанную на дискретно-событийном имитационном моделировании. Предложенная блок-схема СМО может быть использована для построения имитационной модели процесса переработки импортного контейнеропотока в порту прибытия на платформе соответствующего специализированного программного обеспечения.

2. Выполненные исследования показали возможность представления процессов переработки грузов в условиях института предварительного информирования таможенных органов в виде СМО и применения систем имитационного моделирования для анализа и оценки предельных возможностей рассматриваемой технологии. Использование моделирования позволяет оценить возможности различных технологий в рамках ЕТП еще до их внедрения.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Маликова Т. Е.* Анализ процесса формирования таможенного логистического потока на контейнерном терминале / Т. Е. Маликова, Ю. В. Гришина // Проблемы транспорта Дальнего Востока: докл. десятой юбилейной междунар. науч.-практ. конф. 2 – 4 окт. 2013 г. — Владивосток: ДВО РАТ, 2013. — С 217–218.

2. *Маликова Т. Е.* Организация таможенного контроля на контейнерных терминалах в морских пунктах пропуска / Т. Е. Маликова // Проблемы транспорта Дальнего Востока: докл. десятой юбилейной междунар. науч.-практ. конф. 2 – 4 окт. 2013 г. — Владивосток: ДВО РАТ, 2013. — С. 81–83.

3. *Маликова Т. Е.* Разработка системы слежения за импортными грузопотоками, оформляемыми по технологии предварительного информирования в морском пункте пропуска / Т. Е. Маликова, А. И. Филиппова // Морские интеллектуальные технологии. — 2016. — Т. 2. — № 4 (34). — С. 32–36.

4. *Маликова Т. Е.* Системный анализ взаимодействия участников транспортного рынка при оформлении грузов в морском порту / Т. Е. Маликова, А. А. Янченко // Научные проблемы транспорта Сибири и Дальнего Востока. — 2015. — № 4. — С. 25–29.

5. *Янченко А. А.* К вопросу внедрения технологии предварительного информирования в линейном судоходстве / А. А. Янченко, А. Ж. Радочинская // Транспорт Азиатско-Тихоокеанского региона. — 2015. — № 4. — С. 19–23.

6. *Маликова Т. Е.* Применение технологии предварительного информирования таможенных органов при морских внеплановых грузоперевозках / Т. Е. Маликова, А. А. Янченко // Вестник Государственного университета морского и речного флота имени адмирала С. О. Макарова. — 2016. — № 3 (37). — С. 33–45. DOI: 10.21821/2309-5180-2016-7-3-33-45.

7. *Янченко А. А.* Предварительное информирование таможенных органов - новое направление организации контейнерных перевозок в условиях функционирования свободного порта Владивосток (на примере компании ООО «ФИТ») / А. А. Янченко, А. Ж. Радочинская, А. В. Костин, А. В. Жихарева // Сб. докл. 64-й Междунар. молодежной науч.-техн. конф. «Молодежь. Наука. Инновации». — 2016. — Т. 1. — С. 597–600.

8. *Азовцев А. И.* Разработка инфологической модели базы данных предварительного информирования таможенных органов для судоходной компании / А. И. Азовцев, Т. Е. Маликова, А. И. Филиппова, А. А. Янченко // Морские интеллектуальные технологии. — 2016. — Т. 1. — № 3 (33). — С. 327–332.

9. *Король Р. Г.* Имитационное моделирование системы «железнодорожная станция – морской порт» на примере Владивостокского транспортного узла / Р. Г. Король, А. С. Балалаев // Вестник Государственного университета морского и речного флота имени адмирала С. О. Макарова. — 2015. — № 3 (31). — С. 209–216.

10. *Кукушкин И. В.* Алгоритмическое и программное обеспечение имитационного моделирования процессов переработки каботажных грузов / И. В. Кукушкин, А. П. Ныркова, А. А. Ныркова // Вестник Государственного университета морского и речного флота имени адмирала С. О. Макарова. — 2016. — № 2 (36). — С. 190–200. DOI: 10.21821/2309-5180-2016-8-2-190-200.

11. *Зубарев Ю. Я.* Имитационная модель процессов обработки каботажных судов/ Ю. Я. Зубарев, И. В Кукушкин // Вестник Государственного университета морского и речного флота имени адмирала С. О. Макарова. — 2015. — № 4 (32). — С. 186–192.

REFERENCES

1. Malikova, T. E., and Yu. V. Grishina. “Analiz protsessa formirovaniya tamozhennogo logisticheskogo potoka na konteinernom terminale.” *Problemy transporta Dal’nego Vostoka. Doklady desyatoi yubileinoi mezhdunarodnoi nauchno-prakticheskoi konferentsii. 2-4 oktyabrya 2013 g.* Vladivostok: DVO RAT, 2013. 217–218.

2. Malikova, T. E. “Organizatsiya tamozhennogo kontrolya na konteinernykh terminalakh v morskikh punktakh propuska.” *Problemy transporta Dal’nego Vostoka. Doklady desyatoi yubileinoi mezhdunarodnoi nauchno-prakticheskoi konferentsii. 2-4 oktyabrya 2013 g.* Vladivostok: DVO RAT, 2013. 81–83.

3. Malikova, T. E., and A. I. Filippova. “Development of tracking flow of import goods, cleared through advance notification technology at a sea border entry point.” *Marine Intellectual Technologies* 2.4(34) (2016): 32–36.

4. Malikova, T. E., and A. A. Yanchenko. “The system analysis of transport market participants interaction in the process of goods clearance at sea port.” *Nauchnye problem transporta Sibiri i Dalnego Vostoka* 4 (2015): 25–29.

5. Yanchenko, A. A., and A. Z. Radochinskaya. “K voprosu vnedrenija tehnologii predvaritel’nogo informirovanija v linejnom sudohodstve.” *Transport Aziatsko-Tihokeanskogo regiona* 4 (2015): 19–23.

6. Malikova, Tatiana Egorovna, and Anna Anatol’evna Yanchenko. “The implementation of preliminary informing technology of customs authorities in sea spot cargo transportation.” *Vestnik Gosudarstvennogo universiteta morskogo i rechnogo flota imeni admirala S.O. Makarova* 3(37) (2016): 33–45. DOI: 10.21821/2309-5180-2016-7-3-33-45.

7. Yanchenko, A. A., A. Zh. Radochinskaya, A. V. Kostin, and A. V. Zhikhareva. “Predvaritel’noe informirovanie tamozhennykh organov - novoe napravlenie organizatsii konteinernykh perevozok v usloviyakh funktsionirovaniya svobodnogo porta Vladivostok (na primere kompanii OOO «FIT»).” *Sbornik dokladov 64-i Mezhdunarodnoi molodezhnoi nauchno-tekhnicheskoi konferentsii «Molodezh’. Nauka. Innovatsii».* 2016. Vol. 1. 597–600.

8. Azovtsev, A. I., T. E. Malikova, A. I. Filippova, and A. A. Yanchenko. “The development of infological customs preliminary informing data base model for shipping company.” *Marine Intellectual Technologies* 1.3(33) (2016): 327–332.

9. Korol, R. G., and A. S. Balalaev. "The simulation modeling system «railway station – seaport» Vladivostok transport hub." *Vestnik Gosudarstvennogo universiteta morskogo i rechnogo flota imeni admirala S.O. Makarova* 3(31) (2015): 209–216.

10. Kukushkin, Ivan Viktorovich, Anatoliy Pavlovich Nyrkov, and Andrey Anatolievich Nyrkov. "Algorithms and software of simulation modeling of the coasting ships processing." *Vestnik Gosudarstvennogo universiteta morskogo i rechnogo flota imeni admirala S.O. Makarova* 2(36) (2016): 190–200. DOI: 10.21821/2309-5180-2016-8-2-190-200.

11. Zubarev, Yu. Ya., and I. V. Kukushkin. "Imitation model of the coasting ships processing." *Vestnik Gosudarstvennogo universiteta morskogo i rechnogo flota imeni admirala S.O. Makarova* 4(32) (2015): 186–192.

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

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

Янченко Анна Анатольевна — аспирант.
Научный руководитель:
Маликова Татьяна Егоровна.
Морской государственный университет
имени адмирала Г. И. Невельского
690003, Российская Федерация, Владивосток,
ул. Верхнепортовая, 50а
e-mail: *annanyan@yandex.ru*

Вольнов Игорь Николаевич —
кандидат физ.-мат. наук, доцент
Дальневосточный федеральный университет
690950, Российская Федерация, Владивосток,
ул. Суханова, 8
e-mail: *ig_volnov@mail.ru*

INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

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

Yanchenko, Anna A. — Postgraduate
Supervisor:
Malikova, Tatiana E.
Maritime State University named
after Admiral G.I. Nevelskoi
50a Verkhneportovaya Str., Vladivostok, 690059,
Russian Federation
e-mail: *annanyan@yandex.ru*

Volnov, Igor N. —
PhD, associate professor
Far Eastern Federal University
8 Suhanova Str., Vladivostok, 690950,
Russian Federation
e-mail: *ig_volnov@mail.ru*

Статья поступила в редакцию 22 февраля 2017 г.
Received: February 22, 2017.

ВЕСТНИК
ГОСУДАРСТВЕННОГО УНИВЕРСИТЕТА
МОРСКОГО И РЕЧНОГО ФЛОТА ИМЕНИ АДМИРАЛА С. О. МАКАРОВА

DOI: 10.21821/2309-5180-2017-9-2-288-295

SIMULATION OF THE PROCESS OF CUSTOMS OPERATIONS AND CONDUCTING CUSTOMS CONTROL IN TRANSPORT SYSTEM AS A QUEUING SYSTEM

Ya. Ya. Eglit[1], M. A. Tsiveleva [2]

[1] — Admiral Makarov State University of Maritime and Inland Shipping,
St. Petersburg, Russian Federation
[2] — Named after V.B. Bobkov St. Petersburg branch of the Russian Customs Academy,
St. Petersburg, Russian Federation

The article considers the process of performing customs operations and customs control of individuals on transport in the form of a queuing system, and a comparative analysis of the daily load factor in the considered system. Optimization of time and costs of individuals during customs control at the border checkpoint has been performed, thereby demonstrating service characteristics such as the possibility of a queue, the probability of downtime and the average queue of passengers at a given intensity of traffic, service and a different number of inspecting passenger departments on their workers' places. The tasks were set to determine the minimum number of employees of the customs clearance and customs control department, in which the queue will not grow to infinity, and the optimal number of customs inspectors, in which the relative cost associated with the costs of maintaining the service channels and with the queue of passengers will be is minimal. The options for passenger service are presented for a given number of customs inspectors. To characterize the functioning of the process of customs operations and customs control, the following was considered as the initial data: the average number of declarations entering the "red corridor", the average number of declarations serviced at one automated workplace, the costs of maintaining one automated workplace (hereinafter - AWP) Inspector. Proposals on information and technical support of passenger terminals have been made. The optimization of the time and costs of individuals during customs control at the border checkpoint of the seaport is presented.

Keywords: queueing system, customs inspector, customs control.

For citation:
Eglit, Yan Ya., and Mariya A. Tsiveleva. "Simulation of the process of customs operations and conducting customs control in transport system as a queuing system." *Vestnik Gosudarstvennogo universiteta morskogo i rechnogo flota imeni admirala S.O. Makarova* 9.2 (2017): 288–295. DOI: 10.21821/2309-5180-2017-9-2-288-295.

УДК 65.05

МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРОЦЕССОВ СОВЕРШЕНИЯ ТАМОЖЕННЫХ ОПЕРАЦИЙ И ПРОВЕДЕНИЯ ТАМОЖЕННОГО КОНТРОЛЯ НА ТРАНСПОРТЕ КАК СИСТЕМЫ МАССОВОГО ОБСЛУЖИВАНИЯ

Я. Я. Эглит[1], М. А. Цивелева[2],

[1] — ФГБОУ ВО «ГУМРФ имени адмирала С. О. Макарова»,
Санкт-Петербург, Российская Федерация
[2] — Санкт-Петербургский имени В. Б. Бобкова филиал Российской таможенной академии, Санкт-Петербург, Российская Федерация

В статье рассмотрен процесс совершения таможенных операций и таможенного контроля физических лиц на транспорте в виде системы массового обслуживания, проведен сравнительный анализ суточной загрузки рассматриваемых систем. Произведена оптимизация времени и затрат физических лиц при прохождении таможенного контроля в пограничном пункте пропуска, тем самым наглядно показаны такие характеристики обслуживания, как возможность очереди, вероятность простоя и средняя очередь пассажиров при заданных параметрах: интенсивности потока, обслуживания и различном числе оформляющих документы инспекторов пассажирских отделов на своих рабочих местах. Поставлены задачи по определению минимального количества сотрудников отдела таможенного оформления и таможенного контроля, при котором очередь не будет расти до бесконечности, и определению оптимального количества таможенных инспекторов, при котором относительная величина затрат, связан-

ная с издержками на содержание каналов обслуживания и с пребыванием в очереди пассажиров, будет минимальной. Представлены варианты обслуживания пассажиров при заданном количестве таможенных инспекторов. Для характеристики функционирования процесса совершения таможенных операций и таможенного контроля в качестве исходных данных рассматривались: среднее количество деклараций, поступающих в «красный коридор»; среднее количество деклараций, обслуживаемых на одном автоматизированном рабочем месте; затраты на содержание одного автоматизированного рабочего места таможенного инспектора. Внесены предложения по информационно-техническому обеспечению пассажирских терминалов. Представлена оптимизация времени и затрат физических лиц при прохождении таможенного контроля в пограничном пункте пропуска морского порта.

Ключевые слова: система массового обслуживания, таможенный инспектор, таможенный контроль.

Для цитирования:ъ
Эглит Я. Я. Моделирование процессов совершения таможенных операций и проведения таможенного контроля на транспорте как системы массового обслуживания / Я. Я. Эглит, М. А. Цивелева // Вестник Государственного университета морского и речного флота имени адмирала С. О. Макарова. — 2017. — Т. 9. — № 2. — С. 288–295. DOI: 10.21821/2309-5180-2017-9-2-288-295.

ВВЕДЕНИЕ

Совершение таможенных операций в зоне таможенного контроля представляет собой законодательно регламентированные функциональные действия в отношении товаров и сопроводительных документов, совершаемые таможенными органами. Несмотря на законодательное регламентирование времени, обслуживание характеризуется случайным характером по длительности.

Государственная политика направлена на получение наибольшей выгоды от внешнеэкономической деятельности, высокую выявляемость таможенных нарушений и полноту сборов таможенных платежей в бюджет. Для ее успешной реализации предусматривается повышение качества обслуживания, которое определено как степень соответствия характеристик обслуживания требованиям государства и участников внешнеэкономической деятельности. Показатели качества таможенного обслуживания рассматриваются как количественные характеристики свойств процесса обслуживания, которые также могут представлять собой оценку соответствия установленных требований их нормативным значениям.

Целью статьи является разработка мер, касающихся оптимизации времени проведения таможенного контроля сотрудниками должностных лиц таможенных органов, времени и затрат физических лиц при прохождении таможенного контроля.

Для достижения поставленной цели в ходе исследования темы предполагается решение следующих задач:

– определение понятия системы массового обслуживания и пассажиропотока;

– рассмотрение организации таможенного контроля в качестве системы массового обслуживания;

– решение задачи оптимального ресурсного обеспечения выборочного таможенного контроля;

– выявление проблем и путей совершенствования таможенного контроля в пограничных пунктах пропуска.

Объектом данного исследования является время прохождения физическими лицами таможенного контроля в пограничном пункте пропуска, предметом — совершение таможенных операций и проведение таможенного контроля в пограничном пункте пропуска.

Теоретическую базу исследования составили нормативно-правовые акты ЕАЭС, а также типовые схемы организации пропуска через государственную границу Российской Федерации лиц, транспортных средств, грузов, товаров и животных пунктах пропуска через государственную границу Российской Федерации. Материалом для написания научно-исследовательской работы являются научные труды Н. Н. Майорова, С. С. Семенова, Н. Ш. Кремера, Е. Г. Бормотовой и др.

Система массового обслуживания (далее — СМО) предназначена для обслуживания потока заявок (событий). Объект, выполняющий обслуживание заявок, называется *каналом обслуживания* [1]. В рассматриваемом случае каналом обслуживания будет оформляющий таможенный инспектор, а заявкой — поток пассажиров, поступающих на вход системы большей частью не регулярно, а в случайные моменты времени. Время обслуживания имеет случайный характер и зависит от многих случайных причин [2]. По окончании проведения таможенного оформления и контроля пассажира таможенный инспектор пассажирского отдела освобождается и готов к проведению таможенного оформления и контроля следующего пассажира.

Пассажиропоток характеризуется интенсивностью частоты появления событий или средним числом событий, поступающих в СМО в единицу времени, — λ [3]. Случайный характер потока пассажиров и времени их таможенного оформления и контроля приводит к неравномерной загруженности рассматриваемой СМО: в некоторые промежутки времени наблюдается перегрузка СМО, связанная с большим пассажиропотоком в летний период и в выходные дни, в остальные интервалы времени малое число пассажиров приводит к недогрузке СМО [4]. В рассматриваемом случае поток назовем *стационарным*, поскольку его вероятностные характеристики не зависят от времени, в частности интенсивность стационарного потока есть величина постоянная, рассчитываемая по формуле

$$\lambda(t) = \frac{Q}{T \cdot N}, \qquad (1)$$

где λ — интенсивность чел./ч; Q — пассажиропоток; T — время прохождения пассажира через международный пункт пропуска, ч; N — количество пассажиров.

Таким образом, поток пассажиров, проходящих таможенный контроль в зонах таможенного контроля в павильонах прибытия, в течение суток не является стационарным, но можно сделать допущение и считать его стационарным, например, в часы пик. В этом случае фактическое число пассажиров, проходящих таможенный контроль в единицу времени (каждые 5 мин), может заметно отличаться друг от друга, но среднее их число будет постоянным, т. е. не зависящим от времени [5]. На пассажирском терминале расположены две зоны таможенного и пограничного контроля. В зависимости от числа пассажиров, прибывающих или убывающих на транспорте, для оформления и контроля могут использоваться как две зоны таможенного контроля, так и одна. В каждой зоне таможенного контроля располагаются по три рентгеновских аппарата Heimann HI-SCAN 85120.

Рассмотрим процесс таможенного декларирования и контроля пассажиров в международном пункте пропуска для того, чтобы описать и сравнить характеристики обслуживания системы при различном числе таможенных инспекторов [6], [7]. Для этой цели были выбраны и проанализированы бланки суточной загрузки пассажирских отделов в залах прибытия во втором квартале 2016 г.

В модели совершения таможенных операций и контроля пассажиров в пункте пропуска средняя λ принимается для указанного выше периода с большим по интенсивности, но не максимальным пассажиропотоком. В зале прибытия обслуживается 81 пассажир в час. Контроль рентгеновским аппаратом комплекта багажа и ручной клади одного пассажира занимает 40 с для камерного типа аппаратов и 30 с — для транспортерного типа аппарата, что соответствует нормативу времени контроля, контроль одного места багажа составляет 13 – 20 с, в среднем продолжительность таможенного контроля занимает 15 с.

Средняя продолжительность совершения таможенных операций: для лица, чей багаж и ручная кладь не подвергаются ручному досмотру, составляет не более 40 с; для лица, чей багаж и ручная кладь подвергаются ручному досмотру, — 2 мин [8]. В формируемой модели средняя продолжительность таможенного декларирования для лица, чей багаж подвергается ручному досмотру, равна 2 мин, $t_{об}$ = 2 мин [9]. В зону таможенного контроля поступает поток пассажиров с интенсивностью λ = 81 чел./ч. Средняя продолжительность обслуживания таможенным инспектором одного пассажира $t_{об}$ составляет 2 мин.

Для решения поставленных ранее задач необходимо:

– определить минимальное количество таможенных инспекторов n_{min}, при котором очередь не будет расти до бесконечности, и соответствующие характеристики обслуживания при $n = n_{min}$;

– определить оптимальное количество n_{opt} таможенных инспекторов, при котором относительная величина затрат $c_{отн}$, связанная с издержками на содержание каналов обслуживания и с пребыванием в очереди [9] пассажиров, будет минимальна;

– сравнить характеристики обслуживания при $n = n_{min}$ и $n = n_{opt}$.

Решение:

1. По условию $\lambda = 81$ (чел./ч),

$$\lambda = \frac{81}{60} = 1,35 \text{ (чел./мин).}$$

Рассчитаем ρ — приведенную интенсивность нагрузки канала согласно источнику [10].

Приведенная интенсивность потока заявок выражает среднее число заявок, приходящее за среднее время обслуживания одной заявки по формуле

$$\rho = \frac{\lambda}{\mu}, \tag{2}$$

где λ — интенсивность, чел./ч; $\mu = \frac{1}{t_{ob}}$ — средняя продолжительность обслуживания таможенным инспектором одного пассажира; ρ — приведенная интенсивность нагрузки канала, как следует из формулы (3).

Приведенная интенсивность нагрузки канала выражает среднее число заявок, приходящее за среднее время обслуживания одной заявки [11]:

$$\rho = \frac{\lambda}{\mu} = \lambda t_{ob}. \tag{3}$$

Очередь не будет возрастать до бесконечности при условии

$$\frac{\rho}{n} < 1, \tag{4}$$

т. е. при $n > \rho = 2,7$. Минимальное количество таможенных инспекторов $n_{min} = 3$.

Найдем характеристики обслуживания СМО при $n = 3$.

Вероятность отсутствия пассажиров в узле расчета рассчитывается по следующей формуле:

$$\rho_0 = \left(1 + 2,7 + \frac{\rho^2}{2!} + \frac{\rho^3}{3!} + ... + \frac{\rho^n}{n!} + \frac{\rho^{n+1}}{n!(n-\rho)}\right)^{-1}; \tag{5}$$

$$\rho_0 = \left(1 + 2,7 + \frac{2,7^2}{2!} + \frac{2,7^3}{3!} + \frac{2,7^4}{3!(3-2,7)}\right)^{-1} = 3,7 + 2,7 + 3,2805 + 29,5245)^{-1} = \frac{1}{39,205} = 0,025,$$

т. е. в среднем 2,5 % времени таможенные инспекторы будут простаивать.

Рассчитаем вероятность нахождения пассажира в очереди по формуле

$$\rho_{och} = \frac{\rho^{n+1}}{n!(n-\rho)}\rho_0; \tag{6}$$

$$\rho_{och} = \frac{2,7^4}{3!(3-2,7)} \cdot 0,025 = 29,5242 \cdot 0,025 = 0,738.$$

Среднее число пассажиров, находящихся в очереди, рассчитываем по формуле

$$L_{och} = \frac{\rho^{n+1} \cdot \rho_0}{n \cdot n!} \cdot \left(1 - \frac{\rho}{n}\right)^{-2}; \tag{7}$$

$$L_{\text{och}} = \frac{2,7^4}{3 \cdot 3!(1-2,7/3)^2} \cdot 0,025 = \frac{53,1441}{0,18} \cdot 0,025 = 7,38.$$

Среднее время ожидания в очереди рассчитываем по формуле

$$T_{\text{och}} = \frac{1}{\lambda} \cdot L_{\text{och}}; \quad (8)$$

$$T_{\text{och}} = \frac{7,38}{1,35} = 5,46 \text{ мин.}$$

Определим среднее число пассажиров в узле расчета по формуле согласно [6]:

$$L_{\text{sist}} = L_{\text{och}} + \rho; \quad (9)$$

$$L_{\text{sist}} = 7,38 + 2,7 = 10,08.$$

Среднее время нахождения пассажиров в узле расчета находим по формуле

$$T_{\text{sist}} = \frac{1}{\lambda} L_{\text{sist}}; \quad (10)$$

$$T_{\text{sist}} = \frac{10,08}{1,35} \approx 7,46 \text{ мин.}$$

Среднее число таможенных инспекторов, занятых обслуживанием пассажиров, рассчитываем по формуле

$$k = \frac{\lambda}{\mu} = \frac{\lambda}{\frac{1}{t_{\text{об}}}} = \frac{\lambda t_{\text{об}}}{1}; \quad (11)$$

$$k = \frac{1,35}{\frac{1}{2}} = \frac{1,35 \cdot 2}{1} = 2,7.$$

Коэффициент занятых обслуживанием таможенных инспекторов рассчитываем по формуле

$$k_{\text{otn}} = \frac{\rho}{n}; \quad (12)$$

$$k_{\text{otn}} = \frac{2,7}{3} = 0,9.$$

Абсолютную пропускную способность узла расчета принимаем равной $A = \lambda = 1,35$ (чел./мин), поскольку система массового обслуживания в рассматриваемом случае имеет неограниченную очередь. Анализ характеристик обслуживания свидетельствует о значительной перегрузке узла расчета при наличии трех таможенных инспекторов.

2. Относительная величина затрат при $n = 3$ определим по следующей формуле:

$$C_{\text{opt}} = \frac{n}{\lambda} + 3T_{\text{och}}; \quad (13)$$

$$C_{\text{opt}} = \frac{3}{1,35} + 3 \cdot 5,46 = 18,6.$$

Рассчитаем относительную величину затрат при других значениях n, приведенных в таблице.

Относительная величина затрат при *n* (количество инспекторов)

Характеристика обслуживания	Число таможенных инспекторов				
	3	4	5	6	7
Вероятность простоя таможенных инспекторов	0,025	0,057	0,065	0,067	0,067
Среднее число пассажиров в очереди	5,46	0,60	0,15	0,03	0,01
Относительная величина затрат	18,61	4,76	4,13	4,55	5,23

Как видно из таблицы, минимальные затраты получены при $n = n_{opt} = 5$ таможенных инспекторах.

Определив характеристики обслуживания узла расчета при $n = n_{opt} = 5$, получим:

$$P_{och} = 0,091;\ L_{och} = 0,198;\ T_{och} = 0,146;\ L_{sist} = 2,9;\ T_{sist} = 2,15;\ k = 2,7;\ k_{otn} = 0,54.$$

При $n = 5$ по сравнению с $n = 3$ существенно уменьшилась вероятность возникновения очереди P_{och}, длина очереди L_{och}, среднее время пребывания в очереди T_{och} и среднее число пассажиров L_{sist}, среднее время нахождения в узле расчета T_{sist}, а также доля занятых обслуживанием контролеров k. Следует отметить, что при максимальном пассажиропотоке СМО не справляется с расчетом необходимых характеристик обслуживания, т. е. в рамках модели не существует финальных вероятностей и очередь растет до бесконечности, а на практике при максимальном потоке пассажиров, когда система перегружена, таможенный контроль проводится низкого качества и длительной продолжительностью времени.

Выводы

1. В работе раскрыты поставленные задачи, смоделирована система массового обслуживания, в качестве которой выступал процесс совершения таможенных операций и таможенного контроля пассажиров [10], [11] в морском пункте пропуска.

2. При пяти одновременно обслуживающих пассажиров таможенных инспекторах по сравнению с тремя существенно уменьшилась вероятность возникновения очереди, ее длина, среднее время пребывания в очереди и среднее число пассажиров, среднее время нахождения в узле расчета, а также доля занятых обслуживанием контролеров. При этом среднее число занятых обслуживанием таможенных инспекторов и абсолютная пропускная способность узла расчета не изменились, поскольку минимальные затраты получены именно при одновременном выходе пяти должностных лиц отдела таможенного оформления и таможенного контроля.

3. Для таможенных органов эффективность и скорость проведения таможенного контроля могут быть повышены за счет снижения времени, затрачиваемого таможенными инспекторами на проверку документов, а также за счет автоматизированной проверки заявленных в них сведений с использованием ведомственного программного средства Федеральной транспортной службы России.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Кошуняева Н. В.* Сравнительный анализ методов моделирования сложных экономических систем / Н. В. Кошуняева, Н. Н. Патронова // Всероссийская научно-практическая конференция по имитационному моделированию социально-экономических систем (ВКИМСЭС). ГОУ ВПО ВЗФЭИ: тр. конф. 15 мая 2012 г. — М.: ООО «Принт-Сервис», 2012. — С. 130–133.

2. *Амосова Н. Н.* Математика. Теория массового обслуживания / Н. Н. Амосова, Ю. Д. Максимов. — СПб.: Изд-во Политех. ун-та, 2013. — 200 с.

3. *Костина А. О.* Анализ управления загруженностью должностных лиц таможенных постов / А. О. Костина // Управление экономическими системами: электронный научный журнал. — 2014. — № 1 (61). — С. 9.

4. *Кремер Н. Ш.* Высшая математика для экономистов: учебник для вузов / Н. Ш. Кремер. — 2-е изд., перераб. и доп. — М.: ЮНИТИ, 2004. — 471 с.

5. *Булгакова М. В.* Исследование операций в экономических процессах / М. В. Булгакова // Вестник Южно-Уральского государственного университета. Серия: Экономика и менеджмент. — 2013. — Т. 7. — № 4. — С. 6–8.

6. *Бормотова Е. Г.* Совершенствование механизма межведомственного взаимодействия в целях повышения эффективности реализации функций, осуществляемых таможенными органами: дис. ... канд. экон. наук: 08.00.05 / Е. Г. Бормотова. — М.: Рос. таможен. акад., 2013. — 240 с.

7. *Семенов С. С.* Совершенствование процесса таможенного оформления и таможенного оформления контроля судов загранплавания (на примере Балтийской таможни) / С. С. Семенов // Известия Российского государственного педагогического университета им. А. И. Герцена. — 2008. — № 49. — С. 179–184.

8. *Калинина О. В.* Организационно-экономический механизм совершенствования таможенного сервиса внешней торговли в условиях риска: дис. канд. экон. наук: 08.00.05 / О. В. Калинина. — СПб.: Санкт-Петербургский торгово-экономический институт, 2006. — 198 с.

9. *Понятовский В. В.* Морские порты и транспорт (эволюция) / В. В. Понятовский. — М.: МГАВТ, 2006. — 429 с.

10. *Скудалова Т. В.* Совершенствование информационного обеспечения физических лиц о таможенных правилах перемещения товаров через таможенную границу / Т. В. Скудалова // Государственное управление в XXI веке: традиции и инновации: материалы IX Международной науч. конф. на базе факультета государственного управления МГУ им. М. В. Ломоносова. — М.: ФГУ МГУ им. М. В. Ломоносова, 2011. — С. 793–800.

11. *Фетисов В. А.* Исследование и реализация оптимального варианта работы портовой логистической системы с использованием имитационных моделей систем массового обслуживания / В. А. Фетисов, Н. Н. Майоров // Эксплуатация морского транспорта. — 2012. — № 3. — С. 3–7.

REFERENCES

1. Koshunyaeva, N. V., and N. N. Patronova. “Sravnitel’nyi analiz metodov modelirovaniya slozhnykh ekonomicheskikh system.” *Vserossiiskaya nauchno-prakticheskaya konferen-tsiya po imitatsionnomu modelirovaniyu sotsial’no-ekonomicheskikh sistem (VKIMSES). GOU VPO VZFEI. Trudy konferentsii 15 maya 2012g.* M.: OOO «Print-Servis», 2012. 130–133.

2. Amosova, N. N., and Yu. D. Maksimov. *Matematika. Teoriya massovogo obsluzhivaniya*. SPb.: Izd-vo Politekh. un-ta, 2013.

3. Kostina, Anastasiia Olegovna. “Analyze of workload management of customs posts’ officials.” *Management of economic systems: scientific electronic journal* 1(61) (2014): 9.

4. Kremer, N. Sh. *Vysshaya matematika dlya ekonomistov: Uchebnik dlya vuzov.* 2-e izd., pererab. i dop. M.: YuNITI, 2004.

5. Bulgakova, Margarita Vladislavovna. “Operation research in economic processes.” *Bulletin of South Ural State University, Series “Economics and Management”* 7.4 (2013): 6–8.

6. Bormotova, E. G. Sovershenstvovanie mekhanizma mezhvedomstvennogo vzaimodeistviya v tselyakh povysheniya effektivnosti realizatsii funktsii, osushchestvlyaemykh tamozhennymi organami. PhD diss. M.: Ros. tamozhen. akad., 2013.

7. Semyonov, S. “Improvement of customs clearance and foreign shipping customs control (by the example of the Baltic custom house).” *Izvestia: Herzen University Journal of Humanities & Science* 49 (2008): 179–184.

8. Kalinina, O. V. Organizatsionno-ekonomicheskii mekhanizm sovershenstvovaniya tamozhennogo servisa vneshnei torgovli v usloviyakh riska. PhD diss. SPb.: Sankt-Peterburgskii torgovo-ekonomicheskii institut, 2006.

9. Ponyatovskii, V. V. *Morskie porty i transport (evolyutsiya)*. M.: MGAVT, 2006.

10. Skudalova, T. V. “Sovershenstvovanie informatsionnogo obespecheniya fizicheskikh lits o tamozhennykh pravilakh peremeshcheniya tovarov cherez tamozhennuyu granitsu.” *Gosudarstvennoe upravlenie v XXI veke: traditsii i innovatsii: materialy IX Mezhdunarodnoi nauchnoi konferentsii na baze fakul’teta gosudarstvennogo upravleniya MGU im. M.V. Lomonosova*. M.: FGU MGU im. M.V. Lomonosova, 2011. 793–800.

11. Fetisov, V. A., and N. N. Maiorov. “Research and realization of an optimum variant of work of port logistical system, using imitating models of systems of mass service.” *Ekspluatatsiya morskogo transporta* 3 (2012): 3–7.

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

Эглит Ян Янович —
доктор технических наук, профессор
ФГБОУ ВО «ГУМРФ имени
адмирала С. О. Макарова»
198035, Российская Федерация, Санкт-Петербург,
ул. Двинская, 5/7
e-mail: *JeglitJJ@gumrf.ru*

Цивелева Мария Андреевна —
кандидат технических наук
Санкт-Петербургский имени В. Б. Бобкова филиал
Российской таможенной академии
192241, Российская Федерация, Санкт-Петербург,
ул. Софийская, 52, лит. А
e-mail: *mciveleva@mail.ru*

INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Eglit, Yan Ya. —
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: *JeglitJJ@gumrf.ru*

Tsiveleva, Mariya A. —
PhD
Named after V.B. Bobkov St. Petersburg
branch of the Russian Customs Academy
52 Sofiiskaya Str., lit. A, St. Petersburg, 192241,
Russian Federation
e-mail: *mciveleva@mail.ru*

Статья поступила в редакцию 22 февраля 2017 г.
Received: February 22, 2017.

ВЕСТНИК
ГОСУДАРСТВЕННОГО УНИВЕРСИТЕТА
МОРСКОГО И РЕЧНОГО ФЛОТА ИМЕНИ АДМИРАЛА С. О. МАКАРОВА

DOI: 10.21821/2309-5180-2017-9-2-296-305

MODELLING OF MARINE TERMINAL GATE ON THE SIDE OF ROAD TRANSPORT

G. B. Popov

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

This paper considers issues of influence of entry gate at truck cargo front capacity on cargo terminal performance indicators. Up-to-date methods of simulation modelling are used to study this issues. Cargo terminal model in a generalized sense is developed using specialized software. General logic of model construction and its precise implementation with the selected program environment. Development is focused on the processes determinative for entry gate of a cargo terminal. Firstly, these processes consist of drawing up entry documents and sending loading orders to cargo handling zones. The process of truck inspection at the entry gates is also being modelled. Entry gates capacity for road transport depends on the number of simultaneously available slots. All the further processes within the cargo terminal are modelled in a general way. Cargo transfer occurring after the handling at handling zones is not considered. The designed model is tested by means of queueing theory, still relevant for transportation processes. [1]. To achieve this, a series of experiments is carried out. The results are compared to those of the preliminary calculations. To reveal the influence of entry gates variable attributes on cargo terminal performance indicators, yet another series of experiments is carried out. Besides the influence of actual attributes of entry gates, the influence of general factors, such as equability or irregularity of the incoming traffic flow, is considered. The results are considered in the context of relationships between a cargo terminal and a city.

Keywords: simulation modelling, adequacy proof, entry gate, truck cargo front, marine cargo terminal.

For citation:
Popov, German B. "Modelling of marine terminal gate on the side of road transport." *Vestnik Gosudarstvennogo universiteta morskogo i rechnogo flota imeni admirala S. O. Makarova* 9.2 (2017): 296–305. DOI: 10.21821/2309-5180-2017-9-2-296-305.

УДК 656.6

МОДЕЛИРОВАНИЕ ВОРОТ МОРСКОГО ТЕРМИНАЛА СО СТОРОНЫ АВТОМОБИЛЬНОГО ГРУЗОВОГО ФРОНТА

Г. Б. Попов

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

В статье рассматриваются вопросы влияния пропускной способности входных ворот автомобильного грузового фронта на показатели работы морского грузового терминала. Для изучения данных вопросов используются современные методы имитационного моделирования. При помощи специализированного программного обеспечения разработана модель грузового терминала в укрупненном виде. Рассмотрена общая логика построения модели и конкретная реализация в выбранной программной среде. Исследование сфокусировано на процессах, определяющих работу входных ворот грузового терминала. К таким процессам, в первую очередь, относится оформление документов на въезд и подача заявки в зону погрузочно-разгрузочных работ. Также моделируется процесс осуществления досмотровых операций на входных воротах. Пропускная способность входных ворот со стороны автомобильного грузового фронта зависит от количества одновременно открытых полос для досмотра транспортных средств. Дальнейшие процессы внутри грузового терминала моделируются в общем виде. Перемещения груза после обработки транспортных средств в зонах проведения погрузочно-разгрузочных работ не рассматривается. Созданная модель проверена при помощи методов теории массового обслуживания, по-прежнему являющейся актуальной для транспортных процессов [1]. С этой целью проведена серия экспериментов на модели, результаты которой сравнивались с результатами предварительных расчетов. Для выявления влияния переменных характеристик комплекса входных ворот на показатели работы терминала в целом проведена еще одна серия экспериментов. Помимо

влияния характеристик непосредственно комплекса входных ворот, рассматривается влияние общих факторов, таких как равномерность или неравномерность входящего потока транспортных средств. Результаты экспериментов рассмотрены с точки зрения взаимоотношений грузового терминала и города.

Ключевые слова: имитационное моделирование, доказательство адекватности, входные ворота, автомобильный грузовой фронт, морской грузовой терминал.

Для цитирования:
Попов Г. Б. Моделирование ворот морского терминала со стороны автомобильного грузового фронта / Г. Б. Попов // Вестник Государственного университета морского и речного флота имени адмирала С. О. Макарова. — 2017. — Т. 9. — № 2. — С. 296–305. DOI: 10.21821/2309-5180-2017-9-2-296-305.

Введение

Вопрос влияния входных ворот морского грузового терминала на общие показатели работы неоднократно обсуждался в ходе различных исследований [1] – [4]. Однако при этом он рассматривался в рамках решения конкретных, специфических задач. Следует отметить, что ряд исследований косвенно касался данного вопроса и необходимости применения современных методов имитационного моделирования, не фокусируясь на нём [5] – [7]. Очевидно, имеется необходимость в применении современных средств моделирования для создания модели, описывающей влияние пропускной способности входных ворот грузового терминала на показатели работы терминала в целом. В данном исследовании поставлена задача создать имитационную модель входных ворот грузового терминала со стороны автомобильного грузового фронта, позволяющую проанализировать влияние характеристик входных ворот на работу терминала. Моделируемый терминал рассматривается в укрупненном виде и может представлять собой морской порт. Географическое расположение терминала и его специализация в данном исследовании не рассматриваются. При разработке решения интерес представляет рассмотрение задачи именно в обобщенном виде, унифицированном для множества более конкретных задач. Поэтому процессы, протекающие непосредственно в производственных зонах грузового терминала, рассматриваются в обобщенном виде.

Общее описание модели

Наиболее эффективным способом разработки модели является использование методов имитационного моделирования. Средством создания имитационной модели выбрано приложение AnyLogic 6 (информация о лицензии: USB-ключ #00559). Выбор данного приложения основан на возможности совместной реализации различных подходов при разработке моделей [8].

На рис. 1 представлен общий вид моделируемого терминала. Количество открытых полос на воротах, парковочных мест и слотов в зонах погрузочно-разгрузочных работ (ПРР) задаются в начале прогона модели.

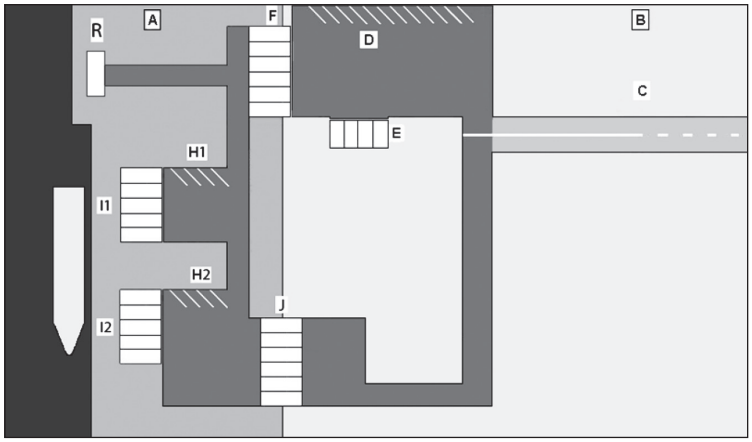


Рис. 1. Общий вид терминала: *A* — территория терминала; *B* — примыкающая городская территория; *C* — магистраль; *D* — парковка перед входными воротами; *E* — офис оформления документов; *F* — входные ворота; *I1* — зона ПРР для контейнеризированного груза; *I2* — зона ПРР для генерального груза; *H1* и *H2* — парковки перед зонами ПРР; *R* — зона оформления актов о повреждении прибывшего контейнера; *J* — выходные ворота терминала

Входящий поток транспортных средств разбивается на пять категорий: грузовые автомобили тентованные порожние, грузовые автомобили тентованные гружёные, контейнеровозы с порожним контейнером (возможно наличие повреждений на контейнере), контейнеровозы с гружёным контейнером, контейнеровозы без контейнера. Доли каждой категории в общем потоке транспортных средств задаются в начале прогона модели. Моделируемый период времени выбран равным 90 дней.

Разработка модели

Описанный выше моделируемый грузовой терминал представляет собой сложную систему массового обслуживания. Транспортные средства в системе представляют собой заявки, имеющие набор характеристик. Разработка модели осуществляется посредством выстраивания логической цепочки элементов, каждый из которых симулирует определенное поведение. Заявка, генерируемая в элементе-источнике, проходит по цепочке элементов определенным образом и выводится из системы в элементе *sink*.

Набор переменных, которые несет в себе заявка, характеризует принадлежность транспортного средства к одной из вышеуказанных категорий, наличие повреждений контейнерного оборудования, а также фиксирует время прохождения заявки через элементы модели и порядковый номер заявки, что необходимо для сбора статистики.

Логическая структура модели представлена на рис. 2. Необходимо отметить, что большинство элементов модели являются подсистемами элементов, работающими как единое целое. Это означает, что все элементы, входящие в такую подсистему, имеют идентичные параметры и пропускают через себя поток заявок как один элемент логической цепочки. Примером может служить элемент, моделирующий входные ворота терминала *F*. Помимо задержки транспортного средства на время досмотра, он осуществляет разделение потока транспортных средств по категориям и отправляет их в соответствующие зоны обработки.

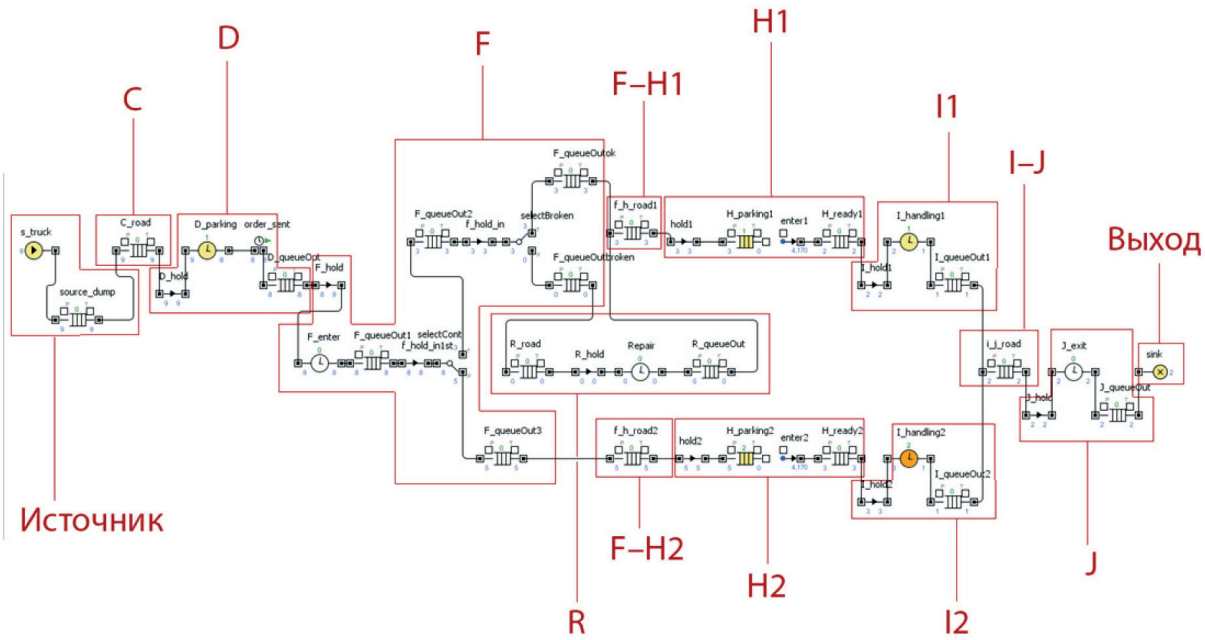


Рис. 2. Логическая структура модели:
H1 и *H2* — парковки перед зонами ПРР; *I1* — зона ПРР для контейнеризированного груза;
I2 — зона ПРР для генерального груза;
F–H1, *F–H2* и *I–J* — буферные дороги внутри терминала; *J* — выходные ворота

При наличии одной логической цепочки модель являлась бы саморегулирующейся системой, невосприимчивой к внешней среде, в которой она находится. Однако в реальности на такую

систему оказывают влияние внешние воздействия, она должна иметь определенный набор изменяемых исходных параметров, а также выводить статистику, основанную на собственной деятельности. В целях реализации такого механизма, во-первых, используется набор переменных, содержащих в себе параметры моделируемой системы. Во-вторых, вводятся события, оказывающие внешние воздействия на состояние системы. В-третьих, разрабатываются функции, используемые для получения статистических данных на основе работы моделируемой системы. Данный принцип наглядно представлен на рис. 3.

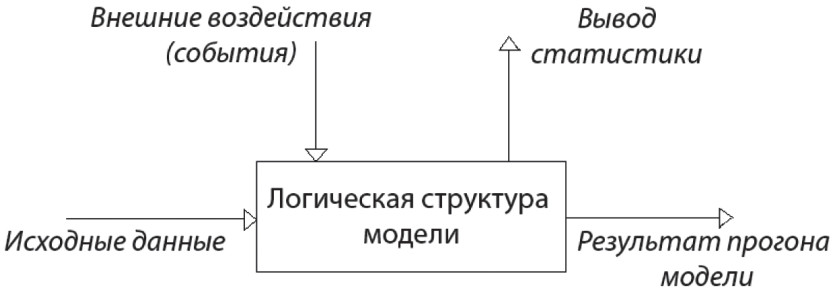


Рис. 3. Общий принцип работы модели

Использованные наборы переменных, событий и функций при разработке модели представлены на рис. 4. Первый сегмент блока «Переменные» хранит в себе исходные данные, вводимые в начале прогона модели, второй сегмент используется для вычисления и выведения статистики, третий сегмент (начиная с переменной *k_distort*) представляет собой вспомогательные переменные. События делятся на *циклические* и *нециклические*. Первое событие в списке присваивает значения исходных данных параметрам логических элементов модели при запуске, срабатывает один раз и является нециклическим. Остальные события — циклические. Средний сегмент блока «События» используется для вычисления статистики, верхний обеспечивает корректную работу логических элементов внутритерминальных парковок, последнее событие включает разделение интенсивности входящего потока транспортных средств на ночную и дневную. В блоке «Функции» первая функция в списке используется для обновления данных в течение прогона модели, вторая — для сбора статистики, третья — вспомогательная.

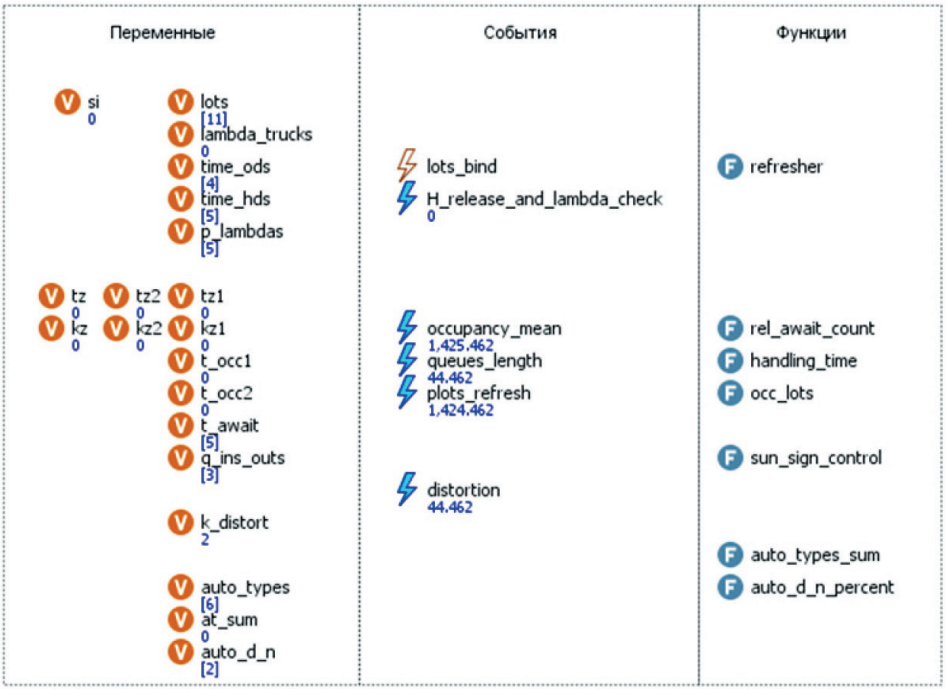


Рис. 4. Переменные, события и функции, использованные при разработке модели

В модели используется один элемент-источник, генерирующий различные категории входящих заявок, характеристики которых отличаются. В связи с этим возникла необходимость разработки механизма разделения единого потока заявок на категории, наглядное представление реализации которого приведено на рис. 5. Некоторому числу X присваивается случайное значение в промежутке между числами 0 и 100, распределенное по равномерному закону. Переменным x_1, x_2, x_3, x_4 присваиваются значения, равные долям каждой категории транспортных средств в общем потоке транспортных средств, поступающих на терминал. Значение доли пятой (последней) категории является разностью между числом 100 и суммой первых четырех переменных. Входящей заявке (транспортному средству) будет присвоена категория в зависимости от того, на какой из отрезков, приведенных на рис. 5, попало значение переменной X.

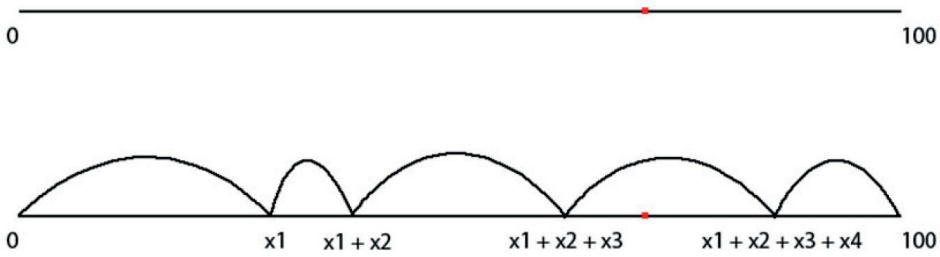


Рис. 5. Разделение входящего потока заявок на категории

Проверка адекватности модели

С точки зрения теории массового обслуживания (ТМО) моделируемый терминал представляет собой многоканальную многофазную систему массового обслуживания [9]. Количество каналов в каждой фазе обслуживания регулируется исходными данными, вводимыми в начале прогона модели. Схема терминала как системы массового обслуживания приведена на рис. 6, где λ — интенсивность входящего потока транспортных средств, μ_E — интенсивность потока обработки заявок в офисе перед въездом (величина, обратная времени, затрачиваемому на обработку одной заявки на въезд), μ_F — интенсивность потока обработки транспортных средств на входных воротах терминала (величина, обратная времени, затрачиваемому на досмотр), μ_I — интенсивность потока обработки транспортных средств в зоне проведения погрузочно-разгрузочных работ (величина, обратная времени, затрачиваемому на погрузку или разгрузку одного транспортного средства), μ_J — интенсивность потока обработки транспортных средств на выезде из терминала (величина, обратная времени, затрачиваемому на досмотр, равна μ_F).

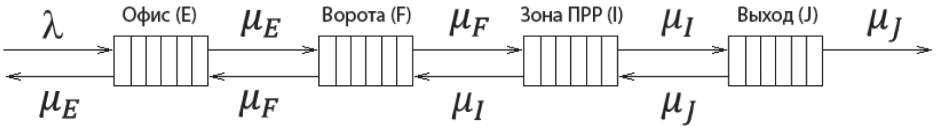


Рис. 6. Терминал как система массового обслуживания

Критическим показателем работоспособности системы массового обслуживания является приведенная интенсивность потока заявок, выражающая среднее число заявок, приходящих за среднее время обработки одной заявки, и вычисляемая по формуле

$$r = \frac{\lambda}{\mu},$$

где λ — интенсивность входящего потока заявок; μ — интенсивность потока обработки заявок.

Поскольку система многофазная, её общая интенсивность потока обработки равна интенсивности потока обработки наименее производительного элемента [9]. Таким элементом может являться любой из приведенных на рис. 6 элементов, однако в действительности наиболее вероят-

но, что этим элементом будет являться зона проведения погрузочно-разгрузочных работ как самая трудозатратная.

При $r > 1$ система является нестабильной, размер очереди заявок на входе стремится к бесконечности, коэффициент занятости всех каналов равен единице. При $r < 1$ система является стабильной, размер очереди заявок колеблется около некоторого значения, коэффициент занятости всех каналов меньше единицы. Очевидно, что критической точкой стабильности для любой системы массового обслуживания является соотношение входящего потока и потока обслуживания, при котором $r = 1$ [9].

Для проверки модели на адекватность был проведен ряд экспериментов. В рамках экспериментов значения приведенной интенсивности потока заявок r, рассчитанной с помощью ТМО, сравнивались со средним значением коэффициента занятости зоны погрузочно-разгрузочных работ за несколько прогонов ($k^I_{\text{зан}}$), вычисляемым при моделировании при одних и тех же исходных данных. Результаты проверки приведены в табл. 1.

Таблица 1

Результаты проверки модели

Предварительный расчет			Результат работы модели		
λ, а/м в сут	μ, а/м в сут	r	λ, а/м в сут	μ, а/м в сут	$k^I_{\text{зан}}$
12	72	0,1667	12	72	0,1621
24	72	0,3333	24	72	0,3254
36	72	0,5	36	72	0,5008
48	72	0,6667	48	72	0,6750
60	72	0,8333	60	72	0,8429
72	72	1	72	72	0,9955

Полученные результаты позволяют сделать вывод о корректности работы модели и рассматривать более сложные ситуации, которые невозможно рассчитать с помощью ТМО.

Проведение экспериментов на модели

В ходе проведения ряда экспериментов были выявлены некоторые закономерности, касающиеся в первую очередь влияния характеристик входных ворот грузового терминала на общие показатели его работы. Основные показатели работы терминала были выбраны в соответствии с рекомендациями Конференции ООН по торговле и развитию (ЮНКТАД) [10], [11]. На рис. 7 приведено сравнение результатов прогона модели при одних и тех же исходных данных, но разных количествах открытых полос на пропускном пункте входных ворот. В первом случае (рис. 7, *а*) открыты все шесть доступных полос для досмотра входящих транспортных средств, во втором случае (рис. 7, *б*) открыта только одна полоса. Интенсивность входящего потока выбрана так, чтобы обеспечить высокую нагрузку на грузовой терминал.

Из полученных результатов следует, что пропускная способность входных ворот не влияет на коэффициент занятости зоны ПРР и время относительного ожидания, поскольку наибольшие временные затраты на обработку транспортного средства приходятся непосредственно на эту зону, которая следует в цепочке за входными воротами. Однако количество открытых полос непосредственно влияет на длину очереди перед воротами терминала (рис. 8). Очевидно, что открытие дополнительных полос на входных воротах позволяет справиться с проблемой очередей перед входными воротами, но не влияет на работу самого терминала.

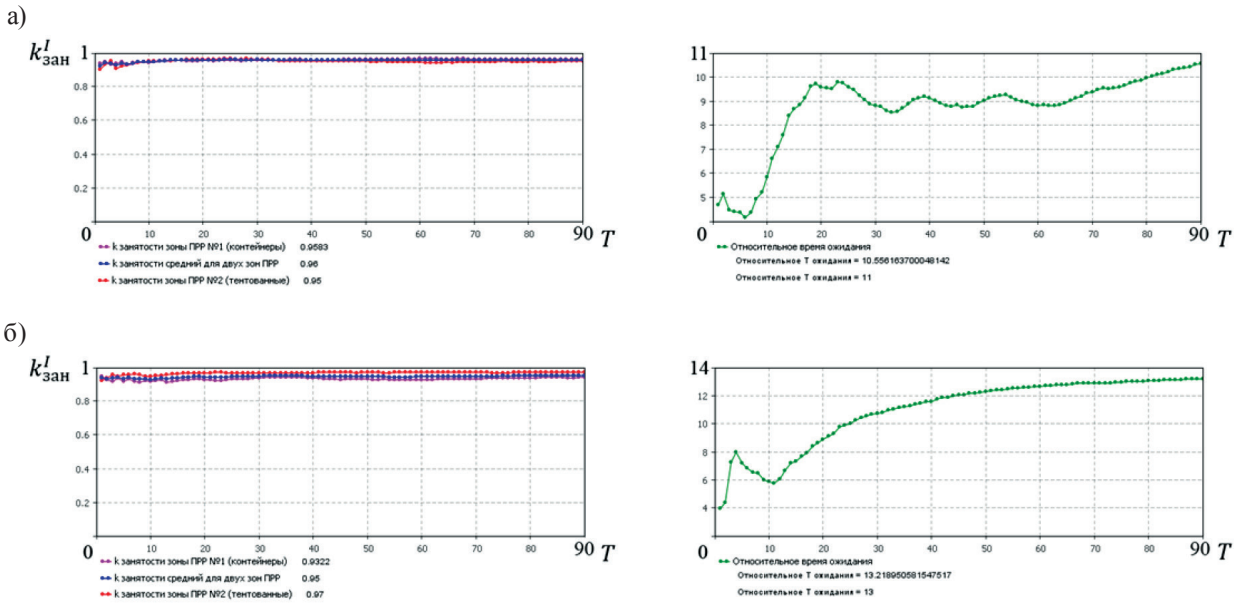


Рис. 7. Сравнение коэффициента занятости зоны ПРР
и времени относительного ожидания на входных воротах терминала:
а — при шести открытых полосах; *б* — при одной открытой полосе

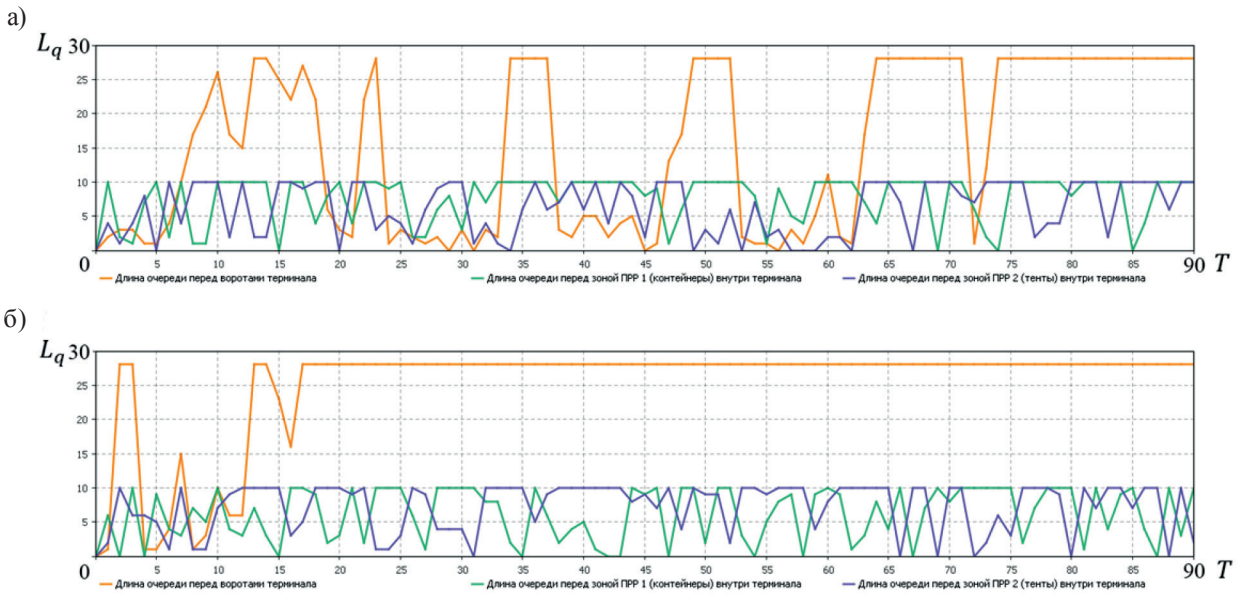


Рис. 8. Сравнение динамики изменения длин очередей
на входных воротах терминала:
а — при шести открытых полосах; *б* — при одной открытой полосе
Условные обозначения: оранжевая линия — длина очереди перед воротами терминала;
синяя линия — длина очереди перед зоной ПРР для контейнеризированного груза;
зеленая линия — длина очереди перед зоной ПРР для генерального груза

При введении исходных данных имеется возможность *включить* или *выключить* колебания входящего транспортного потока в зависимости от времени суток. Сравнив результаты прогона модели с равномерным входящим потоком (рис. 9, *а*) и потоком, делящимся по интенсивности на *ночной* и *дневной* (рис. 9, *б*), можно сделать вывод о том, что использование функции неравномерности входящего потока транспортных средств позволяет смоделировать ситуацию, приближенную к реальности, в которой колебания длины очереди перед терминалом обусловлены низкой интенсивностью потока ночью и высокой — днем.

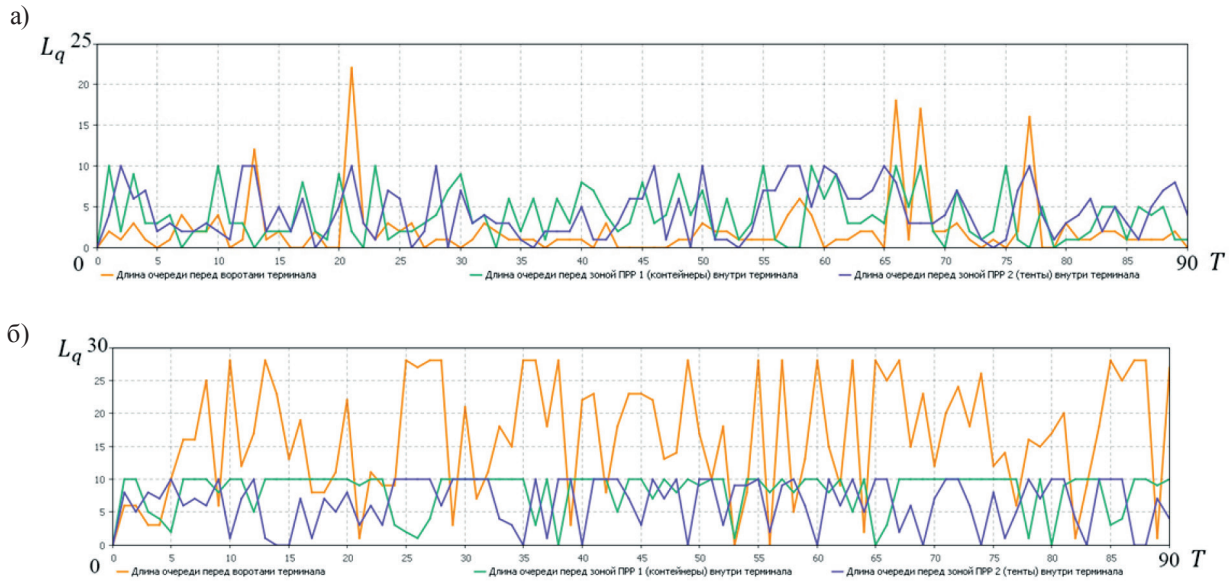


Рис. 9. Сравнение динамики изменения длин очередей при равномерном (*а*) и неравномерном (*б*) входящем потоке

Также было проведено исследование влияния времени, затрачиваемого на оформление и подачу заявки на проведение ПРР и на работу системы. Полученные результаты приведены в табл. 2, откуда следует, что время оформления заявки не влияет на коэффициент занятости зоны ПРР, но влияет на время относительного ожидания и длины очередей внутри терминала перед зоной ПРР.

Таблица 2

Показатели работы грузового терминала

λ, а/м в сут	μ, а/м в сут	$T_{заявки}$, мин	$k^{1}_{зан}$	$T_{отн.ожид}$, мин	$L_q^{ПРР}$	$L_q^{вх.ворота}$
36	72	7	0,5181	0,75	0,44	0,121
36	72	15	0,4904	1,1	0,495	0,088
36	72	20	0,5127	1,4	0,692	0,099
36	72	30	0,5023	1,91	0,846	0,176
60	72	7	0,8280	2,84	2,374	0,253
60	72	15	0,8343	2,99	2,429	0,297
60	72	20	0,8326	3,21	2,681	0,286
60	72	30	0,8513	4,6	4,022	0,374

В соответствии с результатами экспериментов можно сделать вывод о том, что характеристики входных ворот влияют в первую очередь на внешнюю составляющую работы терминала. Действительно, пропускная способность входных ворот мало сказывается на занятости зоны ПРР, поскольку этот показатель главным образом зависит от производительности зоны и интенсивности входящего потока транспортных средств. Однако пропускная способность входных ворот может играть серьезную роль во взаимоотношениях администрации грузового терминала и городских властей.

Как видно из результатов экспериментов, малая пропускная способность входных ворот может явиться причиной возникновения скопления транспортных средств перед воротами с последующим их скоплением на прилежащих к терминалу дорожных путях. При невозможности поставить транспортное средство на парковку *D* перед воротами терминала водители будут за-

нимать обочину либо крайнюю полосу близлежащей магистрали *C*, что может создавать заторы в дорожном движении. Открытие дополнительных полос на входных воротах позволяет решить эту проблему, в то время как сокращение времени обработки заявок на произведение ПРР на терминале позволяет сокращать внутритерминальные очереди.

Выводы

1. Разработана и описана имитационная модель входных ворот морского грузового терминала со стороны автомобильного грузового фронта. Модель создана при помощи специализированного программного обеспечения, предназначенного для целей имитационного моделирования.

2. Адекватность модели доказана при помощи методов теории массового обслуживания. Для подтверждения адекватности была проведена серия экспериментов на модели, результаты которых совпали с результатами расчетов.

3. При помощи модели проанализировано влияние некоторых характеристик входных ворот терминала на показатели работы терминала в целом. Выявлено, что не все характеристики одинаково влияют на работу терминала. Помимо непосредственно характеристик входных ворот терминала, на его работу также влияют характеристики входящего потока транспортных средств, например, его равномерность или неравномерность.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Arita C.* The dynamics of waiting: the exclusive queueing process / C. Arita, A. Schadschneider // Transportation Research Procedia. — 2014. — Vol. 2. — Pp. 87–95. DOI: 10.1016/j.trpro.2014.09.012.

2. *Guan C.* Container terminal gate appointment system optimization / C. Guan, R. R. Liu // Maritime Economics & Logistics. — 2009. — Vol. 11. — Is. 4. — Pp. 378–398. DOI: 0.1057/mel.2009.13.

3. Özkan *E. D.* Capacity analysis of RO-RO terminals by using simulation modeling method / E. D. Özkan, S. Nas, N. Güler // The Asian Journal of Shipping and Logistics. — 2016. — Vol. 32. — Is. 3. — Pp. 139–147. DOI: 10.1016/j.ajsl.2016.09.002.

4. *Selinka G.* Time-dependent performance approximation of truck handling operations at an air cargo terminal / G. Selinka, A. Franz, R. Stolletz // Computers & Operations Research. — 2016. — Vol. 65. — Pp. 164–173. DOI: 10.1016/j.cor.2014.06.005.

5. *Кузнецов А. Л.* Генезис имитационного моделирования в ходе развития методов технологического развития проектирования портов и терминалов / А. Л. Кузнецов // Эксплуатация морского транспорта. — 2009. — № 4. — С. 3–7.

6. *Кузнецов А. Л.* Классификация и функциональное моделирование эшелонированных контейнерных терминалов / А. Л. Кузнецов, А. В. Кириченко, А. А. Давыденко // Вестник Государственного университета морского и речного флота имени адмирала С. О. Макарова. — 2015. — № 6 (34). — С. 7–16.

7. *Кузнецов А. Л.* Моделирование сетей контейнерного грузораспределения / А. Л. Кузнецов, С. С. Павленко, В. Н. Щербакова-Слюсаренко // Вестник Государственного университета морского и речного флота имени адмирала С. О. Макарова. — 2015. — № 5 (33). — С. 33–42.

8. *Куприяшкин А. Г.* Основы моделирования систем: учеб. пособие / А. Г. Куприяшкин. — Норильск: НИИ, 2015. — 135 с.

9. *Павский В. А.* Теория массового обслуживания: учеб. пособие / В. А. Павский. — Кемерово: Кемеровский технологический институт пищевой промышленности, 2008. — 116 с.

10. Port development. — New York: UNCTAD, 1985. — 228 p.

11. Port performance indicators. — Geneva: UNCTAD, 1978. — 24 p.

REFERENCES

1. Arita, Chikashi, and Andreas Schadschneider. “The dynamics of waiting: the exclusive queueing process.” *Transportation Research Procedia* 2 (2014): 87–95. DOI: 10.1016/j.trpro.2014.09.012.

2. Guan, Changqian, and Rongfang Rachel Liu. “Container terminal gate appointment system optimization.” *Maritime Economics & Logistics* 11.4 (2009): 378–398. DOI: 0.1057/mel.2009.13.

3. Özkan, Emin Deniz, Selçuk Nas, and Nil Güler. "Capacity Analysis of Ro-Ro Terminals by Using Simulation Modeling Method." *The Asian Journal of Shipping and Logistics* 32.3 (2016): 139–147. DOI: 10.1016/j.ajsl.2016.09.002.

4. Selinka, Gregor, Axel Franz, and Raik Stolletz. "Time-dependent performance approximation of truck handling operations at an air cargo terminal." *Computers & operations research* 65 (2016): 164–173. DOI: 10.1016/j.cor.2014.06.005.

5. Kuznetsov, A. L. "Genesis of the agent simulation in development of methods of technological design of ports and terminals." *Jekspluatacija morskogo transporta* 4 (2009): 3–7.

6. Kuznetsov, Aleksandr Lvovich, Aleksandr Viktorovich Kirichenko, and Aleksandr Aleksandrovich Davydenko. "Classification and functional modeling of echeloned container terminals." *Vestnik Gosudarstvennogo universiteta morskogo i rechnogo flota imeni admirala S.O. Makarova* 6(34) (2015): С. 7–16.

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

8. Kupriyashkin, A. G. *Osnovy modelirovaniya sistem: ucheb. posobie*. Noril'sk: NII, 2015.

9. Pavskii, V. A. *Teoriya massovogo obsluzhivaniya: uchebnoe posobie*. Kemerovo: Kemerovskii tekhnologicheskii institut pishchevoi promyshlennosti, 2008.

10. *Port development*. New York: UNCTAD, 1985.

11. *Port performance indicators*. Geneva: UNCTAD, 1978.

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРЕ

Попов Герман Борисович — аспирант
Научный руководитель:
Кузнецов Александр Львович —
доктор технических наук, профессор
ФГБОУ ВО «ГУМРФ имени
адмирала С. О. Макарова»
198035, Российская Федерация, Санкт-Петербург,
ул. Двинская, 5/7
e-mail: *german_bp@mail.ru*, *kaf _pgt@gumrf.ru*

INFORMATION ABOUT THE AUTHOR

Popov, German B. — Postgraduate
Supervisor:
Kuznetsov Aleksandr Lvovich —
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: *german_bp@mail.ru*, *kaf _pgt@gumrf.ru*

Статья поступила в редакцию 15 марта 2017 г.
Received: March 15, 2017.

ВЕСТНИК
ГОСУДАРСТВЕННОГО УНИВЕРСИТЕТА
МОРСКОГО И РЕЧНОГО ФЛОТА ИМЕНИ АДМИРАЛА С. О. МАКАРОВА

DOI: 10.21821/2309-5180-2017-9-2-306-322

ENVIRONMENTAL PERFORMANCE OF INLAND NAVIGATION VESSELS

A. V. Soloviev

The Federal Autonomous Institute Russian River Register Upper Volga Branch-Office,
Nizhniy Novgorod, Russian Federation

The article examines the issues and problems of environmental safety of inland navigation vessels associated with the absence of a definition of "environmental efficiency" and methods of its calculation. Given a description of the physical meaning of the concept "eco-efficiency" taking into account the specifics of the issue and proposed the idea of ecological efficiency as the probability of preventing possible harmful effects on the environment waste men on the ship and inevitable in the operation of technical means and equipment loss production environments and products of incomplete combustion. The proposed quantitative measure of eco-efficiency, which is dimensionless or percentage measure to prevent harm to the environment caused by waste that include oily (bilge) water, sewage (plumbing) water, garbage, atmospheric emissions of harmful substances from the exhaust (exhaust) gases, noise. Proposed system description of indicator as a function of the partial indicators of ecological efficiency, taking into account the degree of influence (importance) of each particular indicator. The necessity of applying the principles of system approach (the hierarchy of knowledge integration and formalization) and discussed signs of consistency with respect to model pollution prevention the operation of vessels on inland waterways. In the proposed method of determining the index of environmental efficiency of the vessel and its components put a linear strategy of "convolution" of the partial indicators in additive integral index, which is a generalized estimation of the considered vessel. Developed and scientifically-grounded method of determination of indicator environmental efficiency of inland navigation vessels, which ensures fulfillment of requirements of technical regulations "About safety of objects of inland waterway transport".

Keywords: ecological efficiency, inland vessels, methods of assessment, technical regulations

For citation:
Soloviev, Alexey V. "Environmental performance of inland navigation vessels." *Vestnik Gosudarstvennogo universiteta morskogo i rechnogo flota imeni admirala S. O. Makarova* 9.2 (2017): 306–322. DOI: 10.21821/2309-5180-2017-9-2-306-322.

УДК 504:629.122

МЕТОДИКА ОЦЕНКИ ЭКОЛОГИЧЕСКОЙ ЭФФЕКТИВНОСТИ СУДОВ ВНУТРЕННЕГО ПЛАВАНИЯ

А. В. Соловьев

ФАУ «Российский Речной Регистр» Верхне-Волжский филиал
Российского Речного Регистра, Нижний Новгород, Российская Федерация

В статье рассмотрены вопросы и проблемы обеспечения экологической безопасности судов внутреннего плавания, связанные с отсутствием определения понятия «экологическая эффективность» и методик ее расчета. Приведено описание физического смысла понятия «экологическая эффективность» с учетом специфики рассматриваемого вопроса и предложено представление экологической эффективности как вероятности предотвращения возможного вредного воздействия на окружающую среду отходов жизнедеятельности людей на судне и неизбежных при эксплуатации технических средств и оборудования потерь рабочих сред и продуктов неполного сгорания топлива. Предложен количественный показатель экологической эффективности, который является безразмерной или процентной мерой предотвращения вреда, наносимого окружающей среде отходами, к которым относятся нефтесодержащие (льяльные) воды, сточные (сточно-фановые) воды, мусор, выбросы в атмосферу вредных веществ с выпускными (отработавшими) газами, шум. Предложено системное описание показателя как функции частных показателей экологической эффективности с учетом степени влияния (важности) каждого частного показателя. Показана необходимость применения принципов системного подхода (иерархичности познания, интеграции и формализации) и рассмотрены признаки системности применительно

к исследуемой модели предотвращения загрязнений при эксплуатации судов на внутренних водных путях. В основу предлагаемого метода определения показателя экологической эффективности судна и его составных частей положена линейная стратегия «свертки» частных показателей в аддитивный интегральный показатель, являющийся обобщенной оценкой рассматриваемого судна. Разработана и научно обоснована методика определения показателя экологической эффективности судов внутреннего плавания, которая обеспечивает выполнение требований технического регламента «О безопасности объектов внутреннего водного транспорта».

Ключевые слова: экологическая эффективность, суда внутреннего плавания, методика оценки, технический регламент.

Для цитирования:
Соловьев А. В. Методика оценки экологической эффективности судов внутреннего плавания / А. В. Соловьев // Вестник Государственного университета морского и речного флота имени адмирала С. О. Макарова. — 2017. — Т. 9. — № 2. — С. 306–322. DOI: 10.21821/2309-5180-2017-9-2-306-322.

Введение

На современном этапе развития флота значительное внимание уделяется охране окружающей среды. Поэтому вопросы и проблемы экологической безопасности судов внутреннего плавания нашли широкое отражение в работах отечественных и зарубежных ученых, которые предложили целый ряд показателей экологической безопасности судоходства (риски эксплуатационного и аварийного загрязнения окружающей среды [1] – [3], ожидаемый ущерб [4] – [6], оценки вероятности загрязнения [7] – [9] и ущерба отдельных компонентов природной среды [10] – [12], а также оценки размера вреда [13] – [15]).

Большое количество работ посвящено вопросам оценки рисков возникновения и последствий загрязнения окружающей среды, в том числе в результате транспортных происшествий на водном транспорте [2] – [4], и содержат оценки вероятностей эксплуатационных происшествий и аварий [13], [15]. Значительный интерес представляет работа [14], в которой выполнена количественная оценка размера вреда от компонентов судна различного класса опасности (в том числе нефтесодержащими (льяльными) водами, сточными (сточно-фановыми) водами, мусором) и предложен способ косвенного определения размера вреда по его типовым характеристикам. В работе [11] приведены результаты статистических исследований параметров воздействия на окружающую среду при взрывном горении на танкерах как географически ориентированных случайных величин и разработана матрица выбора типа взрывного процесса на танкерах в зависимости от степени опасности для окружающей среды. В работе [7] рассматриваются вопросы прогнозирования загрязнения акваторий с объектов транспортного комплекса с применением современных информационных технологий и предложена оригинальная методика оценки параметров загрязнения, которая обеспечивает достаточно высокую точность оценки параметров загрязнения и формирование необходимой для этого выборки «сценариев» моделирования. Однако результаты выполненных исследований, которые могут быть полезны преимущественно при создании документов, разрабатываемых в рамках Единой государственной системы предупреждения и ликвидации чрезвычайных ситуаций (планов локализации и ликвидации разливов нефти, деклараций промышленной безопасности), проведении тренажерной подготовки персонала [3], [4], [7], [8], не содержат комплексных оценок экологической эффективности судов внутреннего плавания.

Актуальность исследований

Актуальность исследований подтверждается выходом технического регламента «О безопасности объектов внутреннего водного транспорта», «Основ государственной политики в области экологического развития Российской Федерации на период до 2030 года», государственной программы Российской Федерации «Охрана окружающей среды на 2012 – 2020 годы» и других нормативных документов, посвященных развитию транспортной отрасли и обеспечению ее экологической безопасности [7]. В техническом регламенте «О безопасности объектов внутреннего водного транспорта» регламентируется значение экологической эффективности судов и объектов инфра-

структуры этого вида транспорта. Так, в п. 215 данного нормативного документа регламентировано значение экологической эффективности «… *в том числе путем установки на суда и судовые технические средства оборудования и средств экологической безопасности, не ниже 50 %*», а в п. 435 указано, что проектанты и строители (изготовители) объектов регулирования, указанных в пп. «в» п. 5 этого же документа, должны предусмотреть меры по обеспечению «… *экологической эффективности, в том числе путем установки на объекты регулирования оборудования и средств экологической безопасности и применения экологически безопасных технологий строительства (изготовления) объектов регулирования, — не ниже 50 %*».

Таким образом, понятие «экологическая эффективность» не определено и методика расчета экологической эффективности не создана ни в масштабах отрасли, ни в масштабах страны. Применительно к загрязнению водной среды с судов отчасти это объясняется тем, что законодательством Российской Федерации не допускается сброс во внутренние водные пути неочищенных нефтесодержащих вод и неочищенных и необеззараженных сточных вод, а также мусора. Если добавить к этому редкую практику установки на судах внутреннего плавания фильтрующего оборудования для нефтесодержащих вод, сигнализатора, системы сброса очищенных нефтесодержащих вод автоматическим устройством, прекращающим сброс нефтесодержащих вод при превышении нормативного значения содержания нефти в сбросе Правила Российского Речного Регистра требуют установки указанного оборудования в случае, когда сборная цистерна нефтесодержащих вод не обеспечивает необходимой автономности плавания по условиям экологической безопасности), то действительность выглядит следующим образом: нефтесодержащие воды, нефтяные остатки и осадки, мусор в водную среду не сбрасываются, а лишь накапливаются в специальных емкостях на судне и по мере возможности сдаются на специализированные внесудовые водоохранные средства. Правила Российского Речного Регистра требуют установки на судах с экипажем станции очистки и обеззараживания сточных вод только в том случае, когда сточно-фановая система судна и предусмотренная на судне сборная цистерна для сточных вод не обеспечивают необходимой автономности плавания по условиям экологической безопасности. Следовательно, и в этом случае сброс неочищенных и необеззараженных сточных вод в водную среду отсутствует.

Несмотря на позитивные решения в отношении загрязнения водной среды, воздушная среда (атмосфера) загрязняется с судов твердыми частицами, окислами азота NO_x, оксидом углерода CO, суммарными углеводородами CH, парниковым газом CO_2 в результате эксплуатации судовых дизелей, котла и печи-инсинератора и это загрязнение тем больше, чем меньше на судне уделяется внимание регулировке рабочего процесса и нейтрализации выпускных газов дизелей, улавливанию частиц несгоревшего топлива и твердых включений топлива в выпускных трубопроводах котлов и инсинераторов.

Правила Российского Речного Регистра нормируют содержание в выпускных газах NO_x, CH, CO и дымность выпускных (отработавших) газов, но воздушная среда в той или иной степени все равно загрязняется при работе дизелей, котлов и инсинераторов. Считается, что при соответствии выбросов в выпускных газах дизелей установленным нормам загрязнение атмосферы настолько несущественно, что и бороться с этим не нужно, так как предотвратить этот процесс невозможно. При оценивании экологической эффективности судов преимущество должны получать суда с максимально возможной автономностью плавания по условиям экологической безопасности (с большей емкостью сборных цистерн и емкостей для мусора или с установленными на них средствами предотвращения загрязнения окружающей среды), а также те, для которых уровни выбросов в атмосферу более низкие по сравнению с конкурентами.

Процесс и результаты исследования

Физический смысл понятия «экологическая эффективность». В контексте технического регламента экологическая эффективность, как и всякая другая, могла пониматься как отношение полезного эффекта (в данном случае природоохранного) к затраченным на производство этого эффекта ресурсам, выраженным в тех же единицах измерения, что и полезный эффект. Учитывая

специфику рассматриваемого вопроса, можно представить также экологическую эффективность как отношение природоохранного эффекта к эффекту загрязнения окружающей среды в том случае, если бы меры по предотвращению ее загрязнения не были приняты.

Любое из указанных ранее представлений об экологической эффективности позволяет сделать вывод о том, что количественная мера экологической эффективности является показателем экологической эффективности и последний должен быть безразмерным параметром, значение которого меньше единицы, но стремится к ней, или при умножении на 100 % быть выражен в процентах (быть менее 100 %, но стремиться к этому пределу).

Измерение полезного природоохранного эффекта и даже определение этого понятия достаточно затруднительно. Природоохранный эффект в результате применения оборудования и средств предупреждения загрязнения окружающей среды с судна может быть выражен в каких-либо условных или уже используемых единицах загрязнения окружающей среды в том случае, когда ничем не сдерживаемое загрязнение окружающей среды отходами жизнедеятельности людей на судне, эксплуатации технических средств и оборудования удалось бы описать в тех же условных или уже используемых единицах. Однако все осложняется еще и тем, что различные отходы (загрязнения) имеют разную физическую природу и их количественные меры имеют различные единицы измерения. Поэтому, видимо, не следует ориентироваться на приведенные ранее описания понятия и представить экологическую эффективность как вероятность предотвращения возможного вредного воздействия на окружающую среду отходов жизнедеятельности людей на судне и неизбежных при эксплуатации технических средств и оборудования потерь рабочих сред и продуктов неполного сгорания топлива. В этом случае показатель экологической эффективности также должен быть описан в указанных выше числовых границах, т. е. если рассчитанное значение показателя экологической эффективности окажется близким к единице (к 100 %), например, 0,95 (95 %), то вероятность предотвращения вредного воздействия судна на окружающую среду будет считаться высокой, а если близким к нулю, например, 0,1 – 0,2 (10 – 20 %), — низкой.

Показатель экологической эффективности с позиций исследования операций. В соответствии с ранее приведенными обоснованиями экологическая эффективность как понятие призвана оценивать вероятность предотвращения возможного вредного воздействия на окружающую среду отходов жизнедеятельности людей на судне и неизбежных при эксплуатации технических средств и оборудования потерь рабочих сред и продуктов неполного сгорания топлива. Количественная мера экологической эффективности, а именно показатель экологической эффективности, должен быть безразмерной или процентной мерой предотвращения вреда, наносимого окружающей среде указанными выше отходами и загрязнениями. К таким отходам относятся нефтесодержащие (льяльные) воды, сточные (сточно-фановые) воды, мусор, выбросы в атмосферу вредных веществ с выпускными (отработавшими) газами, шум. Чем более показатель экологической эффективности приближается к единице, т. е. к 100 %, тем в большей степени предотвращается вред, который мог бы быть нанесен судном окружающей среде.

Определение показателя экологической эффективности судов, безусловно, следует отнести к сложным задачам, так как подобные задачи обычно связаны с математическим описанием сложных явлений, ситуаций или объектов. В данном случае целесообразно рассматривать показатель экологической эффективности не как явление или ситуацию, а как модель предотвращения загрязнений, которую можно считать сложным объектом, поскольку она может быть скомпонована из нескольких составных частей, характеризующих разные стороны описываемого процесса. Условно можно допустить, что эти части находятся в отношениях взаимосвязи и соподчинения. Тогда модель описания предотвращения загрязнений можно считать объектом с распределенной структурой. Трудности создания модели, т. е. математического описания процессов предотвращения загрязнения окружающей среды различной физической природы, можно преодолеть с помощью методов исследования операций, которые оказываются эффективными в случаях, когда использование традиционных математических методов не дает нужного результата (метод, используемый для описания показателя экологической эффективности, разработанный П. И. Бажаном).

Если представить создаваемую модель предотвращения загрязнений объектом с распределенной структурой в виде системы, удовлетворяющей набору определенных признаков, то для решения сформулированной ранее задачи может быть использован научный метод, получивший название *системного подхода*, представляющего собой одну из форм методологического знания, связанную с исследованием и созданием объектов как систем. Системные принципы нашли широкое применение в различных сферах теоретической мысли. Опубликовано значительное число работ, в которых выполнено исследование роли и места системного подхода в ряду других методологических концепций: устанавливаются особенности и направления практической реализации системного подхода, рассматриваются математические методы и аппарат, уровни изучения систем и т. п. Однако исчерпывающую характеристику этих вопросов дать еще сложно. Можно лишь рассчитывать на некоторую полноту освещения тех сторон, которые наиболее тесно связаны с задачами системотехники.

Одним из принципов системного подхода является *принцип иерархичности познания*, требующий трехуровневого изучения предмета: 1-й уровень — изучение самого предмета — «собственный» уровень; 2-й уровень — изучение этого же предмета как элемента более широкой системы — «вышестоящий» уровень; 3-й уровень — изучение этого предмета в соотношении с составляющими данный предмет компонентами — «нижестоящий» уровень.

Еще один принцип — *принцип интеграции* — отражает особенность системного подхода, заключающуюся в том, что он направлен на изучение интегративных свойств и закономерностей систем и комплексов систем, раскрытие базисных механизмов интеграции целого. И, наконец, *принцип формализации* показывает, что системный подход направлен на получение количественных характеристик, создание методов, сужающих неоднозначность понятий, определений, оценок и т. п.

Рассмотрим теперь признаки «системности» и оценим возможность удовлетворения этим признакам объекта «модель предотвращения загрязнений», обычно представляемого в виде системы. К характерным признакам систем, к которым можно применить системный подход, относятся следующие.

1. *Наличие определенного числа взаимосвязанных между собой подсистем* (составных частей системы). Расчленение системы на подсистемы (декомпозиция) в настоящее время трудно поддается формализации и чаще всего носит эвристический характер, зависящий от целей исследования сложной системы. Выделение подсистем часто производят по функциональным признакам, полагая при этом, что самостоятельное существование подсистем нереально (выпускные газы двигателей, например, не могут самостоятельно образовываться и существовать). Возможна также классификация подсистем по видам объектов управления, входящих в состав сложной системы (иногда подсистемам ставят в соответствие задачи, решение которых необходимо осуществить для выполнения основной задачи, поставленной перед создаваемой сложной системой). В связи с этим следует отметить, что разбиение сложной системы на подсистемы целесообразно выполнять таким образом, чтобы они представляли собой самостоятельно функционирующие части системы, решающие свои задачи, но при этом учитывалась роль подсистем во всей системе.

2. *Многомерность системы*, обуславливаемая наличием большого числа связей между подсистемами.

3. *Многокритериальность*, обуславливаемая разнообразием целей отдельных подсистем, входящих в сложную систему, а также разнообразием требований, предъявляемых к исследуемой системе со стороны других систем.

4. *Свойства системы не исчерпываются свойствами отдельных подсистем* (синергетический эффект), наоборот, система имеет свойства, которые не присущи подсистемам, и не могут быть образованы простым суммированием свойств подсистем (принцип эмерджентности), а формируются благодаря учету взаимодействия между отдельными частями системы.

5. *Многообразие природы подсистем*, которое характеризуется их различной физической сущностью.

Таким образом, сложность системы, к которой можно применить системный подход, характеризуется не просто увеличением размерности, но и многокритериальностью, иерархичностью структуры, наличием подсистем различного вида, функционирование которых подчинено достижению единой цели для всей системы в целом. Однако можно констатировать, что составные части системы «экологическая эффективность судна»: экологическая эффективность по нефтесодержащим водам, по сточным водам, по мусору, по выбросам в атмосферу твердых частиц, окислов азота NO_x, оксида углерода CO, суммарных углеводородов CH, парникового газа CO_2, по шуму, могут быть представлены в виде подсистем сложной системы (структурирование и анализ сложной системы) и в этом случае (при правильном структурировании системы) они будут удовлетворять всем пяти указанным выше признакам.

Таким образом, ранее изложенное подтверждает возможность описания свойств рассматриваемой системы в функции свойств указанных ранее подсистем (синтез свойств системы) и представления показателя экологической эффективности $П_{эк.\ эф}$ — интегрального критерия эффективности системы — в виде функции частных критериев подсистем, т. е. частных показателей экологической эффективности:

$$П_{эк.\ эф} = f(ЧП_{НВ}, ЧП_{СВ}, ЧП_{СМ}, ЧП_{ТО}, ЧП_{NOx}, ЧП_{СО}, ЧП_{СН}, ЧП_{дым}, ЧП_{ПГ}, ЧП_{шум}),$$

где $ЧП_{НВ}$ — частный показатель экологической эффективности по предотвращению загрязнения водной среды нефтесодержащими (льяльными) водами;

$ЧП_{СВ}$ — частный показатель экологической эффективности по предотвращению загрязнения водной среды сточными водами;

$ЧП_{СМ}$ — частный показатель экологической эффективности по предотвращению загрязнения водной среды сухим мусором;

$ЧП_{ТО}$ — частный показатель экологической эффективности по предотвращению загрязнения водной среды твердыми пищевыми отходами;

$ЧП_{NOx}$ — частный показатель экологической эффективности по предотвращению загрязнения воздушной среды окислами азота;

$ЧП_{СО}$ — частный показатель экологической эффективности по предотвращению загрязнения воздушной среды оксидом углерода;

$ЧП_{СН}$ — частный показатель экологической эффективности по предотвращению загрязнения воздушной среды суммарными углеводородами;

$ЧП_{дым}$ — частный показатель экологической эффективности по предотвращению загрязнения воздушной среды твердыми частицами несгоревшего топлива, что проявляется дымностью выпускных (отработавших) газов;

$ЧП_{ПГ}$ — частный показатель экологической эффективности по предотвращению загрязнения воздушной среды углекислым газом CO_2, ответственным за парниковые газы (парниковый эффект);

$ЧП_{шум}$ — частный показатель экологической эффективности по предотвращению высоких уровней шума, производимого судном и его техническими средствами.

Частные показатели экологической эффективности по предотвращению загрязнения водной среды нефтесодержащими (льяльными), сточными водами и мусором. Выполненные автором предварительные исследования показали, что применительно к предотвращению загрязнения водной среды нефтесодержащими (льяльными) сточными водами, сухим мусором и твердыми пищевыми отходами частные показатели экологической эффективности могут быть выражены одним и тем же соотношением:

$$ЧП = \frac{V}{V_{НО}}, \qquad (1)$$

где V — объем имеющихся на судне емкостей для сбора нефтесодержащих (льяльных) вод для частного показателя $ЧП_{НВ}$, сточных вод для частного показателя $ЧП_{СВ}$, сухого мусора для частного показателя $ЧП_{СМ}$, твердых пищевых отходов для частного показателя $ЧП_{ТО}$;

$V_{НО}$ — объем накапливаемых на судне за время прохождения участка водного пути между пунктами сдачи отходов нефтесодержащих (льяльных) вод для частного показателя $ЧП_{НВ}$, сточных вод для частного показателя $ЧП_{СВ}$, сухого мусора для частного показателя $ЧП_{СМ}$, твердых пищевых отходов для частного показателя $ЧП_{ТО}$:

$$V_{НО} = LN / (vk_{Е}), \quad (2)$$

где L — наибольшее расстояние в районе эксплуатации судна между пунктами приема отходов, км; N — норма скорости накопления отходов, м^3/ч:

– для нефтесодержащих (льяльных) вод $N = c_{НВ} / 24$ ($c_{НВ}$ — норма скорости накопления нефтесодержащих (льяльных) вод, м^3/сут);

– для сточных вод и мусора $N = c\,(n_{ч.эк} + n_{ч.пс}) / 24$ (c — норма скорости накопления сточных вод, сухого мусора или пищевых отходов, м^3/(чел. /·сут); $n_{ч.эк}$ — число членов экипажа максимальное; $n_{ч.пс}$ — число пассажиров максимальное).

В выражении (2) также приняты следующие условные обозначения: v — средняя эксплуатационная скорость судна, км/ч; kх — коэффициент ходового времени, равный отношению ходового времени к сумме ходового и стояночного времени (за рейс, навигацию, несколько навигаций).

Нормативные значения степени очистки сточных и нефтесодержащих вод приведены в табл. 1 и 2.

Таблица 1

Нормативные значения степени очистки нефтесодержащих вод

Нормируемые показатели	Станции ОНВ на пассажирских, транспортных судах и техническом флоте, установленные		Станции ОНВ на специализированных очистных судах
	до 1997 г.	после 1997 г.	
Концентрация нефтепродуктов, мг/л	10,0	8,0	5,0

Таблица 2

Нормативные значения степени очистки сточных вод

Нормируемые показатели	Станции ООСВ на пассажирских, транспортных судах и техническом флоте, установленные		Станции ООСВ на специализированных очистных судах, установленные	
	до 1997 г.	после 1997 г.	до 1997 г.	после 1997 г.
Взвешенные вещества, мг/л	не более 50	не более 40	не более 40	не более 30
$БПК_5$, мг/л	не более 50	не более 40	не более 40	не более 30
Коли-индекс	не более 1000	не более 1000	не более 1000	не более 1000
Остаточный хлор (при обеззараживании хлором), мг/л	1,5 – 3,0	1,5 – 3,0	1,5 – 3,0	1,5 – 3,0

Примечания: станция ОНВ — установка для очистки нефтесодержащих вод; станция ООСВ — установка для очистки и обеззараживания сточных вод.

Таким образом, частные показатели экологической эффективности по нефтесодержащим (льяльным), сточным водам, сухому мусору и твердым пищевым отходам описываются следующими формулами:

$$ЧП_{НВ} = 24V_{НВ}vk_{х} / (Lc_{НВ}); \quad (3)$$

$$ЧП_{СВ} = 24V_{СВ}vk_{х} / (Lc_{СВ}) / (n_{ч.эк} + n_{ч.пс}); \quad (4)$$

$$ЧП_{СМ} = 24V_{СМ}vk_{х} / (Lc_{СМ}) / (n_{ч.эк} + n_{ч.пс}); \quad (5)$$

$$ЧП_{ТО} = 24V_{ТО}vk_{х} / (Lc_{ТО}) / (n_{ч.эк} + n_{ч.пс}). \quad (6)$$

При этом нужно иметь в виду, что если на судне установлено фильтрующее оборудование для нефтесодержащих вод, сигнализатор, система сброса очищенных нефтесодержащих вод, автоматическое устройство, прекращающее сброс нефтесодержащих вод при превышении нормативного значения содержания нефти в сбросе, то следует принимать $ЧП_{НВ} = 1$. Если на судне установлена система очистки и обеззараживания сточных вод, то следует принимать $ЧП_{СВ} = 1$. Если на судне установлен инсинератор, то следует принимать $ЧП_{СМ} = 1$. Если на судне установлен измельчитель твердых отходов, то следует принимать $ЧП_{ТО} = 1$.

Частные показатели экологической эффективности по предотвращению загрязнения воздушной среды. Предварительно выполненные исследования показали, что частные показатели экологической эффективности по предотвращению загрязнения воздушной среды выбросами NOx, CO, CH можно представить функцией отношения реальной эмиссии указанных веществ, г/(кВт·ч), к некоторому эталонному значению эмиссии этих же веществ, в качестве которого целесообразно принять действующие в настоящее время нормативы (см. табл. 3 – 5).

Таблица 3

Допустимые значения выбросов оксидов азота

Частота вращения коленчатого вала двигателя n, мин$^{-1}$	Наибольшее допускаемое значение удельного средневзвешенного выброса оксидов азота (NO_x) в приведении к NO_2, г/(кВт·ч), для двигателей, поставленных на производство		
	до 19.05.2005	с 19.05.2005 по 01.01.2011	с 01.01.2011
До 130	17	17,0	14,4
Св. 130 до 2000		$45n^{-0,2}$	$44n^{-0,23}$
Св. 2000		9,8	7,7

Таблица 4

Допустимые значения выбросов оксида углерода и суммарных углеводородов

Нормируемый параметр	Наибольшее допустимое значение для двигателей, поставленных на производство		
	до 2000 г.	с 2000 по 2016 гг.	с 2016 г.
Удельный средневзвешенный выброс оксида углерода CO, г/(кВт·ч)	6,0	3,5	1,5
Удельный средневзвешенный выброс суммарных углеводородов CH в пересчете на условный состав топлива $CH_{1,85}$, г/(кВт·ч)	2,4	1,0	0,4

Таблица 5

Нормируемые показатели дымности

Расход выпускных газов $V_{exh}\cdot10^3$, приведенный к нормальным условиям (температура 273 К, давление 101,3 кПа), м^3/с	Натуральный показатель K ослабления светового потока, м$^{-1}$		Коэффициент N ослабления светового потока, приведенный к шкале дымомера оптического типа L = 0,43 м, %		Дымовое число фильтра FSN, приведенное к шкале дымомера фильтрационного типа L_F = 0,405 м, у. е.
	Норма дымности выпускных газов двигателей, поставленных на производство				
	до 2016 г.	с 2016 г.	до 2016 г.	с 2016 г.	до 2016 г.
До 75	1,36	1,01	44	35	3,4
Свыше 75 до 95	1,23	0,90	41	32	3,2
Свыше 95 до 140	1,07	0,80	37	29	3,0
Свыше 140 до 210	0,90	0,70	32	26	2,7
Свыше 210 до 350	0,73	0,58	27	22	2,4
Свыше 350 до 600	0,58	0,46	22	18	2,2
Свыше 600 до 1150	0,46	0,35	18	14	1,8
Свыше 1150 до 3000	0,32	0,25	13	10	1,4
Свыше 3000	0,23	0,19	10	8	1,0

При использовании данных табл. 5 расход выпускных газов V_{exh}, приведенный к нормальным условиям, в зависимости от которого в табл. 5 устанавливается норма дымности, определяется методом прямых измерений или рассчитывается по формуле, м³/ч:

$$V_{exh} = V_{в} + F_{т} G_{т}, \quad (7)$$

где $V_{в}$ — объемный расход воздуха, приведенный к нормальным атмосферным условиям (T_0 = 273 К, p_0 = 101,3 кПа, плотность 1,293 кг/м³), м³/ч;

$G_{т}$ — часовой расход топлива, кг/ч;

$F_{т}$ — коэффициент приведения к нормальным атмосферным условиям расхода неразбавленных продуктов сгорания различных топлив (коэффициент состава топлива), м³/кг, принимаемый для «сухого» или «влажного» состояния выпускных газов.

Значения коэффициента $F_{т}$ приведены в табл. 6.

Таблица 6

Коэффициент состава топлива для различных топлив

Вид топлива	Значение коэффициента состава топлива $F_{Т}$, м³/кг, для состояния выпускных газов	
	«влажного»	«сухого»
Дизельное	0,75	–0,77
Моторное	0,72	–0,74
Мазут	0,69	–0,71
Природный газ	1,33	–1,34

Примечание. В случае применения в судовых двигателях иного жидкого топлива в расчетах допускается использование коэффициента Ft для того указанного в таблице топлива, к вязкости которого близка вязкость применяемого топлива.

Для «влажного» состояния выпускных газов, плотность которых равна 1,293 кг/м³, V_{exh} рассчитывается по формуле, м³/с:

$$V_{exh} = 0{,}2148 \cdot 10^{-3} (G_{т} + G_{в}). \quad (8)$$

Здесь $G_{т}$ — часовой расход топлива, рассчитанный по формуле, кг/ч:

$$G_{т} = b_{e} P_{e\,ном}; \quad (9)$$

b_{e} — удельный эффективный расход топлива двигателем для режима номинальной мощности, указываемый в технической документации двигателя, кг/(кВт·ч);

$P_{e\,ном}$ — номинальная мощность двигателя, указываемая в технической документации двигателя, кВт;

$G_{в}$ — часовой расход воздуха, рассчитанный по формуле (10), кг/ч (в технической документации двигателя обычно указывается секундный расход воздуха), кг/с:

$$G_{в} = \varphi \alpha L_0' G_{т} G_{в}, \quad (10)$$

где φ — коэффициент продувки (φ = 1,05 – 1,2);

α — суммарный коэффициент избытка воздуха, минимальное значение которого указывается в технической документации двигателя.

Следует отметить, что значения суммарного коэффициента α зависят от типа смесеобразования:

для двигателей:

с пленочным смесеобразованием ..... 1,2 – 1,5;
с объемным смесеобразованием..... 1,9 – 2,2;
с объемно-пленочным смесеобразованием ..... 1,7 – 2,0;
для вихрекамерных дизелей ..... 1,5 – 1,9;
для предкамерных дизелей ..... 1,3 – 1,6;

L_0' — стехиометрическое соотношение, количество воздуха, кг, теоретически необходимое для сгорания топлива массой 1 кг (кг/кг). Для дизельного топлива среднего элементарного состава (C = 0,87; H = 0,126; O = 0,004) $L_0' = 14{,}33$ кг/кг.

Частный показатель экологической эффективности по предотвращению загрязнения воздушной среды не полностью сгоревшими частицами топлива (сажей) также целесообразно представить в виде функции отношения реального выброса сажи к эталонному значению выброса сажи. Количественной мерой выброса сажистых (твердых) частиц могут быть следующие показатели: удельное содержание выбросов твердых частиц в выпускных (отработавших) газах PM, г/(кВт·ч); натуральный показатель ослабления светового потока или коэффициент ослабления светового потока в случае измерения дымности дымомером, в котором реализован оптический принцип измерения дымности (типа Hartridge); дымовое число фильтра дымомера, в котором реализован фильтрационный принцип измерения дымности (типа Bosh).

Европейские предписания не регламентируют дымность выпускных (отработавших) газов, как это имеет место в Правилах Российского Речного Регистра, но они устанавливают нормы выбросов частиц PM, которые не нормируются этими Правилами. Поэтому все зависит от того, возможно ли измерить выбросы частиц, и если нет, то какими приборами измеряется дымность выпускных газов. Если измеряется выброс сажистых частиц, то в качестве эталонного значения выброса сажи следует принимать значения PM, приведенные ниже, если выброс сажистых частиц оценивается по дымности выпускных (отработавших) газов, то в качестве эталонного значения выброса сажи следует принимать значения натурального показателя ослабления светового потока, коэффициент ослабления светового потока или дымовое число фильтра дымомера определять по табл. 5.

$P_{e\text{ном}}$, кВт	Частицы PM, г/(кВт·ч)
$37 \le P_e < 75$	0,4
$75 \le P_e < 130$	0,3
$130 \le P_e < 560$	0,2
$P_e \ge 560$	0,2

Отношение выбросов загрязнений в атмосферу является безразмерным параметром, значение которого может быть меньше или равно единице (крайне редко), но может и превышать единицу, что требует шкалирования частных показателей.

Выполненные предварительные исследования позволили рекомендовать следующую методику шкалирования частных показателей экологической эффективности по предотвращению загрязнения воздушной среды выбросами CO, CH, NO_x и PM. В случае, когда эмиссия e_{CO}, e_{CH}, e_{NOx} и e_{PM} или показатель дымности Д меньше или равны значениям эмиссии $[e_{CO}]$, $[e_{CH}]$, $[e_{NOx}]$, приведенным в табл. 3 и 4, и значению $[e_{PM}]$ или показателя дымности Д, приведенным в табл. 5 и ранее в тексте, значения частных показателей $ЧП_{CO}$, $ЧП_{CH}$, $ЧП_{NOx}$, $ЧП_{дым}$ следует принимать равными единице. В случае, когда эмиссия e_{CO}, e_{CH}, e_{NOx} и e_{PM} или показатель дымности Д больше значений эмиссии $[e_{CO}]$, $[e_{CH}]$, $[e_{NOx}]$ и $[e_{PM}]$ или показателей дымности Д, значения частных показателей $ЧП_{CO}$, $ЧП_{CH}$, $ЧП_{NOx}$, $ЧП_{дым}$ следует оценивать с помощью графика, приведенного на рис. 1, полученного по результатам обработки данных экспертного опроса.

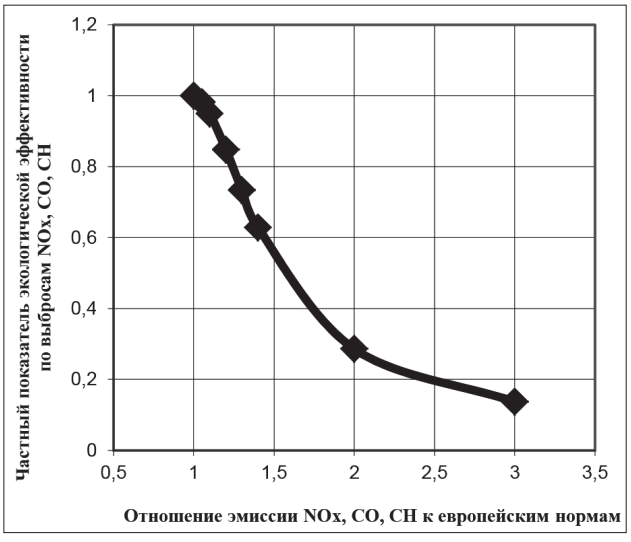


Рис. 1. График для оценки шкалирования $ЧП_{CO}$, $ЧП_{CH}$, $ЧП_{NOx}$, $ЧП_{дым}$

Аппроксимация графика рис. 1 привела к следующим уравнениям для определения частных показателей экологической эффективности по предотвращению загрязнения воздушной среды при $e/[e] > 1$:

$$ЧП_{CO} = 1/\left\{1,005 + 5,193\left[\ln\left(e_{CO}/\left[e_{CO}\right]\right)\right]^2\right\}; \quad (11)$$

$$ЧП_{CH} = 1/\left\{1,005 + 5,193\left[\ln\left(e_{CH}/\left[e_{CH}\right]\right)\right]^2\right\}; \quad (12)$$

$$ЧП_{NO_x} = 1/\left\{1,005 + 5,193\left[\ln\left(e_{NO_x}/\left[e_{NO_x}\right]\right)\right]^2\right\}; \quad (13)$$

$$ЧП_{дым} = 1/\left\{1,005 + 5,193\left[\ln\left(e_{PM}/\left[e_{PM}\right]\right)\right]^2\right\}; \quad (14)$$

или

$$ЧП_{дым} = 1/\left\{1,005 + 5,193\left[\ln\left(Д/\left[Д\right]\right)\right]^2\right\}. \quad (15)$$

Комитетом по защите морской среды Международной морской организации на его 59-й сессии (13 – 17 июля 2009 г.) были предложены методики для определения конструктивного показателя энергетической эффективности и индикатора эксплуатационной энергетической эффективности, в которых масса M_{CO2}, т, выброшенного в атмосферу углекислого газа в результате сжигания топлива на судне определяется по следующей формуле:

$$M_{CO_2} = \sum_j FC_j C_{Fj}, \quad (16)$$

где FC — проектное значение расхода топлива всеми судовыми потребителями (для конструктивного показателя энергетической эффективности) или расход топлива судном за j-й (FC_j) рейс или период эксплуатации (например, за день) главными и вспомогательными двигателями, котлом и инсинератором (для индекса эксплуатационной энергетической эффективности), т;

C_{Fj} — безразмерный фактор приведения расхода топлива к эмиссии CO_2 (табл. 7).

Фактор приведения расхода топлива к выбросам CO_2 представляет собой коэффициент, различный для разных сортов топлива и зависящий от содержания углерода в топливе. С помощью этого коэффициента реализуется допущение о линейной связи количества сжигаемого топлива с количеством выбрасываемого в атмосферу парникового газа CO_2, т. е. качество организации горения топлива в цилиндрах двигателей не учитывается (не учитывается, что не весь углерод жидкого или газообразного топлива полностью окисляется кислородом).

Таблица 7

Безразмерный фактор приведения расхода топлива к эмиссии CO_2

Тип топлива	Ссылка	Содержание углерода	C_F (t – CO_2/t – Fuel)
Дизельное топливо (газойль)	ISO 8217 Grades DMX through DMC	0,875	3,206000
Легкое топливо	ISO 8217 Grades RMA through RMD	0,86	3,151040
Тяжелое топливо	ISO 8217 Grades RME through RMK	0,85	3,114400
Сжиженный нефтяной газ	Пропан	0,819	3,000000
	Бутан	0,827	3,030000
Сжиженный природный газ		0,75	2,750000

Частный показателей экологической эффективности по предотвращению загрязнения воздушной среды парниковым газом CO_2 по аналогии с частными показателями $ЧП_{CO}$, $ЧП_{CH}$, $ЧП_{NOx}$, $ЧП_{дым}$ наиболее просто представить в виде функции отношения реального выброса углекисло-

го газа к некоторому эталонному или допустимому выбросу этого газа, наименьшему в данных условиях эксплуатации судна. Поскольку, согласно уравнению (16), в числителе и знаменателе функции отношения реального выброса углекислого газа к эталонному будет использоваться коэффициент C_F, эту функцию можно заменить функцией отношения реального расхода топлива к его эталонному расходу, или, что более удобно, функцией отношения удельного расхода топлива главного двигателя $b_{e\text{ГД}}$ к эталонному удельному расходу топлива $[b_{e\text{ГД}}]$ некоего двигателя той же мощности и частоты вращения, но с минимально возможным на настоящий момент развития двигателестроения расходом топлива, т. е.

$$\text{ЧП}_{\text{ПГ}} = f(b_{e\text{ГД}} / [b_{e\text{ГД}}]).$$

Анализ последних публикаций по двигателестроению свидетельствует о том, что можно принимать $b_{e\text{ГД}}$ = 180 г/(кВт·ч). Тогда при $b_{e\text{ГД}} \le 180$ г/(кВт·ч), что маловероятно, значение частного показателя $\text{ЧП}_{\text{ПГ}}$ целесообразно принимать равным единице. В противном случае данное значение следует оценивать с помощью графика (рис. 2), полученного по результатам обработки данных экспертного опроса.

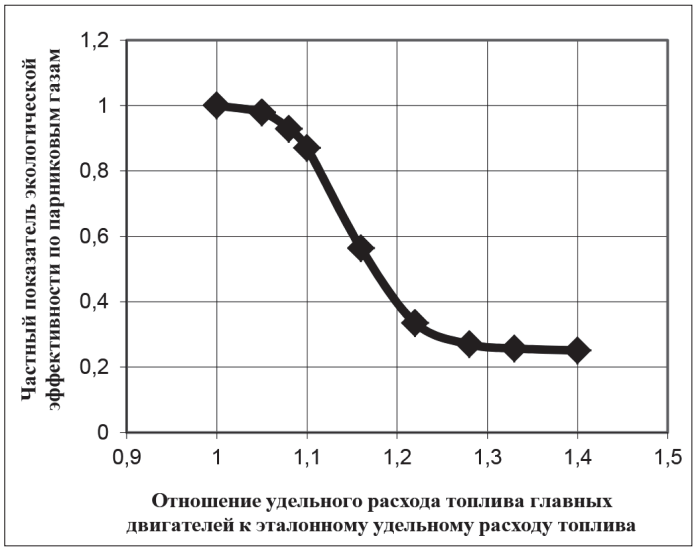


Рис. 2. График для оценки шкалирования $\text{ЧП}_{\text{ПГ}}$

Аппроксимация этого графика позволила получить следующее уравнение для определения частного показателя экологической эффективности по предотвращению загрязнения воздушной среды парниковым газом CO_2 при $x = b_{e\text{ГД}} / [b_{e\text{ГД}}] > 1$:

$$\text{ЧП}_{\text{ПГ}} = \frac{0,92069 - 1,21369x^2 + 0,42136x^4}{1 - 1,11637x_2 + 0,00472x^4 + 0,24003x^6}. \qquad (17)$$

Анализ графика рис. 2 и уравнения (17) показывает, что при отношении $b_{e\text{ГД}} / [b_{e\text{ГД}}]$, изменяющемся в диапазоне от 1 до 1,1, частный показатель $\text{ЧП}_{\text{ПГ}}$ имеет достаточно высокие значения, однако применительно к двигателям, эксплуатирующимся на флоте более 25 лет, например, Г70-5 ($b_{e\text{ГД}}$ = 224 г/(кВт·ч)), значение $\text{ЧП}_{\text{ПГ}}$ составит примерно 0,296. Это низкое значение частного показателя экологической эффективности, несомненно, свидетельствует о том, что метод определения показателя $\text{ЧП}_{\text{ПГ}}$ стимулирует применение на речном флоте более экономичных главных двигателей.

Частный показатель экологической эффективности по предотвращению высоких уровней шума, производимого судном и его техническими средствами. Законодательством Российской Федерации, Правилами Российского Речного Регистра и санитарными правилами уровень шума, производимого судном, не регламентируется. В гл. 8b «Предотвращение загрязнения вод

и ограничение шума, производимого судами» Резолюции № 61 ЕЭК ООН [3] приведены следующие требования:

«*8В-8.2 Уровень шума, производимого судном, не должен превышать 75 дБ(А) на расстоянии 25 м от борта судна.*

8В-8.3 Без учета погрузочно-разгрузочных работ, уровень шума, производимого судном, стоящим на стоянке, не должен превышать 65 дБ(А) на расстоянии 25 м от борта судна».

Следовательно, европейские предписания относят шум к показателям экологической безопасности, что, собственно, позволяет рассматривать вопрос о включении в число частных показателей экологической эффективности показателя экологической эффективности по предотвращению высоких уровней шума.

Выполненный предварительный анализ позволил представить частный показатель экологической эффективности по предотвращению высоких уровней шума, производимого техническими средствами судна, в виде среднего геометрического шкалированных отношений реального уровня шума $Ш_{75}$ на ходу судна к его европейской норме $[Ш_{75}]$ и шума $Ш_{65}$ судна на стоянке к европейской норме $[Ш_{75}]$, указанным в Резолюции № 61 ЕЭК ООН:

$$ЧП_{шум} = \sqrt{\left(Ш_{75} / [Ш_{75}]\right)_{шк} \cdot \left(Ш_{65} / [Ш_{65}]\right)_{шк}}\,. \qquad (18)$$

Метод шкалирования отношений $Ш_{75} / [Ш_{75}]$ и $Ш_{65} / [Ш_{65}]$, по мнению экспертов, не должен отличаться от метода шкалирования частного показателя экологической эффективности по предотвращению загрязнения воздушной среды парниковым газом CO_2, т. е. если каждое из рассматриваемых отношений оказывается меньше единицы, то шкалированное значение отношения принимается равным единице, противном случае следует использовать график рис. 2 с заменой отношения удельных расходов топлива отношением уровней шума. Тогда при $x_1 = Ш_{75} / [Ш_{75}] > 1$ или $x_2 = Ш_{65} / [Ш_{65}] > 1$:

$$\left(Ш_{75} / [Ш_{75}]\right)_{шк} = \frac{0,92069 - 1,21369x_1^{\,2} + 0,42136x_1^{\,4}}{1 - -1,11637x_1^{\,2} + 0,00472x_1^{\,4} + 0,24003x_1^{\,6}}; \qquad (19)$$

$$\left(Ш_{65} / [Ш_{65}]\right)_{шк} = \frac{0,92069 - 1,21369x_2^{\,2} + 0,42136x_2^{\,4}}{1 - 1,11637x_2^{\,2} + 0,00472x_2^{\,4} + 0,24003x_2^{\,6}}. \qquad (20)$$

После определения шкалированных значений частных показателей экологической эффективности (свойств подсистем системы «экологическая эффективность судна») рассчитывается интегральный показатель свойств системы — показатель экологической эффективности судна.

Определение показателя экологической эффективности судна. При решении поставленной задачи — создании модели предотвращения загрязнений судном окружающей среды (разработка метода определения показателя экологической эффективности) — системный анализ использовался как основной инструмент структурирования (декомпозиции) рассматриваемой системы «экологическая эффективность судна» и выделения ее подсистем (различных загрязнителей) с целью описания частных показателей экологической эффективности, характеризующих свойства этих подсистем как составных частей системы. Модель самой системы — показатель экологической эффективности — может быть получена путем системного синтеза, т. е. путем интегрирования частных описаний в единую систему с учетом взаимосвязей между выделенными для самостоятельного изучения и описания путем декомпозиции составными частями системы.

Решение задач, подобных рассматриваемой напоминает, в какой-то мере, процедуры векторной оптимизации, при которой выполняется минимизация или максимизация системного (комплексного) критерия, представляющего собой вектор многомерного пространства, составляющими которого являются частные критерии системы. Стратегия построения этого комплексного критерия отражает суть компромисса, заранее принимаемого разработчиком с целью «примирения» отдельных частных критериев. Иначе говоря, все частные критерии $\varphi_i(x)$ тем

или иным способом объединяются в составной критерий $F = f(\varphi_i(x))$, который затем минимизируется или максимизируется.

Итак, с математической точки зрения, решением рассматриваемой задачи (или подобной) может быть вектор многомерного пространства (комплексный критерий полезности), координатами которого являются частные критерии, или, что одно и то же, «свертка» частных критериев, которая может быть осуществлена различными способами. Применительно к данной задаче решением (получением интегрального показателя системы) будет являться «свертка» количественных оценок свойств подсистем (частных показателей), входящих в эту систему.

Оставляя за рамками работы анализ схем и принципов компромисса между частными показателями экологической эффективности, укажем, что принцип справедливой абсолютной уступки приводит к аддитивному интегральному показателю:

$$П_{эк.\ эф} = g_1 ЧП_1 + g_2 ЧП_2 + ... + g_k ЧП_k = \sum_{i=1}^{k} g_i ЧП_i. \quad (21)$$

Здесь $ЧП_i$ — шкалированное значение i-го частного показателя экологической эффективности;

$$\sum_{i=1}^{k} g_i = 1,$$

где $П_{эк.\ эф}$ — интегральный показатель экологической эффективности;

g_i — коэффициент весомости i-го частного показателя.

Объединение частных показателей в аддитивный интегральный показатель типа (21) с использованием коэффициентов весомости имеет недостатки, главными из которых являются:

1) слабая связь коэффициентов весомости с действительной ролью частных показателей в выполнении системой своих функций, если применяются формальные методы определения коэффициентов весомости;

2) трудность отыскания объективного способа нормирования частных показателей для приведения их к безразмерному шкалированному виду;

3) малая чувствительность интегрального показателя к изменениям величины отдельных частных показателей, особенно если их общее число велико; компенсация малой величины одного частного показателя избыточной величиной другого.

Принцип справедливой относительной уступки приводит к мультипликативному интегральному показателю, определяемому с помощью уравнения

$$П_{эк.\ эф} = \prod_{i=1}^{k} ЧП_i^{g_i} = ЧП_1^{g_1} ЧП_2^{g_2} ... ЧП_k^{g_k}. \quad (22)$$

Мультипликативный интегральный показатель также имеет серьезные недостатки:

– не компенсирует недостаточно высокое значение одного частного показателя чрезмерно высоким значением другого;

– имеет тенденцию сглаживать уровни частных показателей, поскольку, в соответствии с принципом относительной уступки, абсолютное изменение частного показателя тем больше, чем больше его первоначальное значение;

– образуется путем простого перемножения частных показателей в том случае, если все они имеют одинаковую важность.

Стратегия построения комплексного критерия, реализованная в уравнении (21), в литературе называется *линейной стратегией,* а в уравнении (22) — *конъюнктивной стратегией*.

Конъюнктивная стратегия является более жесткой, чем линейная. Достаточно одному частному шкалированному показателю $ЧП_i$ обратиться в нуль или принять недопустимо малое значение, как это автоматически повлечет за собой браковку рассматриваемой альтернативы.

Помимо указанных стратегий формирования $П_{эк.\ эф}$ используют также *альтернативную стратегию*, в которой поощряются варианты, имеющие хотя бы одну сильную сторону (высокое значение одного из частных показателей), и усложненную *конфигурационную стратегию.* Особенность данной стратегии заключается в учете взаимодействий между частными показателями эффективно-

сти. Здесь выбор того или иного частного показателя и его коэффициента весомости в значительной мере зависит от конфигурации (формы построения и взаимосвязи) остальных частных показателей.)

Проанализировав каждую стратегию получения интегрального показателя, проверив на чувствительность и рассмотрев данные стратегии с точки зрения объема и сложности выполнения задачи, специалисты Российского Речного Регистра пришли к выводу о том, что применение при решении поставленной задачи альтернативной и конфигурационной стратегий нецелесообразно, поскольку усложняет процедуру получения физически обоснованных коэффициентов весомости. Применение конъюнктивной стратегии нежелательно вследствие ее жесткости.

В связи с ранее изложенным, в основу предлагаемого метода определения показателя экологической эффективности судна и его составных частей положена линейная стратегия «свертки» частных показателей в аддитивный интегральный показатель, являющийся обобщенной оценкой экологической эффективности рассматриваемого судна.

Непременным условием, нейтрализующим слабые стороны линейной стратегии, является выбор такого метода получения коэффициентов весомости, который позволил бы в максимально возможной степени учесть объективную роль частных показателей в описании экологической эффективности судна в рассматриваемой модели. Это возможно, если при получении коэффициентов весомости будут в максимальной степени, пусть в опосредствованном виде, реализованы имеющиеся знания и опыт высококвалифицированных специалистов-экспертов.

Оставляя за рамками работы методику подбора экспертов и их опроса, а также согласование и последующую обработку их мнений, укажем, что эксперты ранжировали частные показатели экологической эффективности в следующем порядке:

1) $ЧП_{ПГ}$ — частный показатель экологической эффективности по предотвращению загрязнения воздушной среды углекислым газом CO_2, ответственным за парниковый эффект;

2) $ЧП_{дым}$ — частный показатель экологической эффективности по предотвращению загрязнения воздушной среды твердыми частицами несгоревшего топлива, что проявляется дымностью выпускных (отработавших) газов;

3) $ЧП_{CO}$ — частный показатель экологической эффективности по предотвращению загрязнения воздушной среды оксидом углерода;

4) $ЧП_{NOx}$ — частный показатель экологической эффективности по предотвращению загрязнения воздушной среды окислами азота (при наличии в системе нейтрализатора NO_x следует принимать $ЧП_{NOx} = 1$);

5) $ЧП_{CH}$ — частный показатель экологической эффективности по предотвращению загрязнения воздушной среды суммарными углеводородами;

6) $ЧП_{СМ}$ — частный показатель экологической эффективности по предотвращению загрязнения водной среды сухим мусором;

7) $ЧП_{шум}$ — частный показатель экологической эффективности по предотвращению высоких уровней шума, производимого судном и его техническими средствами;

8) $ЧП_{НВ}$ — частный показатель экологической эффективности по предотвращению загрязнения водной среды нефтесодержащими (льяльными) водами;

9) $ЧП_{СВ}$ — частный показатель экологической эффективности по предотвращению загрязнения водной среды сточными водами;

10) $ЧП_{ТО}$ — частный показатель экологической эффективности по предотвращению загрязнения водной среды твердыми пищевыми отходами.

В результате было установлено следующее соотношение рангов:

$ЧП_{ПГ} / ЧП_{дым} = 1{,}05;$

$ЧП_{дым.} / ЧП_{CO} = 1{,}03;$

$ЧП_{CO} / ЧП_{NOx} = 1{,}01;$

$ЧП_{NOx} / ЧП_{CH} = 1{,}07;$

$ЧП_{CH} / ЧП_{см} = 1{,}15;$

$ЧП_{СМ} / ЧП_{шум} = 1{,}15;$

$ЧП_{шум.} / ЧП_{НВ} = 1,20;$
$ЧП_{НВ} / ЧП_{СВ} = 1,08;$
$ЧП_{СВ} / ЧП_{то} = 1,31.$

С использованием установленных экспертами соотношений рангов с помощью специальной компьютерной программы были рассчитаны коэффициенты весомости, в результате чего уравнение «свертки» для определения показателя экологической эффективности приведено к следующему виду:

$$П_{эк. эф} = 0,134076ЧП_{ПГ} + 0,127692ЧП_{дым} + 0,123973ЧП_{СО} + 0,122745ЧП_{NOx} +$$
$$+ 0,114715ЧП_{СН} + 0,099752ЧП_{СМ} + 0,086741ЧП_{шум} + 0,072284ЧП_{НВ} +$$
$$+ 0,066930ЧП_{СВ} + 0,051091ЧП_{ТО}. \quad 23)$$

Исходя из ранее изложенного, можно сделать вывод о том, что показатель $П_{эк. эф}$ должен рассчитываться компьютерной моделью системы управления СЭУ при проведении первоначального освидетельствования, а также проведении других освидетельствований для проверки экологической безопасности судна. Предполагается, что при проведении освидетельствований для проведения измерений на судне привлекается группа специалистов с переносным оборудованием для измерения параметров, входящих в частные показатели экологической эффективности.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Решняк В. И.* Регулирование эксплуатационного и аварийного загрязнения окружающей среды на объектах водного транспорта / В. И. Решняк, З. Юзвяк, А. Г. Щуров // Журнал Университета водных коммуникаций. — 2013. — № 1. — С. 85–90.

2. *Пластинин А. Е.* Оценка риска возникновения разливов нефти на внутренних водных путях / А. Е. Пластинин // Наука и техника транспорта. — 2015. — № 1. — С. 39–44.

3. *Naumov V.* Forecasting the Boundaries of Dangerous Oil Spills in Sea and River Ports Areas / V. Naumov, A. Plastinin, A. Dikinis // ICMRP Proceeding. — Singapore, 2015. — Vol. 3. — Pp. 106–111.

4. *Пластинин А. Е.* Оценка ущерба при разливах нефти на водных объектах / А. Е. Пластинин, В. С Горбунов // Вестник Волжской государственной академии водного транспорта. — 2012. — № 33. — С. 53–59.

5. *McCay D. F.* Estimation of potential impacts and natural resource damages of oil / D. F. McCay, J. J. Rowe, N. Whittier, S. Sankaranarayanan, D. S. Etkin // Journal of hazardous materials. — 2004. — Vol. 107. — Is. 1. — Pp. 11–25. DOI: 10.1016/j.jhazmat.2003.11.013.

6. *Etkin D. S.* Modeling oil spill response and damage costs // Proceedings of the Fifth Biennial Freshwater Spills Symposium. — 2004. — 15 p.

7. *Пластинин А. Е.* Оценка загрязнения при разливе нефти на водную поверхность / А. Е. Пластинин // Журнал Университета водных коммуникаций. — 2013. — № 2. — С. 129–135.

8. *Пластинин А. Е.* Идентификация событий при разливах нефти с судов / А. Е. Пластинин // Речной транспорт (XXI век). — 2016. — № 1 (77). — С. 52–56.

9. *Michel J.* An Issue Paper Prepared for the 2005 International Oil Spill Conference: Potentially Polluting Wrecks in Marine Waters / J. Michel, T. Gilbert, D. S. Etkin, R. Urban, J. Waldron, C. T. Blocksidge // International oil spill conference. — American Petroleum Institute, 2005. — Vol. 2005. — Is. 1. — Pp. 1–40. DOI: 10.7901/2169-3358-2005-1-1.

10. *Пластинин А. Е.* Особенности оценки ущерба при разливах нефти на внутренних водных путях / А. Е. Пластинин, А. Н. Каленков // Приволжский научный журнал. — 2011. — № 3. — С. 168–174.

11. *Пластинин А. Е.* Оценка механического воздействия на окружающую среду при взрывах на танкерах / А. Е. Пластинин // Вестник Государственного университета морского и речного флота имени адмирала С. О. Макарова. — 2015. — № 1 (29). — С. 42–52. DOI: 10.21821/2309-5180-2015-7-1-42-52.

12. *Endresen Ø.* Emission from international sea transportation and environmental impact / Ø. Endresen, E. Sørgård, J. K. Sundet, S. B. Dalsøren, I. S. Isaksen, T. F. Berglen, G. Gravir // Journal of Geophysical Research: Atmospheres. — 2003. — Vol. 108. — Is. D17. DOI: 10.1029/2002JD002898.

13. *Pedersen P. T.* Review and application of ship collision and grounding analysis procedures / P. T. Pedersen // Marine Structures. — 2010. — Vol. 23. — Is. 3. — Pp. 241–262. DOI: 10.1016/j.marstruc.2010.05.001.

14. *Пластинин А. Е.* Оценка размера вреда, причиненного почве, при разливах нефти с судов / А. Е. Пластинин // Вестник Государственного университета морского и речного флота имени адмирала С. О. Макарова. — 2015. — № 3 (31). — С. 74–83. DOI: 10.21821/2309-5180-2015-7-3-74-83.

15. *Tuovinen J.* Statistical analysis of ship collisions (master's thesis) / J. Tuovinen. — Helsinki: Helsinki University of Technology, 2005. — 82 p.

REFERENCES

1. Reshnyak, V. I., Z. Yuzvyak, and A. G. Shchurov. "Regulation of operational and accidental pollution of the environment at tne water transport." *Zhurnal Universiteta vodnykh kommunikatsii* 1 (2013): 85–90.

2. Plastinin, A. E. "Otsenka riska vozniknoveniya razlivov nefti na vnutrennikh vodnykh putyakh." *Nauka i tekhnika transporta* 1 (2015): 39–44.

3. Naumov, V., A. Plastinin, and A. Dikinis. "Forecasting the Boundaries of Dangerous Oil Spills in Sea and River Ports Areas." *ICMRP Proceeding*. Singapore, 2015. Vol. 3. 106–111.

4. Plastinin, A. E., and V. S. Gorbunov. "Damage assessment for oil spill in water bodies." *Vestnik Volzhskoi gosudarstvennoi akademii vodnogo transporta* 33 (2012): 53–59.

5. McCay, Deborah French, Jill Jennings Rowe, Nicole Whittier, Sankar Sankaranarayanan, and Dagmar Schmidt Etkin. "Estimation of potential impacts and natural resource damages of oil." *Journal of hazardous materials* 107.1 (2004): 11–25. DOI: 10.1016/j.jhazmat.2003.11.013.

6. Etkin, Dagmar Schmidt. "Modeling oil spill response and damage costs." *Proceedings of the Fifth Biennial Freshwater Spills Symposium*. 2004.

7. Plastinin, A. E. "The pollution estimation in case of oil spallage on the water surface." *Zhurnal Universiteta vodnykh kommunikatsii* 2 (2013): 129–135.

8. Plastinin, A. E. "Identifikatsiya sobytii pri razlivakh nefti s sudov." *Rechnoi transport (XXI vek)* 1(77) (2016): 52–56.

9. Michel, Jacqueline, Trevor Gilbert, Dagmar Schmidt Etkin, Robert Urban, Jon Waldron, and Charles T. Blocksidge. "An Issue Paper Prepared for the 2005 International Oil Spill Conference: Potentially Polluting Wrecks in Marine Waters." *International oil spill conference*. Vol. 2005. No. 1. American Petroleum Institute, 2005. 1–40.

10. Plastinin, Andrey Evgen'evich, and Alexander Nikolaevich Kalenkov. "Features of damage estimation at oil spillages on inland waterways." *Privolzhsky Scientific Journal* 3 (2011): 168–174.

11. Plastinin, A. E. "Assessment of mechanical impact on environment at explosions on tankers." *Vestnik Gosudarstvennogo universiteta morskogo i rechnogo flota imeni admirala S. O. Makarova* 1(29) (2015): 42–52. DOI: 10.21821/2309-5180-2015-7-1-42-52.

12. Endresen, Øyvind, E. Sørgård, J. K. Sundet, S. B. Dalsøren, I. S. Isaksen, T. F. Berglen, and G. Gravir. "Emission from international sea transportation and environmental impact." *Journal of Geophysical Research: Atmospheres* 108.D17 (2003). DOI: 10.1029/2002JD002898.

13. Pedersen, P. Terndrup. "Review and application of ship collision and grounding analysis procedures." *Marine Structures* 23.3 (2010): 241–262. DOI: 10.1016/j.marstruc.2010.05.001.

14. Plastinin, A. E. "Assessment of the extent of harm to the soil at oil spills from vessels." *Vestnik Gosudarstvennogo universiteta morskogo i rechnogo flota imeni admirala S. O. Makarova* 3(31) (2015): 74–83. DOI: 10.21821/2309-5180-2015-7-3-74-83.

15. Tuovinen, J. *Statistical analysis of ship collisions (master's thesis)*. Helsinki: Helsinki University of Technology, 2005.

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРЕ

Соловьёв Алексей Валерьевич — кандидат технических наук, заместитель директора ФАУ «Российский Речной Регистр» Верхне-Волжский филиал Российского Речного Регистра
603001, Российская Федерация, г. Нижний Новгород, ул. Рождественская, 38в
e-mail: *solovev@rivregnn.ru*

INFORMATION ABOUT THE AUTHOR

Soloviev, Alexey V. —
PhD, deputy director
The Federal Autonomous Institute Russian River Register Upper Volga Branch-Office
38v Rozhdestvenskaya Str., Nizhniy Novgorod, 603001, Russian Federation
e-mail: *solovev@rivregnn.ru*

Статья поступила в редакцию 9 марта 2017 г.
Received: March 9, 2017.

ВЕСТНИК
ГОСУДАРСТВЕННОГО УНИВЕРСИТЕТА
МОРСКОГО И РЕЧНОГО ФЛОТА ИМЕНИ АДМИРАЛА С. О. МАКАРОВА

DOI: 10.21821/2309-5180-2017-9-2-323-336

RESEARCH OF BULK CARRIERS ACTUAL DIMENSIONS FOR THE PORT PLANNING (TECHNOLOGICAL SOLUTIONS OF MARINE TERMINALS)

N. V. Kuptsov

PJSC "Gazprom Neft", St Petersburg, Russian Federation

The water area and handling facilities of coal terminals depend on dimensions of bulk carriers, which are performing ship calls to marine ports. Dimensions and maximum deadweight of bulk carriers tend to increase as a result of «economies scale» effect and dynamically inequable shipbuilding market. Maximum parcel sizes of vessel has been increasing every decade. That makes impact on the configuration of the terminals, the volume of construction materials and dredging, marine terminals scheduling. For an accurate design or exploitation of marine terminals there is a need for updating (every 2–3 years) of vessel dimensions by using methods classification, benchmarking and approximation.

The article specifies the classification of bulk carriers by vessels deadweight and regional categories and presents a detailed structure of the global dry bulk fleet (quantity and distribution for existing and planned for construction vessels, which are registered by IMO International Maritime Organization), which allows more deeply consider the current status and trends in the shipbuilding industry. For coal bulk carriers the dimensions were updated (length, breadth, draught, number of cargo holds) by every 10 000 tons of deadweight at level of 95% provision, for the first time in the practice of Russian researches obtained approximating dependencies between dimensions and deadweight.

It is concluded that further approximating dependencies can be included into a mathematical apparatus of integrated simulation models for marine coal terminals, which are specified with the stochastic distribution of ship calls. Actual dimensions of vessels can improve the accuracy of the design, it can be applied at all stages of the design (conceptual design, project documentation, working documentation), as well as for planning of cargo handling operations and ship calls for current operating activity.

Keywords: marine vessels, dimensions of bulk carriers, deadweight of bulk carriers, bulk carriers approximating dependencies between dimensions and deadweight, marine transportation of coal, marine ports and terminals, port planning (technological solutions of ports).

For citation:
Kuptsov, Nikolay V. "Research of bulk carriers actual dimensions for the port planning purposes (technological solutions of marine terminals)." *Vestnik Gosudarstvennogo universiteta morskogo i rechnogo flota imeni admirala S. O. Makarova* 9.2 (2017): 323–336. DOI: 10.21821/2309-5180-2017-9-2-323-336.

УДК 05.22.00

ИССЛЕДОВАНИЕ АКТУАЛЬНЫХ РАЗМЕРЕНИЙ БАЛКЕРОВ ДЛЯ ТЕХНОЛОГИЧЕСКОГО ПРОЕКТИРОВАНИЯ МОРСКИХ ПОРТОВ

Н. В. Купцов
ПАО «Газпром Нефть», Санкт-Петербург, Российская Федерация

Акватория и морской грузовой фронт угольных терминалов зависят от размерений и осадки судов - балкеров (навалочников), выполняющих судозаходы в порт. Габариты и максимальный дедвейт балкеров имеют тенденцию к росту вследствие эффекта масштаба грузоперевозок и динамичности рынка судостроения. Максимальные судовые партии возрастают каждое десятилетие, что влияет на конфигурацию причалов, объем строительных и дноуглубительных работ, диспетчеризацию морских терминалов. Для точного проектирования, а также грамотной эксплуатации морских терминалов существует необходимость в актуализации (каждые 2–3 года) характеристик судов за счет классифицирования, бенчмаркинга и аппроксимации.

В статье уточнены классификации судов-балкеров по дедвейту и региональным категориям и представлен детализированный состав мирового балкерного флота (распределение количества действующих и запланированных к строительству судов, состоящих на учете в Международной морской

организации ИМО), что позволяет более глубоко рассматривать текущее состояние и тенденции судостроительной отрасли. Для балкеров морских перевозок угля актуализированы размерения (длина, ширина, осадка, количество трюмов) с разбивкой по дедвейту каждые 10 000 т при обеспеченности 95 %, впервые в практике российских исследований получены аппроксимирующие зависимости размерений от дедвейта.

Сделан вывод о том, что в дальнейшем аппроксимирующие зависимости могут быть интегрированы в математический аппарат интегрированных симуляционных моделей морских угольных терминалов, для которых характерным является стохастический характер судозаходов. Актуальные размерения судов позволяют повысить детализацию проектирования, могут быть применены на всех стадиях технологического проектирования (предпроектные проработки, проектная документация, рабочая документация), а также для планирования погрузочно-разгрузочных операций судозаходов в рамках текущей эксплуатационной деятельности.

Ключевые слова: морские суда, размерения судов-балкеров (навалочников), дедвейт судов-балкеров, аппроксимирующие зависимости размерений судов-балкеров от дедвейта, морские перевозки угля, морские порты и терминалы, технологическое проектирование портов.

Для цитирования:
Купцов Н. В. Исследование актуальных размерений балкеров для технологического проектирования морских портов / Н. В. Купцов // Вестник Государственного университета морского и речного флота имени адмирала С. О. Макарова. — 2017. — Т. 9. — № 2. — С. 323–336. DOI: 10.21821/2309-5180-2017-9-2-323-336.

Введение

Перевозку навалочных грузов морем выполняются суда-балкеры, также называемые навалочниками. Данный тип судов получил стремительное развитие после Второй мировой войны для обеспечения возрастающих потребностей стран в энергоресурсах. Имеющая место в XX – XXI вв. тенденция к укрупнению судовых партий [1] позволяет снижать транспортные расходы на единицу груза. Возрастающие потребности индустриальных стран в угле предопределили наращивание количества балкерных судов мирового флота с одновременным укрупнением судовых партий (*эффект масштаба*), что отмечено в публикациях H. Ligteringen [2] и S. Chen [3]. Максимальный дедвейт судна-балкера увеличивается каждое десятилетие. Динамика изменения судовых партий приведена в табл. 1.

Таблица 1

Возрастание судовых партий балкеров (анализ базы данных IHS Fairplay)

Рассматриваемый период	1950-е гг.	1960-е гг.	1970-е гг.	1980-е гг.	1990-е гг.	2000-е гг.	2010 –2015 гг.
Стандартный дедвейт для усредненного судна, т	25 000	30 000	40 000	65 000	75 000	175 000	180 000
Экстремальный дедвейт для максимального судна, т	32 500	32 500	95 800	150 000 200 000 250 000 365 000	170 000 230 000 300 000 320 000	200 000 230 000 300 000 327 000	210 000 260 000 315 000 400 000

От характеристик судов напрямую зависят технологические характеристики акватории и перегрузочных комплексов (терминалов). В связи с тем, что отрасль судостроения динамично развивается вслед за техническим прогрессом и мировыми грузопотоками, для грамотного проектирования морских терминалов существует необходимость в актуальных характеристиках судов. Примером может служить популяризация в 1990 – 2000 гг. пирсовых гидротехнических сооружений с протяженной подходной эстакадой вместо фронтальных причальных стенок, позволяющих обеспечивать швартовку судов с большой осадкой (с увеличением судовых партий увеличивалась и осадка судов) на естественных глубинах без дополнительного дноуглубления, что характерно для этапа специализации перегрузочных комплексов [4], [5]. Наиболее протяженная подходная эстакада длиной 3660 м расположена на терминале Dalrymple Bay в Австралии (рис. 1).



Рис. 1. Угольный экспортный терминал Dalrymple Bay (Австралия) с длиной подходной эстакады 3 660 м (Google Maps и графика автора)

Морские порты являются производственными объектами с крупными капиталовложениями. Поэтому наличие детализированной и структурированной информации по характеристикам судов, являющейся исходными данными для проектирования, позволяет увеличить точность проектирования, а, следовательно, возможность принятия более грамотных и экономически целесообразных технических решений. Характеристики габаритов и осадки судов [6], выполняющих судозаходы в порт, являются важными исходными данными для технологического проектирования морского грузового фронта экспортного угольного терминала и акватории порта:

– от передаваемых нагрузок и осадки судна зависит конфигурация причальной линии: фронтальная или пирсовая (п. 2.2.3.3, РД 31.3.01.01-93 «Руководство по технологическому проектированию морских портов»);

– от длины судна $L_{суд}$ зависит длина причальной линии гидротехнического сооружения и параметры акватории (п. 13.3, РД 31.3.05-97 «Нормы технологического проектирования морских портов»);

– от осадки судна D зависят габариты и отметки дноуглубления причала, подходного канала и операционной акватории (разд. 5, РД 31.3.05-97 «Нормы технологического проектирования морских портов»);

– от ширины борта B зависит длина вылета стрелы судопогрузочной машины;

– от количества трюмов $N_{тр}$ зависит количество переходов судопогрузочной машины вдоль причала, а следовательно, также производительность и эффективность судопогрузочных операций (конвейерного оборудования) [7].

Помимо актуализации характеристик (за счет бенчмаркинга и классифицирования), с теоретической точки зрения перспективным научным направлением является выявление зависимостей длины, ширины, осадки от дедвейта судна (благодаря аппроксимации):

– актуализация характеристик позволяет повысить детализацию и точность технологического проектирования морских портов;

– выявление аппроксимирующих зависимостей предоставит возможность построения математических зависимостей при стохастическом характере судозаходов в рамках составления симуляционных моделей терминалов.

Классификация судов-балкеров

Уголь традиционно считается наименее дорогим энергоносителем по сравнению с газом, нефтью и атомной энергией. При этом традиционно исследованию балкерных судов уделяется меньшее внимание по сравнению с контейнерными и нефтеналивными судами.

Рынок энергоносителей в XX в. всегда имел тенденцию к росту, переживая краткосрочные кризисы, связанные с пересмотром спроса, предложения и стоимости энергоносителей. Прогнозы свидетельствуют об устойчивом наращивании объемов грузооборота угля даже при весомом снижении стоимости в период кризиса 2014 г. До 2040 г. ожидается сдержанный рост грузооборота угля (0,6 – 1,4 % в год), что позволит наращивать развитие морских перевозок и судостроения [8].

Транспортировку энергоносителей на большие расстояния выполняют морские суда. Во второй половине XX в. началось формирование классов балкерных судов, характеристики и названия которых определены габаритами каналов и мировых морских транспортных артерий. При этом не существует единого подхода к ранжированию судов по дедвейту (водоизмещение судна, включающее полную грузоподъемность судна: груз, балластная вода, питьевая вода, масло, топливо, продовольствие, экипаж), в справочниках и авторских публикациях указаны различные значения. В табл. 2 приведена обобщенная классификация судов-балкеров, уточненная на основе сопоставления различных источников:

– морских справочников H. Ligteringen [2], C. A. Thorensen [9];

– отраслевого обзора Lloyd's Register [10];

– классификаций судоходных компаний Ariston (www.aristonshipping.gr), Mitsui O.S.K. Lines (www.mol.co.jp);

– специализированных порталов Maritime Connector (www.maritime-connector.com), Bulk Carriers Guide (www. bulkcarrierguide.com), Marine Wiki (www.marinewiki.org), Maritime Zone (www. maritime-zone.com).

При обобщении классификации в различных источниках отмечены отклонения в 5 000 – 20 000 т при отнесении к определенному классу судов (в особенности для Handysize, Handymax, Panamax).

Таблица 2

Обобщенная классификация судов-балкеров

№ пп.	Класс	Дедвейт, т	Комментарии по названию и параметрам
1	Small Handysize	до 24 999	Используются для коротких плаваний в прибрежной торговле в качестве фидерных судов для рейдовой перевалки. Большинство судов оснащено судовыми кранами
2	Large Handysize	25 000 – 39 999	Распространенные суда средней вместимости
3	Handymax	40 000 – 49 999	Широко применяются в портах с ограничениями по осадке и длине судна. Подвид Supramax (дедвейт 50 – 65 тыс. т) имеет пять трюмов и судовые краны [11]
4	Large Handymax	50 000 – 59 999	
5	Panamax	60 000 – 79 999	Ограничения определяется размерами шлюзов Панамского канала. Размерения судов не должны превышать следующие значения: длина 294,1 м; ширина 32,3 м; осадка 12,0
6	Post Panamax	80 000 – 99 999	В сравнении с Panamax имеют меньшую осадку и большую ширину. Разрабатывались для портов с ограниченной осадкой. Изначально не имели возможности проходить через Панамский канал, но такая возможность появилась с расширением канала в 2016 г. (www.micanaldepanama.com)
7	Mini Capesize	100 000 – 129 999	Суда Capesize обладают габаритами, не позволяющими выполнять проводку судов через Панамский или Суэцкий канал. В названии обозначена необходимость огибать южные мысы (cape) континентов: Горн (Южная Америка) или Доброй Надежды (Африка)
8	Capesize	130 000 – 180 000	
9	Very Large Bulk Carrier (VLBC)	180 000 – 210 000	Для транспортировки крупных партий навалочных грузов между наиболее глубоководными портами мира
10	Very Large Ore Carrier (VLOC)	210 000 – 404 000	Для транспортировки руды, обладающей большой насыпной плотностью

В статье К. П. Манжула [12] отмечено, что часть морских портов Российской Федерации в настоящий момент способна принимать суда категорий Post-Panamax (Усть-Луга, Бронка, Восточный, Мурманск) и Capesize (Усть-Луга).

В некоторых источниках: Lloyd's Register [10], Maritime Connector, Bulk Carriers Guide, Maritime Zone, отмечается существование региональных наименований категорий балкерных судов, которые имеют особенности (длина, ширина, осадка), предусматривающие конкретные грузопотоки в связи с ограничениями по швартовным операциям в порту или с судоходной глубиной моря, канала. Например, учитывая ограничения реки Рейн, Hekkenberg в своем исследовании выполнил оптимизацию длины балкерных судов [13]. Региональные категории судов-балкеров приведены в табл. 3.

Таблица 3

Региональные категории судов-балкеров

№ пп.	Региональная категория	Типичный дедвейт, т	Класс	Ограничение	Объект, с которым связано ограничение
1	Seawaymax	28 500	Handysize	Длина до 225,6 м; ширина до 23,8 м; осадка до 8,1 м	Канал морского пути Святого Лаврентия (США)
2	Kamsarmax	82 000	Panamax	Длина до 229 м	Порт Камсар (Гвинея)
3	Dunkirkmax	175 000	Capesize	Ширина до 45 м, длина до 289 м	Порт Дюнкерк (Франция)
4	Newcastlemax	185 000	VLBC	Ширина до 50 м, длина до 300 м	Порт Ньюкасл (Австралия)
5	Setouchmax	205 000	VLBC	Осадка до 16,1 м	Глубина внутреннего Японского моря
6	Malaccamax	300 000	VLOC	Осадка до 20,5 м	Малаккский пролив (Индонезия)

В мировой практике суда-балкеры большой грузоподъемности используются для транспортировки как угля, так и руды. При этом суда с дедвейтом более 210 000 т выделяют в отдельную категорию Very Large Ore Carrier (VLOC), так как их конструкция предназначена для специализированной транспортировки руды. В связи с большой насыпной плотностью руды 1,6 – 4,5 т/м^3 (СП 37.13330.2012 «Промышленный транспорт») трюмы судов VLOC выполняют узкими для центрирования груза вдоль оси симметрии и вовлечения межкорпусного пространства в качестве дополнительных балластных отсеков (отмечено в исследованиях P. Cudina [14] и классификационного бюро Det Norske Veritas [15]) в целях обеспечения остойчивости судна при судопогрузочных операциях, плавании в регулярных и штормовых условиях. Конструктивные различия между судами VLOC и VLBC представлены на рис. 2.

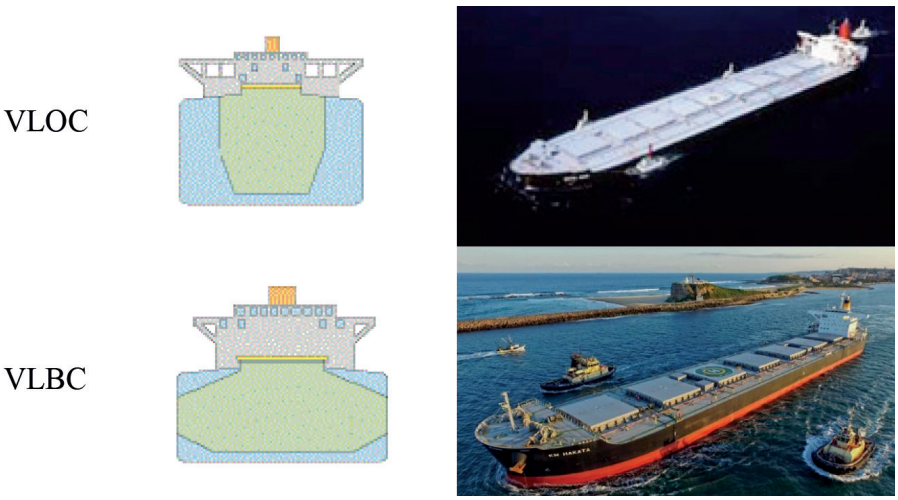


Рис. 2. Конструкция судов для транспортировки: угля VLBC и руды VLOC

Анализ состояния мирового балкерного флота

Численность судов мирового балкерного флота значительна, с каждым годов возрастает количество балкерных судов в связи с ростом мирового грузопотока. В результате анализа базы данных морского регистра IHS Fairplay автором работы было установлено, что по состоянию на январь 2016 г. мировой балкерный флот представлен 11 569 судами, состоящими на учете в Международной морской организации (ИМО), из них:

87,4 % = 10 117 шт. являются действующими (в работе, в ремонте, заложен киль, временно не выполняют операции)

12,6 % = 1 452 шт. запланированы к вводу до 2020 г. (анонсированные, в списке заказов, на реконструкции).

Детализация распределения количества действующих и запланированных судов в зависимости от класса приведена в табл. 4.

Таблица 4

Распределение существующих и планируемых к вводу судов-балкеров по классам (январь 2016 г., IHS Fairplay)

№ пп.	Класс	Диапазон дедвейта, тыс. т	Количество, шт.				Процент от общего количества			
			Существующее		Планируемое		Существующее		Планируемое	
1	Small Handysize	0 – 10	240	766	6	22	2,1	6,6	0,1	0,2
		10 – 20	268		6		2,3		0,1	
		20 – 25	258		10		2,2		0,1	
2	Large Handysize	25 – 30	723	2167	8	315	6,2	18,7	0,1	2,7
		30 – 40	1444		307		12,5		2,7	
3	Handymax	40 – 50	704	704	25	25	6,1	6,1	0,2	0,2
4	Large Handymax	50 – 60	1938	1938	77	77	16,8	16,8	0,7	0,7
5	Panamax	60 – 70	556	1767	452	476	4,8	15,3	3,9	4,1
		70 – 80	1211		24		10,5		0,2	
6	Post Panamax	80 – 90	825	1129	285	296	7,1	9,8	2,5	2,6
		90 – 100	304		11		2,6		0,1	
7	Mini Capesize	100 – 110	49	143	3	7	0,4	1,2	0,0	0,1
		110 – 120	85		2		0,7		0,0	
		120 – 130	9		2		0,1		0,0	
8	Capesize	130 – 140	1	742	0	17	0,0	6,4	0,0	0,1
		140 – 150	24		0		0,2		0,0	
		150 – 160	37		8		0,3		0,1	
		160 – 170	57		0		0,5		0,0	
		170 – 180	623		9		5,4		0,1	
9	VLBC	180 – 190	347	545	88	173	3,0	4,7	0,8	1,5
		190 – 200	7		0		0,1		0,0	
		200 – 210	191		85		1,7		0,7	
10	VLOC	210 – 250	42	216	16	44	0,4	1,9	0,1	0,4
		250 – 300	120		23		1,0		0,2	
		300 – 350	19		4		0,2		0,0	
		350 – 404	35		1		0,3		0,0	
Итого			**10 117**		**1 452**		**87,4**		**12,6**	
			11 569				**100**			

Установлено, что большинство существующих судов относятся к классу Post-Panamax и менее грузоподъемных (8471 шт. — 83,7 % от существующих судов), остальная часть относится к судам Mini Capesize и более вместительным (1646 шт. — 16,3 %). Наиболее востребованными судами средней вместимости, которые способны выполнять экономически эффективную транспортировку угля на длинные и короткие расстояния, являются Large Handysize (2167 шт. — 21,4 %), Large Hadymax (1936 шт. — 19,1 %) и Panamax (1767 шт. — 17,4 %). Распределение количества существующих судов в зависимости от дедвейта приведено на рис. 3.

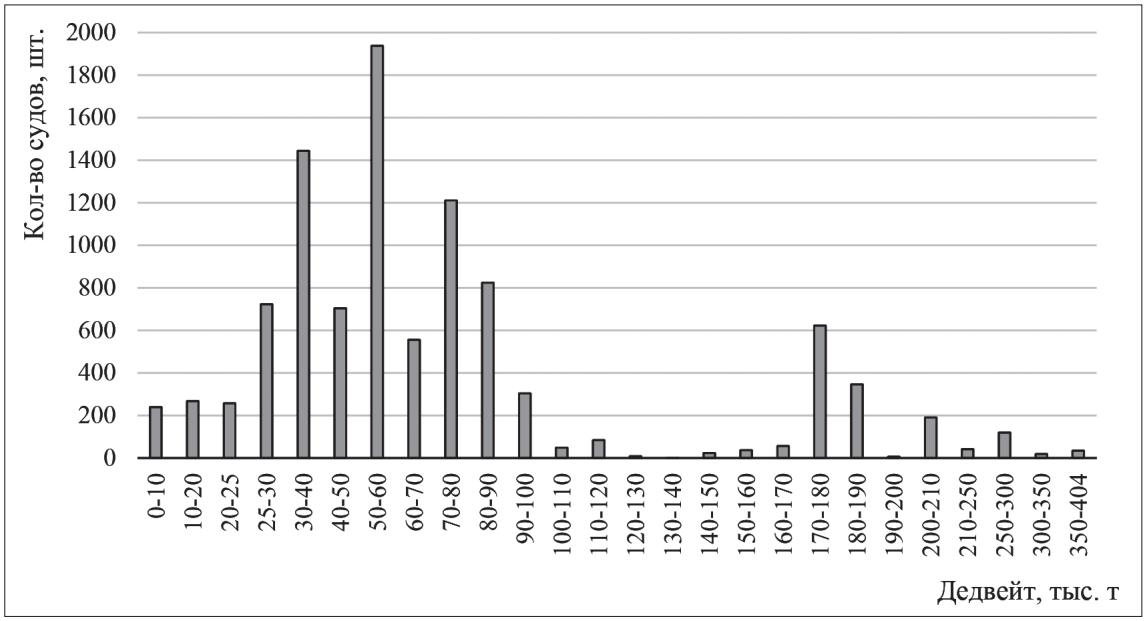


Рис. 3. Количество существующих судов-балкеров в зависимости от дедвейта (январь 2016 г., IHS Fairplay)

Также получен вывод о том, что помимо среднетоннажных судов большим спросом на запланированные к вводу суда обладают классы повышенной вместимости: Panamax (476 шт. — 32,8 % от планируемых судов), Post-Panamax (296 шт. — 20,4 %) и VLBC (14,9 % — 217 шт.). Данный факт указывает о тенденции к укрупнению судовых партий мировой торговли. Распределение количества запланированных к вводу судов в зависимости от дедвейта приведено на рис. 4.

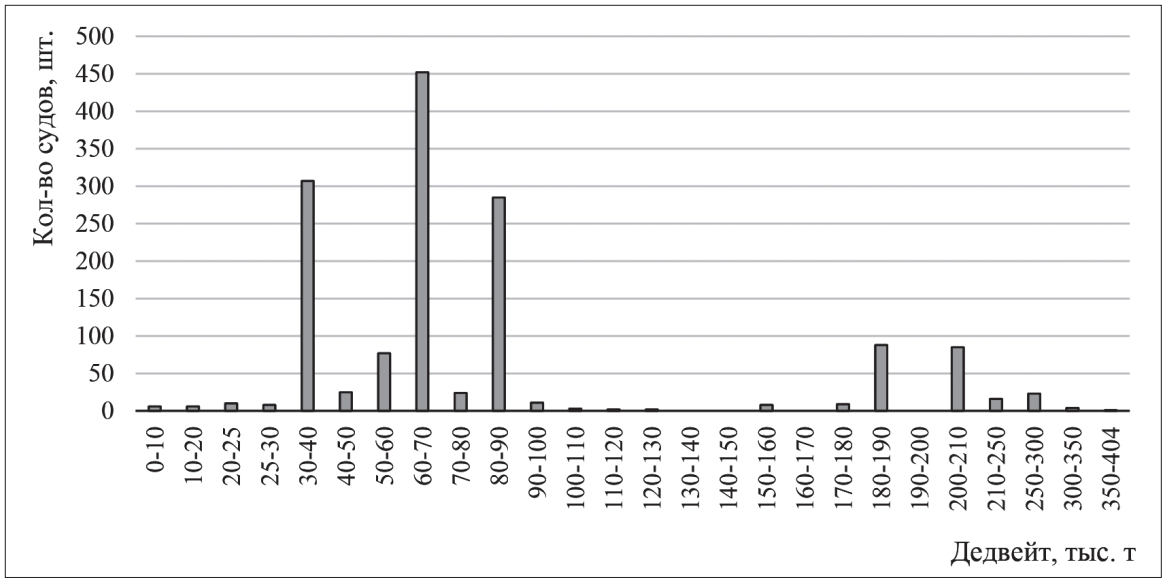


Рис. 4. Количество запланированных к вводу судов-балкеров в зависимости от дедвейта (январь 2016 г., IHS Fairplay)

Основные результаты для балкеров транспортировки угля: актуализация характеристик и выявление аппроксимирующих зависимостей

Характеристики судов-балкеров. В международной практике характеристики балкерных судов рассмотрены и приведены в различных источниках: в справочнике C. A. Thorensen [9], рекомендациях по проектированию портов и гаваней Японии [16], исследовании компании - производителя силовых установок балкеров MAN [17], руководящем документе РД 31.03.01-90 «Технико-экономические характеристики судов морского флота» [18], журналах о судостроении Significant Ships [19], исследовании N. Kuptsov характеристик судов для дальневосточных портов РФ [20]. Наиболее современным и подробным источником является справочник C. A. Thorensen [9], третье издание которого было выпущено в 2014 г., где характеристики судов рассмотрены в четырех «сценариях» различной обеспеченности: 50 %, 70 %, 90 % и 95 %.

Автором была выполнена также дополнительная детализация характеристик балкеров для транспортировки угля. В анализ вошли 10 873 существующих и планируемых к строительству угольных балкеров дедвейтом 15 000 … 210 000 т (из общего количества судов были исключены суда VLOC для транспортировки руды, а также суда-лейкеры для озер США и Канады). Суда были разделены на группы, по 10 000 т каждая. Для каждой тоннажной группы угольных балкеров судов при 95 % - й обеспеченности в качестве наиболее жесткого «сценария» по аналогии с [9] были актуализированы характеристики длины, ширины, осадки и количества трюмов. Результаты приведены в табл. 5.

Таблица 5

Размерения судов-балкеров для транспортировки угля (обработка базы данных судов IHS Fairplay по состоянию на январь 2016 г.)

№ пп.	Дедвейт судна, т	Обеспеченность 95 % (перцентиль)			
		Длина $L_{суд}$, м	Ширина B, м	Осадка D, м	Кол-во трюмов $N_{тр}$, шт.
1	20 000	158,6	25,0	9,3	5
2	30 000	180,5	27,2	10,4	5
3	40 000	190,4	32,0	10,9	5
4	50 000	200,0	32,3	11,8	5
5	60 000	200,0	32,3	13,0	5
6	70 000	225,0	36,0	13,3	7
7	80 000	229,0	32,3	14,6	7
8	90 000	229,9	38,0	14,6	7
9	100 000	240,0	43,0	14,9	7
10	110 000	255,2	43,0	15,7	7
11	120 000	260,4	43,0	15,4	7
12	130 000	266,0	44,0	16,2	9
13	140 000	267,8	43,0	16,0	9
14	150 000	270,4	43,0	17,4	9
15	160 000	288,7	46,8	17,7	9
16	170 000	290,5	46,0	18,2	9
17	180 000	292,2	45,0	18,3	9
18	190 000	295,0	47,0	18,3	9
19	200 000	300,0	50,0	18,1	9
20	210 000	300,0	50,0	18,5	9

По сравнению со справочником C. A. Thorensen [9] полученные результаты по отдельным позициям различаются по длине –15 … –5 %, по ширине –5 … +10 %, по осадке –15 … –5 %. Отличительной

особенностью данной статьи является более подробная разбивка по дедвейту (каждые 10 000 т), впервые приведно количество трюмов. Результаты представляют интерес с теоретической точки зрения и могут быть использованы для более точного технологического проектирования морских портов.

Существует ряд исследований, в которых авторы, обладая статистической базой характеристик судов, выполняют оптимизацию размерений судов в зависимости от выполняемых операций (S. Chen [21], C. Sys [22]) или от экономической составляющей фрахта (W. K. Talley [23], J. O. Jansson [24], Australian Government [25]), определяют параметры маневренности (A. Toma [26]).

Аппроксимирующие зависимости. В международной практике используются аппроксимирующие зависимости характеристик судов от дедвейта. Впервые подобные зависимости для судов-балкеров были приведены в 1983 г. в справочнике UNCTAD по проектированию портов в развивающихся странах [27] — в частности, были продемонстрированы графические кривые без численных зависимостей. Данного рода зависимости находятся в зоне внимания профессионалов и научного сообщества. В настоящий момент наиболее актуальные исследования этой тематики выполнены и приведены в справочнике H. Ligteringen [2], работах H. O. Kristensen [28], [29], исследованиях T. Van Vianen [30] и компании-производителя силовых установок балкеров MAN [17]. Цели установления подобных зависимостей различны: в рамках [2] автор использует их для корреляции с ограничениями по судоходству для каналов и портов, в рамках [30] — для использования в рамках симуляционных моделей портов, в рамках [17], [28], [29] — для корреляции с мощностью силовой установки и скоростью судна.

Автором установлены аппроксимирующие зависимости характеристик (длина, ширина, осадка) для балкеров, транспортирующих уголь. В анализ вошли 10 873 существующих и планируемых к строительству угольных балкеров дедвейтом 15 000 – 210 000 т. Методика и результаты представляют интерес для последующих теоретических исследований. Для аппроксимирующих функций (зависимости длины, ширины, осадки от дедвейта) применены степенные функции, для которых коэффициент достоверности аппроксимации по среднеквадратичному отклонению R^2 наиболее приближен к единице в сравнении с логарифмической или экспоненциальной функциями.

Длина угольных балкеров значительна, для самых крупных судов она достигает до 300 м. Для зависимости длины от дедвейта применена степенная функция $y = 8{,}109x^{0{,}2942}$ (где y — длина судна, x — дедвейт судна), достоверность аппроксимации при этом составляет $R^2 = 0{,}9482$. Зависимость длины судна от его дедвейта приведена на рис. 5.

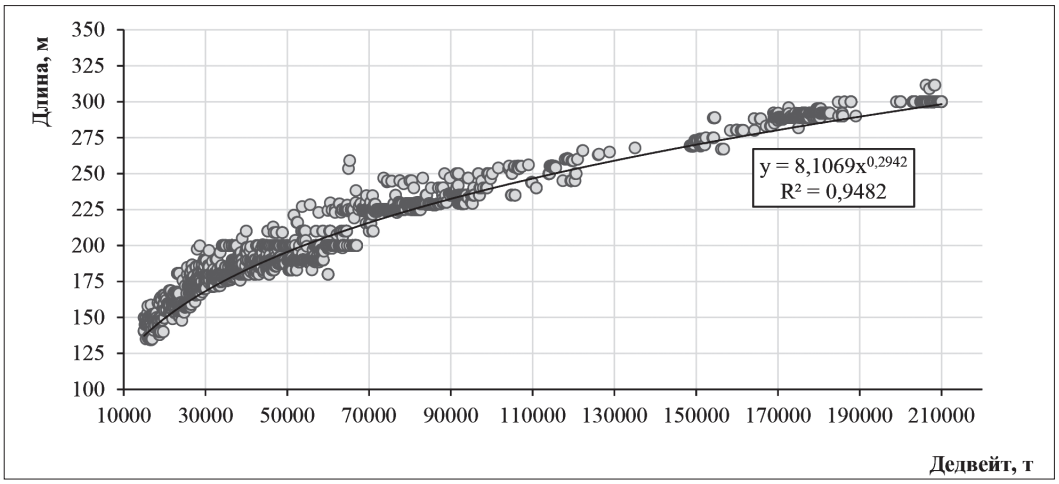


Рис. 5. Зависимость длины от дедвейта судна

Ширина угольных балкеров для самых крупных судов достигает до 50 м. Для зависимости ширины от дедвейта применена степенная функция $y = 1{,}4853x^{0{,}2805}$ (где y — ширина судна, x — дедвейт судна), достоверность аппроксимации при этом составляет $R^2 = 0{,}8926$. Зависимость ширины судна от его дедвейта приведена на рис. 6.

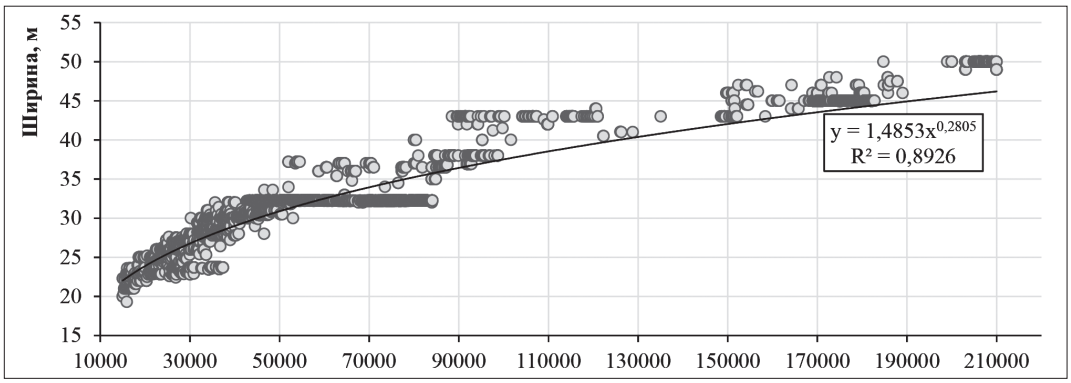


Рис. 6. Зависимость ширины от дедвейта судна

Осадка угольных балкеров для самых крупных судов достигает до 18,5 м. Для выявления зависимости осадки от дедвейта применена степенная функция $y = 0{,}3297x^{0{,}3318}$ (где y — осадка судна, x — дедвейт судна), достоверность аппроксимации при этом составляет $R^2 = 0{,}9646$. Зависимость осадки судна от его дедвейта приведена на рис. 7.

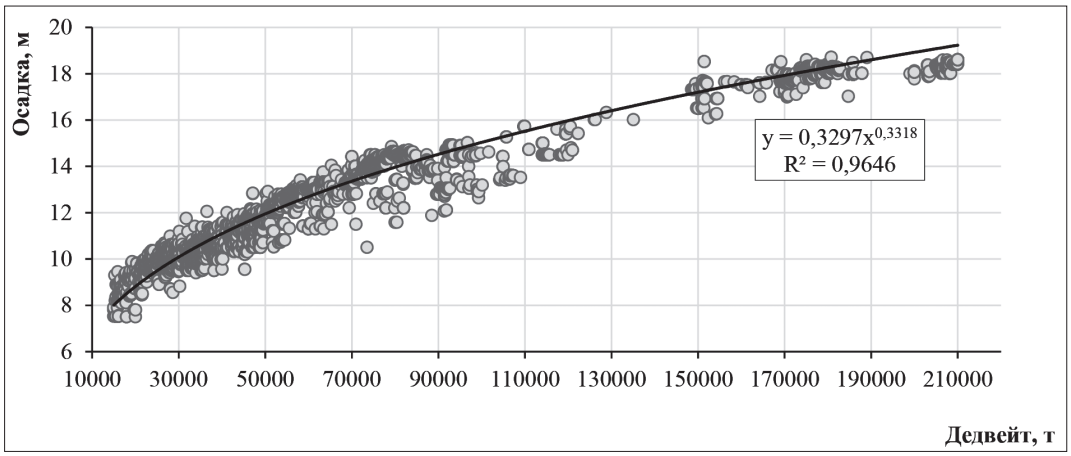


Рис. 7. Зависимость осадки от дедвейта судна

Количество трюмов угольных балкеров обычно нечетное: 5, 7 или 9 шт. Незначительное количество судов обладает четным количеством: четыре или шесть трюмов. Установлены следующие зависимости количества трюмов судна от дедвейта: пять трюмов имеют суда дедвейтом до 60 000 т; семь трюмов для судов дедвейтом 70 000 … 120 000 т; девять трюмов для судов дедвейтом 130 000 … 210 000 т. Графическое распределение количества трюмов судна от его дедвейта приведено на рис. 8.

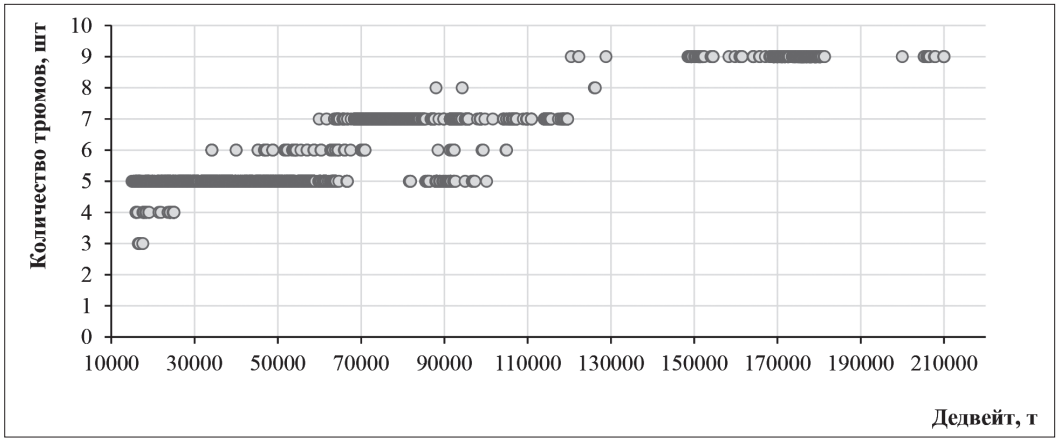


Рис. 8. Зависимость количества трюмов от дедвейта судна

Метод и результаты представляют интерес с теоретической точки зрения. В дальнейшем автором планируется их использование в рамках внедрения в математический аппарат симуляционного моделирования судопогрузочных операций экспортного угольного терминала аналогично рассмотренным в работе [30]. В сравнении с результатами исследования T. Van Vianen [30] полученные апроксимирующие зависимости демонстрируют схожесть (R^2 — для длины и ширины отличается незначительно) или большую точность (R^2 — для осадки значительно ближе к единице) степени соответствия трендовой модели исходным данным. При этом в рамках данной статьи использованы более комплексные исходные данные по 10 873 судам (мировой балкерный флот для транспортировки угля), в то время как в работе [30] использованы характеристики 289 судов, выполняющих судозаходы в порты Нидерландов. Следует отметить, что количество трюмов в различных источниках до этого не приводилось.

Выводы

Следует отметить, что результаты были получены по двум основным направлениям:

– актуализация классификации и количественного состава мирового балкерного флота;

– исследования в области размерений судов-балкеров для перевозки угля.

В рамках первого направления уточнена классификация балкерных судов по тоннажным группам (см. табл. 2) и региональным категориям (см. табл. 3), детализировано распределение количества действующих и запланированных для строительства судов-балкеров, состоящих на учете в Международной морской организации ИМО (см. табл. 4, рис. 3 и 4). Полученные результаты являются обзорными, они позволяют оценить текущее состояние мирового балкерного флота и тенденции рынка судостроения.

В рамках второго направления для балкеров транспортировки угля актуализированы размерения (длина, ширина, осадка, количество трюмов) с разбивкой 10 000 т по дедвейту при обеспеченности 95 % (см. табл. 5), а также установлены аппроксимирующие зависимости размерений судов от дедвейта (графически и алгебраически приведены на рис. 5 – 8). Полученные результаты представляют теоретический и практический интерес для более точного технологического проектирования морского грузового фронта перегрузочных комплексов (терминалов), акватории и подходных каналов, а также для внедрения в математический аппарат в составе интегрированных симуляционных моделей терминала, которые могут применяться как для проектирования, так и планирования в рамках текущей эксплуатационной деятельности.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Wei G.* New breed of bulk carrier designs: upsizing trend / G. Wei, S. Z. L. Neo, J. T. Heng, H. L. Lee. — Singapore Maritime Academy, 2015. — 153 p.

2. *Ligteringen H.* Ports and terminals / H. Ligteringen, H. Velsink. — CA Delft, Netherlands: VSSD, 2012. — 276 p.

3. *Chen S.* Modelling and Forecasting in Dry Bulk Shipping / S. Chen. — CPI Wohrmann, 2011. — 271 p.

4. *Кириченко А. В.* Взаимоотношения города и порта: эволюция и перспективы / А. В. Кириченко, А. Л. Кузнецов // Транспорт Российской Федерации. — 2014. — № 1 (50). — С. 12–15.

5. *Кузнецов А. Л.* Генезис моделей развития портов в современной транспортной науке / А. Л. Кузнецов, А. В. Галин // Вестник Государственного университета морского и речного флота имени адмирала С. О. Макарова. — 2015. — № 2 (30). — С. 141–153.

6. *Papanikolaou A.* Selection of Main Dimensions and Calculation of Basic Ship Design Values / A. Papanikolaou // Ship Design. — Springer Netherlands, 2014. — Pp. 69–292. DOI: 10.1007/978-94-017-8751-2_2.

7. *Isbester J.* Bulk Carrier Practice / J. Isbester. — Nautical Institute, 2010. — 423 p.

8. *Купцов Н. В.* Перспективы развития морских портовых угольных терминалов в России/ Н. В. Купцов // Транспорт Урала. — 2016. — № 1 (48). — С. 16–23. DOI: 10.20291/1815-9400-2016-1-16-23.

9. *Thorensen C. A.* Port Designer's Handbook / C. A. Thorensen. — Third Edition. — London: Thomas Telford Limited, 2014. — 587 p.

10. Infosheet No. 30: Modern ship size definitions. — Lloyd's Register Foundation, 2014. — 1 p.

11. *Пен А. В.* Основные тенденции развития и новые технологии в гражданском судостроении / А. В. Пен // Транспорт Российской Федерации. — 2015. — № 4 (59). — С. 44–51.

12. *Манжула К. П.* Готовность морских портов России к приему сухогрузов типа Post-Panamax и Capesize / К. П. Манжула, Е. Е. Андриянова // Наземные транспортно-технологические комплексы и средства: материалы Междунар. науч.-техн. конф. — Тюмень: Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Тюменский индустриальный университет», 2016. — С. 181–185.

13. *Hekkenberg R.* Optimization of the dimensions of dry bulk ships: The case of the river Rhine / R. Hekkenberg // Maritime Economics & Logistics. — 2016. — Vol. 18. — Is. 2. — Pp. 211–229. DOI: 10.1057/mel.2014.36.

14. *Cudina P.* Design procedure and mathematical models in the concept design of tankers and bulk carriers / P. Cudina // Brodogradnja. — 2008. — Vol. 59. — № 4. — Pp. 323–339.

15. Strength Analysis of Hull Structure in Bulk Carriers – Classification Notes, no. 31.1. — Det Norske Veritas AS, 2011. — 99 p.

16. The overseas coastal area development institute of Japan et al. Technical standards and commentaries for port and harbour facilities in Japan. — Overseas Coastal Area Development Institute of Japan, 2009. — 981 p.

17. Propulsion Trends in Bulk Carriers. — MAN Diesel & Turbo, 2014. — 28 p.

18. РД 31.03.01-90. Технико-экономические характеристики судов морского флота. — М: «Мортехинформреклама», 1992. — 232 с.

19. Significant Ships of 2015. — Edition 26. — Royal Institution of Naval Architects, 2015. — 92 p.

20. *Kuptsov N.* Characteristics of Bulk Carriers with Respect to the Developing Export Coal Terminals on the Far East of Russia / N. Kuptsov // Applied Mechanics and Materials. — 2015. — Vol. 725–726. — Pp. 333–341. DOI: 10.4028/www.scientific.net/AMM.725-726.333.

21. *Chen S.* Simulation-based optimization of ship design for dry bulk vessels / S. Chen, K. Frouws, E. Van De Voorde // Maritime Economics and Logistics. — 2011. — Vol. 13. — Is. 2. — Pp. 190–212. DOI: 10.1057/mel.2011.2.

22. *Sys C.* In search of the link between ship size and operations / C. Sys, G. Blauwens, E. Omey, E. Van De Voorde, F. Witlox // Transportation Planning and Technology. — 2008. — Vol. 31. — Is. 4. — Pp. 435–463. DOI: 10.1080/03081060802335109.

23. *Pope J. A.* Inventory costs and optimal ship size / J. A. Pope, W. K. Talley // Logistics and Transportation Review. — 1988. — Vol. 24. — № 2. — Pp. 107.

24. *Jansson J. O.* A model of scheduled liner freight services: Balancing inventory cost against ship owner's costs / J. O. Jansson, D. Shneerson // Logistics and Transportation Review. — 1985. — Vol. 21. — № 3. — Pp. 195–215.

25. Characteristics and Cost Structure of the Bulk Shipping Fleet. — Canberra: Australian Government Publishing Service, 1988. — 244 p.

26. *Toma A.* Determination of relevant features of a scale model for a 55 000 dwt bulk carrier necessary to study the ship maneuverability / A. Toma, M. Waldemar, M. Pricop // Scientific Bulletin" Mircea cel Batran" Naval Academy. — 2016. — Vol. 19. — Is. 1. — Pp. 128. DOI: 10.21279/1454-864X-16-I1-007.

27. Port Development. A handbook for planners in developing countries. — Second Edition, Revised and expanded. — New York: UNCTAD, 1985. — 227 p.

28. *Kristensen H. O.* Determination of Regression Formulas for Main Dimensions of Tankers and Bulk Carriers based on IHS Fairplay data. Project no. 2010-56, Emissionsbeslutningsstøttesystem, Work Package 2, Report no. 02 / H. O. Kristensen. — Technical University of Denmark, 2012. — 35 p.

29. *Kristensen H. O. H.* Existing Design Trends for Tankers and Bulk Carriers - Design Changes for Improvement of the EEDI in the Future / H. O. H. Kristensen, M. Lützen // IMDC2012. — Glasgow, United Kingdom, 2012. — 15 p.

30. *Van Vianen T. A.* Simulation-integrated Design of Dry Bulk Terminals / T. A. Van Vianen. — Delft University of Technology, 2015. — 247 p.

REFERENCES

1. Wei, G., S. Z. L. Neo, J. T. Heng, and H. L. Lee. *New breed of bulk carrier designs: upsizing trend*. Singapore Maritime Academy, 2015.

2. Ligteringen, H., and H. Velsink. *Ports and terminals*. CA Delft, Netherlands: VSSD, 2012.

3. Chen, S. *Modelling and Forecasting in Dry Bulk Shipping.* CPI Wohrmann, 2011.

4. Kirichenko, A. V., and A. L. Kuznetsov. "Interrelations between cities and ports: evolution and perspectives." *Transport Rossiiskoi Federatsii* 1(50) (2014): 12–15.

5. Kuznetsov, A. L., and A. V. Galin. "Genezis modelei razvitiya portov v sovremennoi transportnoi nauke." *Vestnik Gosudarstvennogo universiteta morskogo i rechnogo flota imeni admirala S.O. Makarova* 2(30) (2015): 141–153.

6. Papanikolaou, Apostolos. "Selection of Main Dimensions and Calculation of Basic Ship Design Values." *Ship Design*. Springer Netherlands, 2014. 69–292. DOI: 10.1007/978-94-017-8751-2_2.

7. Isbester, J. *Bulk Carrier Practice*. Nautical Institute, 2010.

8. Kuptsov, Nikolay Vladimirovich. "Development prospects of Russian marine coal terminals." *Transport Urala* 1(48) (2016): 16–23. DOI: 10.20291/1815-9400-2016-1-16-23.

9. Thorensen, C. A. *Port Designer's Handbook*. Third Edition. London: Thomas Telford Limited, 2014.

10. *Infosheet No. 30: Modern ship size definitions*. Lloyd's Register Foundation, 2014.

11. Pen, A.V. "Main development trends and new technologies in civil shipbuilding." *Transport Rossiiskoi Federatsii* 4(59) (2015): 44–51.

12. Manzhula, K. P., and E. E. Andriyanova. "Readiness of Russian seaports to work with Post-Panamax and Capesize dry-cargo ships." *Nazemnye transportno-tekhnologicheskie kompleksy i sredstva: materialy Mezhdunarodnoi nauchno-tekhnicheskoi konferentsii*. Tyumen': Federal'noe gosudarstvennoe byudzhetnoe obrazovatel'noe uchrezhdenie vysshego obrazovaniya «Tyumenskii industrial'nyi universitet», 2016. 181–185.

13. Hekkenberg, Robert. "Optimization of the dimensions of dry bulk ships: The case of the river Rhine." *Maritime Economics & Logistics* 18.2 (2016): 211–229. DOI: 10.1057/mel.2014.36.

14. Čudina, Predrag. "Design procedure and mathematical models in the concept design of tankers and bulk carriers." *Brodogradnja* 59.4 (2008): 323–339.

15. *Strength Analysis of Hull Structure in Bulk Carriers – Classification Notes, no. 31.1.* Det Norske Veritas AS, 2011.

16. *The overseas coastal area development institute of Japan et al. Technical standards and commentaries for port and harbour facilities in Japan*. Overseas Coastal Area Development Institute of Japan, 2009.

17. *Propulsion Trends in Bulk Carriers*. MAN Diesel & Turbo, 2014.

18. Russian Federation. Working documentation RD 31.03.01-90. Tekhniko-ekonomicheskie kharakteristiki sudov morskogo flota. M: «Mortekhinformreklama», 1992.

19. *Significant Ships of 2015.* 26th ed. Royal Institution of Naval Architects, 2015.

20. Kuptsov, Nikolay. "Characteristics of Bulk Carriers with Respect to the Developing Export Coal Terminals on the Far East of Russia." *Applied Mechanics and Materials* 725–726 (2015): 333–341. DOI: 10.4028/www.scientific.net/AMM.725-726.333.

21. Chen, Shun, Koos Frouws, and Eddy Van De Voorde. "Simulation-based optimization of ship design for dry bulk vessels." *Maritime Economics & Logistics* 13.2 (2011): 190–212. DOI: 10.1057/mel.2011.2

22. Sys, Christa, Gust Blauwens, Eddy Omey, Eddy Van De Voorde, and Frank Witlox. "In search of the link between ship size and operations." *Transportation Planning and Technology* 31.4 (2008): 435–463. DOI: 10.1080/03081060802335109.

23. Pope, James A., and Wayne K. Talley. "Inventory costs and optimal ship size." *Logistics and Transportation Review* 24.2 (1988): 107.

24. Jansson, Jan Owen, and Dan Shneerson. "A model of scheduled liner freight services: balancing inventory cost against shipowners'costs." *Logistics and Transportation Review* 21.3 (1985): 195–215.

25. *Characteristics and Cost Structure of the Bulk Shipping Fleet*. Canberra: Australian Government Publishing Service, 1988.

26. Toma, Alecu, Mironiuk Waldemar, and Mihail Pricop. "Determination of relevant features of a scale model for a 55 000 DWT bulk carrier necessary to study the ship maneuverability." *Scientific Bulletin" Mircea cel Batran" Naval Academy* 19.1 (2016): 128. DOI: 10.21279/1454-864X-16-I1-007.

27. *Port Development. A handbook for planners in developing countries*. Second Edition, Revised and expanded. New York: UNCTAD, 1985.

28. Kristensen, H. O. *Determination of Regression Formulas for Main Dimensions of Tankers and Bulk Carriers based on IHS Fairplay data*. Project no. 2010-56, Emissionsbeslutningsstøttesys-tem, Work Package 2, Report no. 02 / H.O. Kristensen. Technical University of Denmark, 2012.

29. Kristensen, Hans Otto Holmegaard, and Marie Lützen. "Existing Design Trends for Tankers and Bulk Carriers-Design Changes for Improvement of the EEDI in the Future." *IMDC2012*. Glasgow, United Kingdom, 2012.

30. Van Vianen, T.A. *Simulation-integrated Design of Dry Bulk Terminals*. Delft University of Technology, 2015.

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРЕ

Купцов Николай Владимирович —
главный специалист по поддержке
проектной деятельности
ПАО «Газпром Нефть»
190000, Российская Федерация,
Санкт-Петербург, ул. Почтамтская, 3-5
e-mail: *kuptsov.nikolay@gmail.com*

INFORMATION ABOUT THE AUTHOR

Kuptsov, Nikolay V. —
Lead specialist for the projects support
PJSC "Gazprom Neft"
3-5 Pochtamtskaya Str., St Petersburg, 190000,
Russian Federation
e-mail: *kuptsov.nikolay@gmail.com*

Статья поступила в редакцию 20 декабря 2016 г.
Received: December 20, 2016.

ВОДНЫЕ ПУТИ СООБЩЕНИЯ И ГИДРОГРАФИЯ

DOI: 10.21821/2309-5180-2017-9-2-337-345

DEVELOPMENT SYSTEM OF CONTROL AND INFORMATION SYSTEM FOR SAFETY OF NAVIGATION

A. V. Kayuda, M. A. Kolosov

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

The article analyzed accidents on inland waterways that have occurred when technological impacts of water transport (including the sluicing), natural effects and the overall estimated impact of these accidents. A revealed disadvantage allows to mark the lacks of exploitation of internal water-ways, normative base and actions of navigator. In the article totality of influencing factors is considered on safety at admission of ships through access duct and lock chamber, possible reasons and scenarios of accidents. And also dependence on these factors, charts of the modes of navigate ships necessary for a help to the navigators in determination of location of ship in the chamber of lock chamber and access duct. The article of research is choose the questions of safety of navigate ships through navigation lock. It presented several innovative options to reduce the accident rate in the navigation lock with the help of control and information system In the article all the components necessary for operation control and information system, such as equipment for controlling the speed, computer management software, signal-light equipment and informing signal - informing sound equipment. The article also assessed the possibility of using a variety of speed control systems ship in the approach channel and the navigation lock,, such as radio-navigation instrument landing system, satellite (GPS, Glonass), stationary (laser) laser system cross-sections. Considered arising from this problem and their solution. The basic recommendations, the installation of appropriate equipment for these systems. Proposed a phased action plan for the implementation and control information system.

Keywords: navigation lock, ship impact, system of control, safety of navigation, accident, navigator.

For citation:
Kayuda, Aleksandr V., and Mikhail A. Kolosov. "Development system of control and information system for safety of navigation." *Vestnik Gosudarstvennogo universiteta morskogo i rechnogo flota imeni admirala S. O. Makarova* 9.2 (2017): 337–345. DOI: 10.21821/2309-5180-2017-9-2-337-345.

УДК 626.44

РАЗРАБОТКА КОНТРОЛЬНО-ИНФОРМАЦИОННОЙ СИСТЕМЫ ОБЕСПЕЧЕНИЯ БЕЗОПАСНОСТИ СУДОПРОПУСКА

А. В. Каюда, М. А. Колосов

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

В статье проанализированы аварии на внутренних водных путях, произошедшие при техногенных воздействиях водного транспорта (в том числе при шлюзовании), природных воздействиях и в целом оцениваются последствия этих аварий. Выявлены недостатки эксплуатации внутренних водных путей, нормативной базы и действий судоводителя. В статье рассмотрена совокупность факторов, воздействующих на безопасность при пропуске судов через подходные каналы и камеры шлюзов, возможные причины и «сценарии» аварий, а также зависимость от этих факторов, графиков режимов движения судов, необходимых для помощи судоводителям в определении местонахождения судна в камере шлюза и подходном канале. Предметом исследования выбраны вопросы безопасности движения судов через шлюзы. Представлен анализ современных систем контроля на шлюзах за движением судов. Представлено несколько инновационных вариантов для уменьшения аварийности в шлюзах с помощью контрольно-информационной системы. В статье предложены все компоненты, необходимые для работы контрольно-информационной

систем: оборудование для контроля скорости движения, компьютерная программа управления, сигнально-световое информирующее оборудование и сигнально-звуковое информирующее оборудование. Также в статье оценивается возможность применения различных систем контроля скорости судна в подходном канале и судоходном шлюзе: радионавигационная курсо-глиссадная система, спутниковая (GPS, Глонасс), стационарная (лазерная), система лазерных створов. Рассмотрены возникающие при этом проблемы и их решение. Сформулированы основные рекомендации установки соответствующего оборудования для данных систем. Предложен поэтапный план действий по внедрению контрольно-информационной системы.

Ключевые слова: судоходный шлюз, навал судна, система контроля, безопасность судоходства, авария, судоводитель.

Для цитирования:
Каюда А. В. Разработка контрольно-информационной системы обеспечения безопасности судопропуска / А. В. Каюда, М. А. Колосов // Вестник Государственного университета морского и речного флота имени адмирала С. О. Макарова. — 2017. — Т. 9. — № 2. — С. 337–345. DOI: 10.21821/2309-5180-2017-9-2-337-345.

Введение

В судоходных шлюзах большую угрозу представляют техногенные воздействия во время судопропуска. Аварии происходят во время движения судна по подходному каналу или в камере судоходного шлюза. Самые масштабные аварии произошли 1994 г. в шлюзе Пермского гидроузла и 2004 г. в шлюзе Константиновского гидроузла. Тогда виновником аварии было само судно [1]. Эти аварии вызвали значительный простой шлюза.

Очень часто именно человеческий фактор становится одной из главных причин аварий [2], таких как затопление т/х «Булгария», столкновение т/х «А. Суворов» с опорой моста и прочие аварии. Гораздо меньше аварийных ситуаций происходит по причине отказа техники.

Одна из наиболее частых аварий в судоходном шлюзе — это навал на ворота шлюза. Судоводитель не дожидается разрешающего цвета светофора, идет на ворота шлюза, вследствие чего происходит навал. Также при входе в шлюз на управление судном влияют такие факторы, как поршневой эффект, влияние ветра, инерция судна, [3] и учесть их судоводителю без вспомогательной техники очень сложно. На данный момент в правилах судоводителей не уточняется, какой должна быть скорость судна в камере шлюза. Кроме требований двигаться со скоростью, обеспечивающей безопасность, ничего не сказано. Но если считать, что «безопасная» скорость должна быть малой, то именно при такой скорости судно теряет управляемость. Судно при движении входит в контакт с конструкцией шлюза и повреждает штрабной бетон ворот и рымов, стен, отбойную раму рабочих ворот, отрывает элементы ремонтных ворот, расположенных в нишах. При увеличенных скоростях судоводитель не успевает включить тормоз, и судно несётся в ворота наполненного шлюза, наваливаясь на них. Если судно двигается в обратном направлении (заходит в опорожнённую камеру), то удар происходит в стену падения верхней головы [4].

Постановка и описание задачи

Целью является разработка системы регулирования режимов движения судов в процессе судопропуска через шлюзы и предупреждение опасных взаимодействий с конструкциями шлюза (столкновение, навалы). Такая система должна позволить оценивать степень уменьшения скорости при подходе к шлюзу и помочь в определении распределения вероятных скоростей в отдельных точках при подходе к шлюзу. Основная задача — разработать специальные мероприятия для помощи судоводителям в определении местонахождения судна в подходном канале и камере, расстояния до ворот и скорости судна.

Система регулирования режимов движения

Все системы регулирования режимов движения судов должны включать следующие подсистемы:

I подсистема — включает оборудование контролирующее движение, установленная в камере шлюза и в подходных каналах шлюза. Их задача — фиксация нарушения режима движения судна.

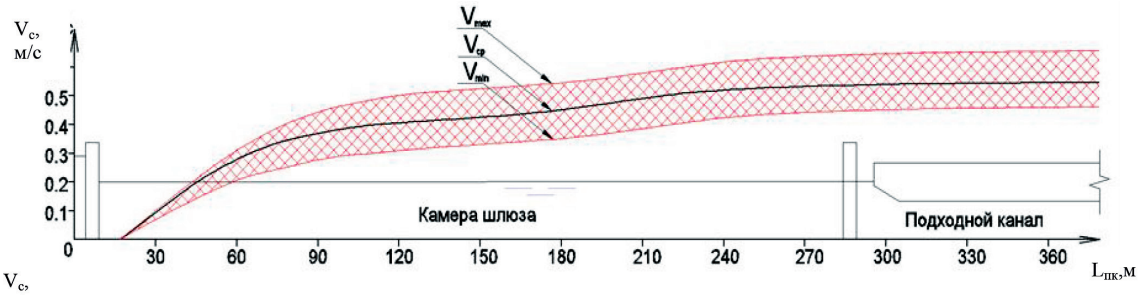
II подсистема — управляющая, включающая компьютерную программу, посредством которой начальник вахты на шлюзе задает нормативные режимы движения судна в зависимости от его типа (размера судна, его водоизмещения). Таких программ на шлюзе должно быть несколько (например, для судов грузоподъёмностью 5000 т, 3000 т, 2000 т, 1000 т).

III подсистема — сигнальная световая система, включающая световые сигналы, установленные на воротах, стенах зданий управления, мостовых пролётах. Их задача — привлечь внимание судоводителя и дать ему указание («*стоп*», «*сбавь ход*» и др.). Сигналы могут быть пульсирующими или типа «бегущая строка».

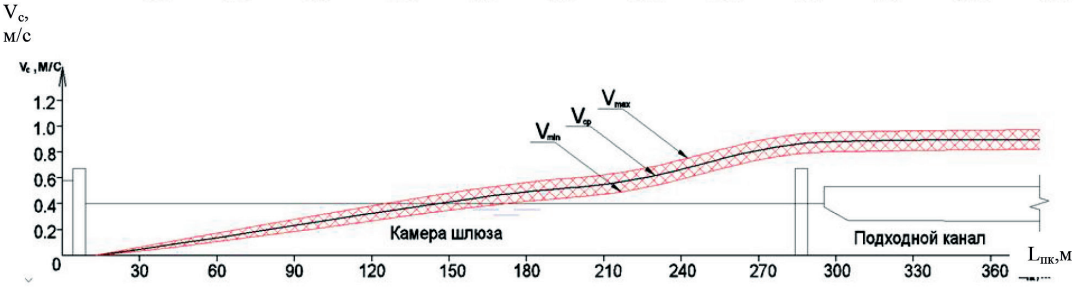
IV подсистема — сигнальная звуковая, т. е. дублирующая световую систему. Указания и предупреждения должны передаваться через радио в рулевую рубку. Возможна передача в рубку не только звукового, но и светового сигнала.

Для составления компьютерной программы управления необходимо знать значения безопасных режимов движения судов в подходных каналах и в камере шлюза. Такие режимы движения в виде графиков функций «*скорость – путь*» получены в результате натурных наблюдений, проводимых на шлюзах Волго-Донского канала, Волго-Балтийского водного пути, на шлюзах гидроузлов реки Волги. Эти наблюдения проводились в 60-е – 70-е гг. XX в. [5] с целью разработки оптимальных режимов движения судов для увеличения судопропускной способности шлюзов. Сейчас эти наблюдения могут быть использованы для разработки безопасных режимов движения судов. Такие графики скоростного режима необходимо составить для каждого шлюза и типа судна, проходящего через него (рис. 1). Необходимо закрепить в правилах прохождения судна через шлюз неукоснительное выполнение контроля движения судна, строго следуя по соответствующему скоростному графику. Учитывая габариты судна и камеры шлюза, гидродинамические, ветровые и прочие условия, специально разработанная система рассчитывает график скорости движения судна, выводит его судоводителю на экран и далее контролирует курс и скорость судна с помощью системы контроля движения.

а)



б)



в)

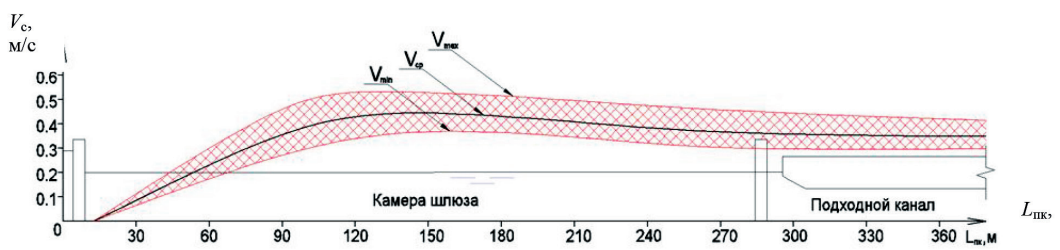


Рис. 1. Графики режима движения:
а — толкаемого состава; *б* — пассажирского судна; *в* — судна типа «Волга-Флот»

Создание графиков движения поможет учесть всю совокупность факторов, воздействующих на безопасность при пропуске судов через подходные каналы и камеры шлюзов. Они дадут возможность производить самооценку действий судоводителю, что значительно повысит безопасность судоходства.

Система контроля движения

На многих шлюзах установлены видеокамеры, которые должны помогать осуществлять контроль над процессом шлюзования. Применяемые системы видеонаблюдения не дают достаточной информации о местонахождении судна и расстоянии до ворот шлюза. Видеоизображение значительно искажает данные о реальной ситуации в шлюзе и подходном канале из-за места установки камеры, а также имеет ограниченный угол обзора. Поэтому увеличение количества камер видеонаблюдения в камере шлюза и использование современных систем машинного зрения [6] нерационально из-за большой погрешности данных.

Для безопасного входа судов в камеру шлюза целесообразно рассматривать следующие системы контроля движения судна:

– радионавигационная система контроля судна (курсо-глиссадная система);
– спутниковая (GPS, Глонасс) система навигации и измерения скорости движения судна;
– стационарная система измерения скорости движения судна «Лидар»;
– система лазерных створов.

Радионавигационная система контроля судна на основе курсо-глиссадной системы, применяемой в авиации, состоит из двух радиомаяков: курсового радиомаяка (КРМ) и глиссадного радиомаяка (ГРМ).

При работе КРМ формирует два сигнала, которые схематично можно показать вдоль траектории, по которой судно заходит в шлюз. Если судно находится точно на пересечении этих двух лепестков, то мощность обоих сигналов одинакова, соответственно разность их мощностей равна нулю и индикаторы прибора выдают «0». Это означает, что курс движения правильный. Если судно отклонилось влево или вправо, то мощность одного сигнала начинает преобладать над другим. И чем дальше от линии курса, тем больше преобладание сигнала.

ГРМ работает точно по такому же принципу, только в вертикальной плоскости. Следовательно, по глиссадному маяку можно отследить, на каком расстоянии находится судно. За счет разницы в мощности сигнала приемник точно устанавливает, насколько далеко судно от ворот шлюза и линии курса (рис. 2).

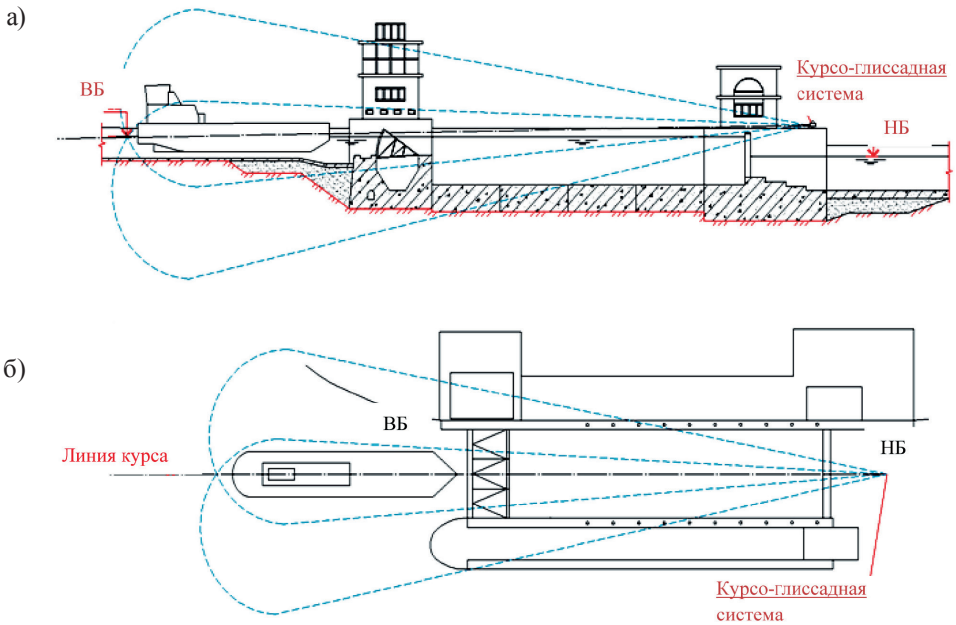


Рис. 2. Контроль процесса шлюзования при помощи радионавигационной системы контроля судна:
а — вид по линии курса; *б* — план
Условные обозначения: ВБ — верхний бьеф; *НБ* — нижний бьеф

Для получения судоводителем информации с помощью радионавигационной системы контроля судно должно быть оборудовано навигационными приборами, которые могут быть подобны пилотажно-навигационным приборам, применяемым в авиации для обеспечения экипажа информацией о положении судна относительно заданной линии пути в горизонтальной плоскости, сторон света, а также радиоориентиров при движении судна. Все данные поступают на приборы через радиоприёмник.

Спутниковые (GPS и Глонасс) — только эти две системы полностью обеспечивают бесперебойное покрытие всей земли и обеспечивают точными данными о местоположении пользователей. Данные, получаемые по спутникам, в последнее время создали значительную конкуренцию и стали альтернативными системам радионавигации. Однако GPS и Глонасс без вспомогательных средств недостаточно точны и надежны при их использовании для контроля процесса шлюзования. Разрабатываются разные способы повышения точности с систем дифференциальной коррекции: Wide Area Augmentation System (WAAS), (EGNOS). Однако на данный момент точность их работы достаточно мала для контроля процесса шлюзования, но с каждым годом она совершенствуется (рис. 3, *а*). Так, в 2015 г. точность позиционирования увеличилась до 1,4 м, к 2020 г. — до 0,6 м с дальнейшим доведением к 2025 г. до 10 см.

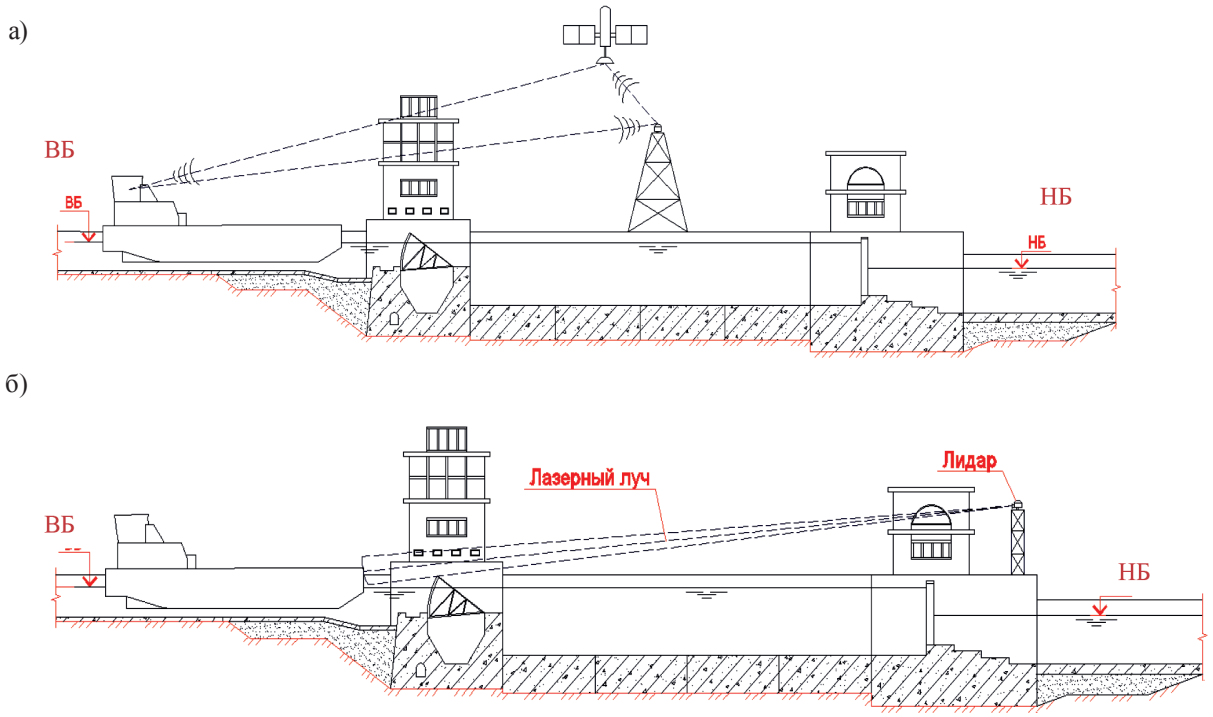


Рис. 3. Контроль процесса шлюзования:
а — при помощи спутниковой системы; *б* — при помощи системы «Лидар».
Условные обозначения: ВБ — верхний бьеф; *НБ* — нижний бьеф

Лазерный радар «Лидар» предназначен для измерения скорости движения и расстояния до судна. Измеренные скорости сравниваются с допустимыми значениями, в случае превышения подается сигнал на информационный монитор (рис. 3, *б*). Можно задать требуемое значение максимально измеряемой дальности: 50, 100, 150, 200, 250, 300, 999,9 м [10].

В отличие от радара, который определяет скорость объекта путем измерения доплеровского сдвига, «Лидар» вычисляет скорость путем определения времени, необходимого для того, чтобы «увидеть» отраженные световые импульсы (рис. 4). Время отклика прямо пропорционально расстоянию до цели, что позволяет значительно уменьшить погрешность измерения.

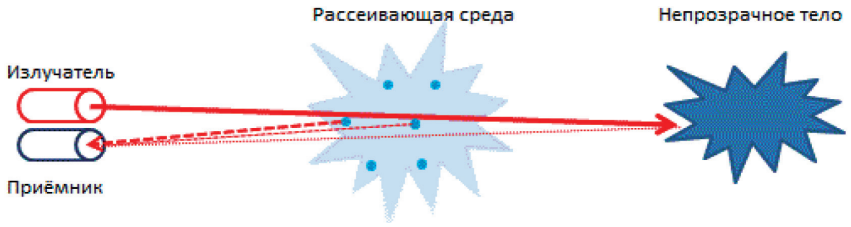


Рис. 4. Принцип действия лазерного радара

Система лазерных створов — это светотехническое устройство, установленное на берегу или на гидротехническом сооружении, формирующее световую створную зону с помощью нескольких лазерных излучателей [7]. Для обеспечения прохождения судна по каналу на берегу или на гидротехническом основании устанавливаются несколько лазерных створных маяков (ЛСМ). Лучи, генерируемые ЛСМ, движутся синхронно в горизонтальной плоскости из крайних положений навстречу друг другу, пересекаясь на оси створа, совмещенной с осью канала.

Лазерная система слежения состоит из лазерного сканера Hokuyo UTM-30LX-EW, который проводит измерения с большой рабочей дистанцией и полем зрения, камеры и специализированного компьютера с программным обеспечением, которое управляет данными со сканера и камеры. Частота сканирования выбирается исходя из условий удобства наблюдений с судна. Информация о движении судна с лазерных створов передается на пульт судоводителю и диспетчеру, в связи с чем принимаются меры для изменения скорости и корректировки движения судна (рис. 5).

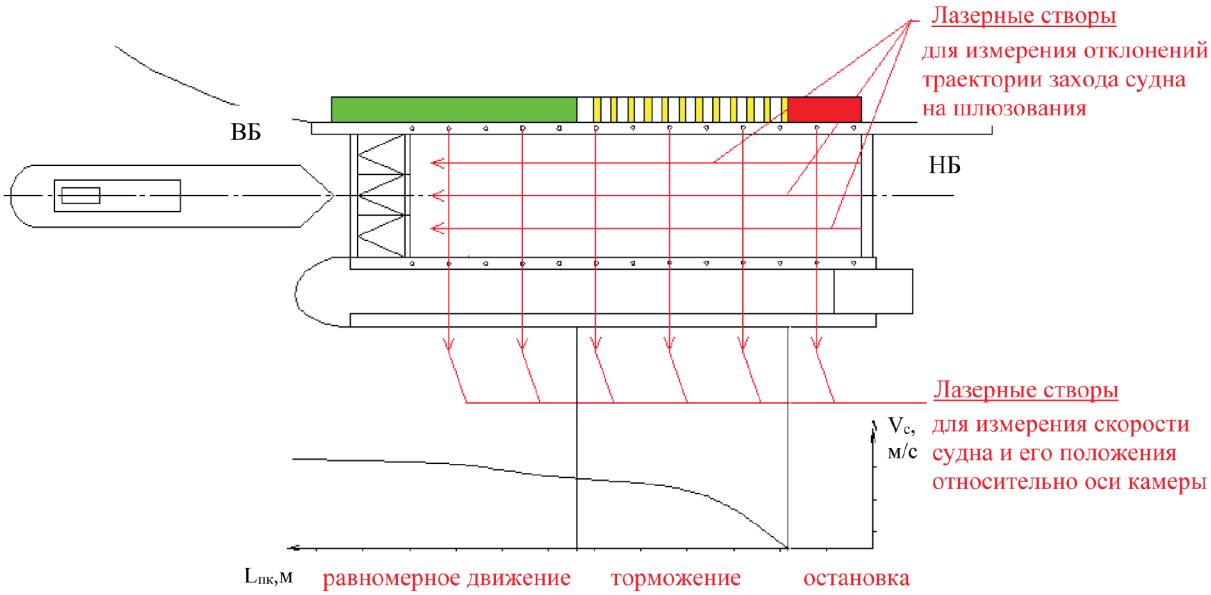


Рис. 5. Контроль процесса шлюзования при помощи системы лазерных створов:
$L_{ПК}$ — длина подходного канала и камеры шлюза; V_c — скорость судна;
ВБ — верхний бьеф; *НБ* — нижний бьеф

Система информирования судоводителя

Каждая система контроля шлюзования должна иметь сигнал, сообщающий о факте нарушения режима движения судна или неправильных действиях судоводителя. Рассмотрим схему расстановки таких сигналов для судоходного шлюза. Известно, что существующие системы управления движением судов включают светофоры, регламентирующие вход и выход судов, и стоповые огни, указывающие зону швартовки судов в камере. Дополнительно в шлюзах Волго-Балта введены визуальные указатели: широкая цветная полоса на воротах, номера швартовных рымов, установ-

ленные на стенках шлюза. Однако сигнала, указывающего о факте нарушения режима движения судна, шлюз не имеет. Отсутствуют такие системы и в рубке судна. Иногда начальник вахты, заметив неправильные действия судоводителя, пытается по радио предотвратить их последствия (навал на ворота). Однако такие сигналы или опаздывают, или не всегда правильно могут восприниматься судоводителем. Необходима автоматическая система, которая после получения данных с систем контроля движения выставляла бы сигнал, заставляющий судоводителя при любом его состоянии предпринять необходимые действия. Такой сигнал должен быть «шоковым», т. е. таким, чтобы судоводитель мог оценить опасность своих действий. Кроме того, сигнал должен дать указание судоводителю, какие действия он должен предпринять для выхода из опасного положения.

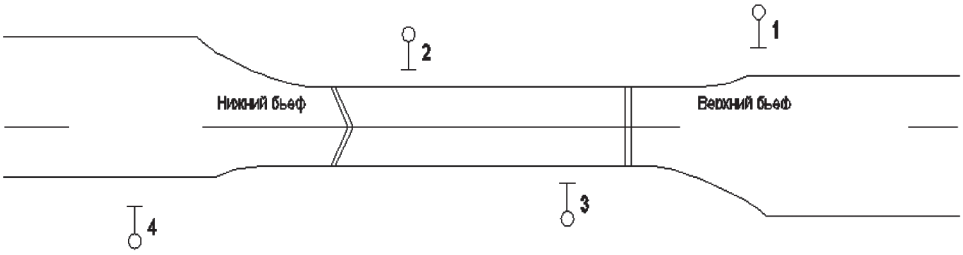


Рис. 6. Схема расстановки сигналов, информирующих о нарушениях движения судна:
1 — сигнал, предупреждающий удар в верхние (закрытые) ворота при движении судна сверху;
2 — сигнал, предупреждающий удар в нижние ворота при входе судна в камеру сверху;
3 — сигнал, предупреждающий удар в верхние ворота или в стенку падения при входе судна в камеру снизу;
4 — сигнал, предупреждающий удар судна в нижние (закрытые) ворота

Схема расстановки сигналов, информирующих о нарушениях, приведена на рис. 6, тип аварийных сигналов и рекомендуемое место их установки в шлюзах даны в таблице.

Расположение аварийных сигналов на шлюзе

Номер сигнала	Место	Функции сигнала	Аварийный сигнал	Место установки сигнала
1	Верхний подходной канал	Дает команду на остановку судна при движении его на закрытые ворота верхней головы;	Мигающий «Стоп»	Ворота верхней головы
		Информирует о скорости движения судна при входе в шлюз	Уменьшить скорость хода	Здание верхней головы
2	Камера шлюза	Информирует о скорости движения судна в камере шлюза во избежание удара в ворота	Мигающий «Стоп»	Ворота нижней головы с верхнего бьефа, здание управления на нижней голове
3	Камера шлюза	Информирует о скорости движения судна в камере шлюза во избежание удара в стенку падения	Уменьшить скорость хода	Ворота нижней головы, стена камеры
4	Верхний подходной канал	Дает команду на остановку судна перед закрытыми воротами нижней головы	Мигающий «Стоп»	Ворота нижней головы с нижнего бьефа
		Регламентирует скорость движения судна при входе в камеру	Уменьшить скорость хода	Здание нижней головы

Выводы

Имеющиеся для декларирования методики по контролю технического состояния и оценке безопасности судоходных гидротехнических сооружений не предусматривают анализ причин аварий, обусловленных движением флота в подходных каналах и шлюзах [8], [9]. В существующих декларациях безопасности судоходных ГТС не выявляется опасность природных воздействий (наводнения, землетрясения) [10], а также техногенные воздействия (удары и навалы судов). Из этого следует, что существующие нормативные базы и требования к безопасности на внутренних водных путях на данный момент имеют ряд недостатков. Однако с помощью предложенной в работе системы регулирования режимов движения и внесения поправок в нормативные базы, возможно:

– для каждого шлюза и, соответственно, для каждого судна установить нормативный режим движения как в подходных каналах, так и в камере шлюза;

– значительно снизить аварийность в подходных каналах и шлюзах и вследствие этого увеличить пропускную способность шлюза;

– уменьшить возможность ошибки и несогласованности действий диспетчера и судоводителя, так как судоводитель получает всю необходимую информацию об опасных отклонениях «напрямую» от системы.

Представленные причины происшествий во время шлюзования судна позволяют выбрать необходимые исходные данные для разработки нового информационно-предупредительного устройства, которое должно обезопасить процесс шлюзования судна и быть универсальным, надежным и долговечным в использовании. Внедрение данной системы значительно повысит безопасность движения флота в зоне судоходных шлюзов.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Нычик Т. Ю.* Оценка уровня безопасности судоходных шлюзов: автореф. дис. … канд. техн. наук: 05.22.19 / Т. Ю. Нычик. — СПб.: Государственный университет морского и речного флота имени адмирала С. О. Макарова, 2015. — 23 с.

2. *Нычик Т. Ю.* Человеческий фактор — основная причина аварий в шлюзах / Т. Ю. Нычик, М. А. Колосов // Гидротехника. XXI век. — 2013. — № 2 (14). — С. 36–39.

3. *Дмитриев В. И.* Профессиональная пригодность судоводителей и безопасность плавания / В. И. Дмитриев, А. К. Гусев // Материалы междунар. науч.-практ. конф., посвященной 200-летию подготовки кадров для водного транспорта России. — СПб.: Изд-во СПбГУВК, 2009. — С. 72–74.

4. *Колосов М. А.* Безопасность судоходных шлюзов / М. А. Колосов, С. В. Обоймов // Гидротехника. XXI век. — 2012. — № 3. — С. 58–65.

5. *Фёдоров Г. Ф.* Исследование условий движения и пропуска судов типа «Волга Дон» через шлюзы ВДСК имени В. И. Ленина / Г. Ф. Фёдоров, Е. М. Шапошников // Сборник научных трудов ЦНИИЭВТ. — М., 1962. — С. 30–75.

6. *Удалов В. С.* Использование системы видеонаблюдения за процессом шлюзования для местоопределения судна в камере шлюза и подходных каналах // Вестник Государственного университета морского и речного флота имени адмирала С. О. Макарова. — 2016. — № 4 (38). — С. 241–248. DOI: 10.21821/2309-5180-2016-8-4-241-248.

7. *Сысоева С.* Актуальные технологии и применения датчиков автомобильных систем активной безопасности. — Ч. 6. Радары / С. Сысоева // Компоненты и технологии. — 2007. — № 68. — С. 67–76.

8. *Беллендир Е. Н.* Опыт применения федерального закона «О безопасности гидротехнических сооружений» / Е. Н. Беллендир, Е. А. Филлипова // Гидротехника. — 2009. — № 2. — С. 35–36.

9. *Радкевич Д. Б.* Декларирование безопасности гидротехнических сооружений // Библиотечка гидротехника. Безопасность гидротехнических сооружений. Приложение к журналу «Гидротехническое строительство». — Вып. 2. — М.: НТФ «Энергопрогресс», 2000. — 83 с.

10. Сейсмическое микрорайонирование участков шлюзов № 2, № 5, № 11 и насосной станции № 32 Волгодонского судоходного канала: технический отчет по теме № 31/ГМ. — АО «Институт Гидропроект», 2009. — 151 с.

REFERENCES

1. Nychik, T.Yu. Otsenka urovnya bezopasnosti sudokhodnykh shlyuzov. Abstract of PhD diss. SPb.: Gos. universitet morskogo i rechnogo flota imeni admirala S. O. Makarova, 2015.

2. Nychik, T. Yu., and M. A. Kolosov. "Chelovecheskii faktor — osnovnaya prichina avarii v shlyuzakh." *Gidrotekhnika. XXI vek* 2(14) (2013): 36–39.

3. Dmitriev, V. I., and A. K. Gusev. "Professional'naya prigodnost' sudovoditelei i bezopasnost' plavaniya." *Materialy mezhdunar. nauch.-prakt. konf., posvyashchennoi 200-letiyu podgotovki kadrov dlya vodnogo transporta Rossii*. SPb.: Izd-vo SPbGUVK, 2009. 72–74.

4. Kolosov, M. A., and S. V. Oboimov. "Bezopasnost' sudokhodnykh shlyuzov." *Gidrotekhnika. XXI vek* 3 (2012): 58–65.

5. Fedorov, G. F., and E. M. Shaposhnikov. "Issledovanie uslovii dvizheniya i propuska sudov tipa «Volga Don» cherez shlyuzy VDSK imeni V.I Lenina." *Sbornik nauchnykh trudov TsNIIEVT*. M., 1962. 30–75.

6. Udalov, Victor Sergeevich. "Usage CCTV system for shiplocking process as ship positional tool in waterlock cell and adjoining channels." *Vestnik Gosudarstvennogo universiteta morskogo i rechnogo flota imeni admirala S.O. Makarova* 4(38) (2016): 241–248. DOI: 10.21821/2309-5180-2016-8-4-241-248.

7. Sysoeva, S. "Aktual'nye tekhnologii i primeneniya datchikov avtomobil'nykh sistem aktivnoi bezopasnosti. Chast' 6. Radary." *Komponenty i tekhnologii* 68 (2007): 67–76.

8. Bellendir, E. N., and E. A. Fillipova. "Opyt primeneniya federal'nogo zakona «O bezopasnosti gidrotekhnicheskikh sooruzhenii»." *Gidrotekhnika* 2 (2009): 35–36.

9. Radkevich, D. B. "Deklarirovanie bezopasnosti gidrotekhnicheskikh sooruzhenii." *Bibliotechka gidrotekhnika. Bezopasnost' gidrotekhnicheskikh sooruzhenii. Prilozhenie k zhurnalu «Gidrotekhnicheskoe stroitel'stvo»; vyp.2*. M.: NTF «Energoprogress», 2000.

10. *Seismicheskoe mikroraionirovanie uchastkov shlyuzov № 2, № 5, № 11 i nasosnoi stantsii № 32 Volgo-donskogo sudokhodnogo kanala: tekhnicheskii otchet po teme № 31/GM*. AO «Institut Gidroproekt», 2009.

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

Каюда Александр Владимарович — аспирант
Научный руководитель:
Колосов Михаил Александрович
ФГБОУ ВО «ГУМРФ имени
адмирала С. О. Макарова»
198035, Российская Федерация, Санкт-Петербург,
ул. Двинская, 5/7
e-mail: *abk_91@mail.ru*
Колосов Михаил Александрович —
доктор технических наук, профессор
ФГБОУ ВО «ГУМРФ имени
адмирала С. О. Макарова»
198035, Российская Федерация, Санкт-Петербург,
ул. Двинская, 5/7
e-mail: *KolosovMA@mail.ru*, *kaf _gsk@gumrf.ru*

INFORMATION ABOUT THE AUTHOR

Kayuda, Aleksandr V. — Postgraduate
Supervisor:
Kolosov, Mikhail A.
Admiral Makarov State University
of Maritime and Inland Shipping
5/7 Dvinskaya Str., St. Petersburg 198035,
Russian Federation
e-mail: *abk_91@mail.ru*
Kolosov, Mikhail A. — Dr. of Technical Sciences,
professor
Admiral Makarov State University of Maritime
and Inland Shipping
5/7 Dvinskaya Str., St. Petersburg 198035,
Russian Federation
e-mail: *KolosovMA@mail.ru*, *kaf _gsk@gumrf.ru*

Статья поступила в редакцию 7 февраля 2017 г.
Received: February 7, 2017.

ВЕСТНИК
ГОСУДАРСТВЕННОГО УНИВЕРСИТЕТА
МОРСКОГО И РЕЧНОГО ФЛОТА ИМЕНИ АДМИРАЛА С. О. МАКАРОВА

DOI: 10.21821/2309-5180-2017-9-2-346-354

NECESSITY OF MULTIFACTOR DIAGNOSTICS OF THE DONSKY SHIPPING SYSTEM IN CONDITIONS OF THE GROWTH OF THE WATER RESOURCES DEFICIENCY AND SAFETY OF FACILITIES

V. A. Volosukhin[1], M. A. Bandurin[2]

[1] — Don State Agrarian University, Rostov Region, Russian Federation
[2] — Platov South-Russian State Polytechnic University (NPI), Novocherkassk, Russian Federation

This article describes the results of the implementation of new permanent monitoring systems in relation to long-term operation of hydraulic structures. At present, more than 80% of the hydraulic structures in the south of Russia have fulfilled most of the standard operating life. Residual resource of hydraulic structures allows to establish a safe period of their operation without restrictions or with restrictions, or to make a decision on repair or liquidation of hydraulic structures and parts of its elements. Existing methods of inspection of hydraulic structures are aimed at assessing the overall suitability of structural support structures for further operation. During the surveys a number of questions arose regarding the nature of the detection of damages and defects, as well as the forecasting of the technical condition for a certain period of time. The purpose of the multifactor survey of hydraulic structures is to assess the actual technical condition, the main equipment, determine the remaining resource of their elements, and establish safety deficiencies to assess the possibility of continuing operation beyond the designated (or 25-year) service life. The results of the multifactor survey are the basis for preparing the facility for the extension of the service life. In the period of low water in the upper reaches and the lower reaches of the Volga and on the Don, below the Tsimlyansk hydroelectric station, ship companies experience the problem of missing ships at full load due to inadequate depths. The physico-geographical characteristics of the Lower Don are described, the history of its sluicing, it is proposed to use flexible water-lifting dams, which at low water promote the rise of the water level in navigable rivers, and during the high-water period they fit into the flow channel of the channel section.

Keywords: Hydraulic engineering structures, the Don Gateway System, multifactorial survey, residual resource, navigable rivers, inland waterways, hydroelectric complex, river regulation, dredging, safety deficiency, reliability parameters, technical condition.

For citation:
Volosukhin, Viktor A., and Mikhail A. Bandurin. "Necessity of multifactor diagnostics of the Donsky shipping system in conditions of the growth of the water resources deficiency and safety of facilities." *Vestnik Gosudarstvennogo universiteta morskogo i rechnogo flota imeni admirala S.O. Makarova* 9.2 (2017): 346–354. DOI: 10.21821/2309-5180-2017-9-2-346-354.

УДК: 556.5.1: 628.1

НЕОБХОДИМОСТЬ МНОГОФАКТОРНОЙ ДИАГНОСТИКИ ДОНСКОЙ ШЛЮЗОВАННОЙ СИСТЕМЫ В УСЛОВИЯХ РОСТА ДЕФИЦИТА ВОДНЫХ РЕСУРСОВ И БЕЗОПАСНОСТИ СООРУЖЕНИЙ

В. А. Волосухин[1], М. А. Бандурин[2]

[1] — ФГБОУ ВО «Донской государственный аграрный университет», Ростовская область, Российская Федерация
[2] — ФГБОУ ВО «Южно-Российский государственный политехнический университет (НПИ) им. М. И. Платова», Новочеркасск, Российская Федерация

В статье приводятся результаты реализации новых систем постоянного мониторинга применительно к длительно эксплуатируемым гидротехническим сооружениям. В настоящее время более 80 % гидротехнических сооружений на юге России превысили большую часть нормативного срока эксплуатации. Остаточный ресурс гидротехнических сооружений позволяет установить безопасный срок их эксплуатации без ограничений или с ограничениями либо принять решение о ремонте или ликвидации гидротех-

нических сооружений и части его элементов. Существующие методики обследования гидротехнических сооружений направлены на оценку в целом пригодности несущих конструкций сооружений к дальнейшей эксплуатации. При проведении обследований появился ряд вопросов по характеру выявления повреждений и дефектов, а также по прогнозированию технического состояния на определённый период времени. Целью многофакторного обследования гидротехнических сооружений является оценка фактического технического состояния, основного оборудования, определение остаточного ресурса их элементов, а также установление дефицитов безопасности для оценки возможности продолжения эксплуатации сверх назначенного (или 25-летнего) срока эксплуатации. Результаты многофакторного обследования являются основанием для подготовки сооружения к продлению срока эксплуатации. В период маловодья в верховьях и низовьях Волги и на Дону, ниже Цимлянского гидроузла, судовые компании испытывают проблему пропуска судов при полной загрузке из-за недостаточности глубин. Излагается физико-географическая характеристика Нижнего Дона, история его шлюзования, предлагается решение об использовании гибких водоподъёмных плотин, которые в межень способствуют подъёму уровня воды в судоходных реках, а в период паводка укладываются в флютбет русловой части.

Ключевые слова: гидротехнические сооружения, Донская шлюзовая система, многофакторное обследование, внутренние водные пути, параметры надёжности, технические состояние.

Для цитирования:
Волосухин В. А. Необходимость многофакторной диагностики Донской шлюзованной системы в условиях роста дефицита водных ресурсов и безопасности сооружений / В. А. Волосухин, М. А. Бандурин // Вестник Государственного университета морского и речного флота имени адмирала С. О. Макарова. — 2017. — Т. 9. — № 2. — С. 346–354. DOI: 10.21821/2309-5180-2017-9-2-346-354.

Введение

Водные пути в России всегда являлись мощным природным фактором, оказывающим влияние на развитие сложных социальных и экономических процессов периода второй половины XVIII – начала XIX в., а исследование речных путей как важнейшей составной части транспортной сети было необходимо для анализа различных типов и форм хозяйственной деятельности и естественно-географической среды в России.

История шлюзования Нижнего Дона начинается с проектов Н. П. Пузыревского, составленных на основании изысканий, проведенных под его руководством в 1906 – 1909 гг. [1]. Строительство Донской шлюзованной системы началось в 1913 г. В первую очередь сооружался Кочетовский гидроузел (по схеме Н. П. Пузыревского — гидроузел № 3), который был крайне необходим для нормального функционирования Северо-Донецкой водной системы (в этой системе — гидроузел № 1. История его строительства и этапы реконструкции подробно описаны в книге [2].

В течение последних лет водные проблемы существенно обострились в связи с антропогенными изменениями речного стока и сменой собственников гидротехнических сооружений: водохранилищ, водозаборных, водосбросных, водопропускных сооружений, неохотно вкладывающих средства в их эксплуатацию, повышение надёжности и безопасности. В наиболее обжитых районах страны не осталось крупных рек, не нарушенных хозяйственной деятельностью, причём как на водосборах, так и в руслах.

Согласно данным Водного кадастра РФ за 2014 г. (ресурсы поверхностных и подземных вод, их использование и качество) происходит многолетнее катастрофическое снижение общих водных ресурсов на юге РФ. В целом по Южному федеральному округу отклонение водных ресурсов от среднего многолетнего значения составило 17,2 % по сравнению с 6,5 % в 2014 г. [3].

По результатам визуальной инвентаризации около 1/3 гидротехнических сооружений России требуют восстановления, так как проектный срок их эксплуатации составляет 30 лет, большинство сооружений уже отработали свой ресурс, поэтому дальнейшее увеличение их возраста приведет к снижению надёжности и безопасности. Гидротехнические сооружения, находящиеся в эксплуатации более 25 лет, независимо от состояния должны один раз в 5 лет подвергаться комплексному анализу с оценкой их прочности, устойчивости и эксплуатационной надёжности. На базе фактических физико-механических характеристик материалов сооружений и их оснований комплексному анализу состояния сооружения подвергаются во внеочередном порядке

(СП 58.13330.2012. Гидротехнические сооружения. Основные положения. Актуализированная редакция СНиП 33-01-2003, п. 6.5).

Методы и материалы

Водохозяйственная ситуация на Нижнем Дону в большой степени определяется возможностями многолетнего регулирования Цимлянского водохранилища ($W_{полн}$ = 23 680 млн м^3, $W_{пол}$ = 11 540 млн м^3, $F_{зерк}$ = 2 702 км^2. Объем годовой полезной водоотдачи W = 12 471 млн м^3). Водохранилище имеет комплексное назначение (судоходство, водоснабжение, орошение и обводнение, рыборазведение). Ведущим водопользователем является судоходство. Объёмы грузоперевозок по Нижнему Дону за последние десятилетия снизились с 13,1 млн т до 8 – 10 млн т [4].

Безвозвратное водопотребление в бассейне Нижнего Дона, по оценкам Северо-Кавказского НИИВХ, составляет 3,37 км^3 [5]. С учётом потерь на испарение с поверхности Цимлянского водохранилища (в среднем 1,5 км^3/год) величина безвозвратного водопотребления увеличится до 4,87 км^3. Навигационные попуски в нижний бьеф Цимлянского гидроузла при нормативных условиях эксплуатации (410 м^3/с) и сложившейся к настоящему времени продолжительности навигации (240 сут) потребуют объёма воды в размере 8,5 км^3. Осуществление санитарного попуска в межнавигационный период нормативным расходом 230 м^3/с составит дополнительно 2,48 км^3 воды. Даже принимая во внимание, что приток от Цимлянского гидроузла до устья реки равен примерно 5 км^3, видно, насколько напряжённым является водохозяйственный баланс водохранилища (10,85 км^3 по сравнению с 11,54 км^3 полезного объёма). Учитывая, что в последние годы Цимлянское водохранилище всё реже наполняется до нормального подпорного уровня, можно констатировать, что этот баланс будет дефицитным. По предварительным данным Росгидрометцентра, в 2017 г. ожидается маловодье, особенно на Нижнем Дону (прогнозируется 7 – 9 км^3, вместо нормативных 11,1 км^3).

Достичь гарантированных глубин судоходного пути на нижнем Дону (3,8 – 4,0 м) можно только подпором уровней (шлюзованием). Известные в гидротехнике различные другие способы увеличения минимальных глубин в реке, такие как углубление дна землечерпанием, удаление порогов на отдельных участках русла, выправление русла с помощью регуляционных сооружений, попуски из вышерасположенных водохранилищ, для условий нижнего Дона малоэффективны.

В 1974 г. рядом со станицей Николаевская был построен гидроузел со шлюзом, необходимость строительства которого была связана с обеспечением судоходных глубин на участке от выхода из нижнего подходного канала шлюза № 15 Цимлянского гидроузла до створа Николаевского гидроузла. Действующий напор составляет 3,8 – 4,0 м. У Кочетовского и Николаевского гидроузлов разборные плотины (фермы Поаре) [2] позволяют регулировать величину подпора и обеспечивать пропуск половодья без подпора уровня воды в реке Дон.

Константиновский гидроузел (недостроенный в 1910-х гг. узел по схеме Н. П. Пузыревского), введённый в эксплуатацию в 1982 г., начал обеспечивать судоходство на участке протяжённостью 43 км от Николаевского гидроузла до створа Константиновского гидроузла. Особенностью его, по сравнению с Кочетовским и Николаевским, является создание круглогодичного (постоянного) подпора. Мелиораторы Южгипроводхоза (ныне — Южводпроект) на примере Кагальницкого участка поймы строительством дренажной системы на площади 30 тыс. га показали невозможность воспрепятствовать грунтовому потоку от верхнего бьефа Константиновского гидроузла засолению и заболачиванию поймы; сельскохозяйственные угодья были затоплены убыточными рыбоводными прудами. То же ожидает и земли в зоне влияния будущего Багаевского гидроузла, если подпор уровня не будет сниматься хотя бы в период осенне-зимней межени.

Участок Нижнего Дона от Кочетовского гидроузла до устья, по существу, является рекой в свободном состоянии с измененным гидрологическим режимом. На участке длиной 164 км расположено 45 перекатов, разделенных короткими плесовыми лощинами. Несмотря на большой объем дноуглубительных работ, часть перекатов сохранила типичные для них русловые образова-

ния — побочни, гребни. В связи с ограниченной шириной судового хода и крутыми поворотами русла этот участок затруднителен для судоходства.

Проект шлюзования реки Дон, составленный Н. П. Пузыревским на основании изысканий 1906 – 1909 гг., имел целью улучшить условия плавания на Дону от Калача до Ростова на протяжении 500 вёрст (~ 533 км). Этот проект предполагал достигнуть судоходных глубин посредством устройства разборчатых плотин, перегораживающих реку, а для перехода судов из одного бьефа в другой предлагалось устроить камерные шлюзы. Предельная осадка судов после осуществления работ по улучшению реки Дон предполагалась 2,75 м (9 футов). Для речного флота того времени проектом были приняты следующие размеры судов: полезная длина — 120 саженей (~ 256 м); ширина в свету — 15 саженей (~ 32 м).

Строительство Донской шлюзованной системы началось с сооружения Кочетовского гидроузла (по схеме Н. П. Пузыревского — гидроузел № 3, в Северо-Донецкой водной системе — гидроузел № 1). Основные этапы от строительства до последней реконструкции и ввода в эксплуатацию новой камеры шлюза этого гидроузла показаны на рис. 1.

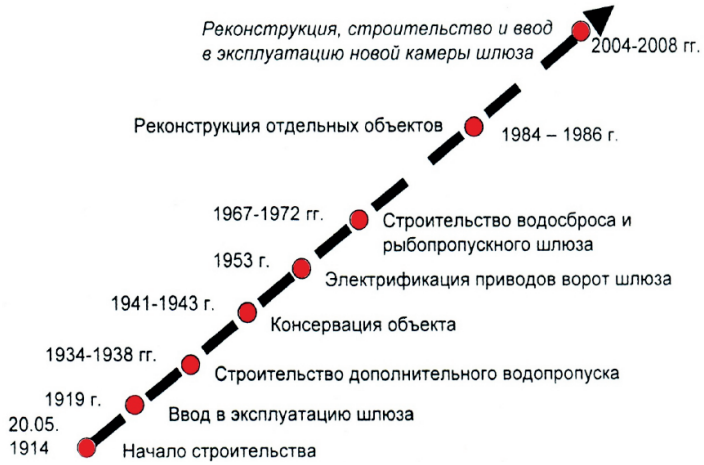


Рис. 1. Основные этапы реконструкции Кочетовского гидроузла

В 50 – 60-е гг. XX в., после ввода в эксплуатацию Волго-Донского канала и в связи с увеличением габаритов новых судов, старый Кочетовский шлюз требовал реконструкции, его габариты стали представлять серьёзное препятствие для судоходства, так как суда нового поколения, достигшие в длину 130 – 140 м, в камеру шлюза просто не помещались. Крупные работы по проекту института «Гипроречтранс» здесь начались в середине 50-х гг. XX в. и были завершены в основном в 1969 г. В результате шлюз был приведён в полное соответствие с габаритами аналогичных сооружений Волго-Донского канала. В те же годы в комплекс сооружений Кочетовского гидроузла была включена возведённая на месте дополнительного отверстия трёхпролётная водосливная плотина с рыбопропускным шлюзом [4], построены верхние и нижние причальные направляющие, возведены здания механизмов с центральным пультом управления, надстроены парапеты камеры, проведена замена электромеханического оборудования шлюза. Следует отметить, что к 1990 г. Кочетовский гидроузел устарел. Дальнейшее расширение габаритов старой шлюзовой камеры было признано нерациональным. Выгоднее было построить рядом со старой камерой новый современный шлюз стандартных габаритов, который возьмёт на себя основной поток больших судов. В апреле 2008 г. через новый шлюз прошло первое грузовое судно.

В 1974 г. рядом со станицей Николаевская был построен гидроузел со шлюзом. Если связывать этот гидроузел с проектом Н. П. Пузыревского, то его номер соответствует примерно № 5. Необходимость его строительства была связана с обеспечением судоходства на участке от выхода из нижнего подходного канала шлюза № 15 до створа Николаевского гидроузла. Действующий напор составляет 3,8 – 4,0 м. В составе гидроузла: судоходный шлюз, рыбопропускной шлюз № 1,

рыбопропускной шлюз № 2, разборная («судоходная») плотина, водосбросная плотина, земляная плотина, нерестово-рыбоходный канал со шлюзом-регулятором. Разборная плотина (фермы Поаре) позволяет регулировать величину подпора и обеспечивать пропуск половодья без подпора уровня воды в Дону.

Константиновский гидроузел (недостроенный в 1910-х гг. узел по схеме Н. П. Пузыревского — гидроузел № 4), который был введён в эксплуатацию в 1982 г., начал обеспечивать судоходство на участке протяжённостью 43 км от Николаевского гидроузла до створа Константиновского гидроузла. В составе гидроузла судоходный шлюз, шлюз для скоростных судов, рыбопропускной шлюз № 1, рыбопропускной шлюз № 2, водосливная плотина с водосбросом-регулятором, земляная плотина, нерестово-рыбоходный канал со шлюзом-регулятором. Расчётный напор на гидроузле составляет 3,2 м.

Участок Нижнего Дона от Кочетовского гидроузла до устья, по существу, является рекой в свободном состоянии с изменённым гидрологическим режимом. На участке длиной 164 км расположено 45 перекатов, разделённых короткими плесовыми лощинами. Несмотря на большой объём дноуглубительных работ, часть перекатов сохранила типичные для них русловые образования: побочни и гребни. В связи с ограниченной шириной судового хода и крутыми поворотами русла этот участок затруднителен для судоходства.

Результаты

Целью многофакторного обследования гидротехнических сооружений Донской шлюзованной системы является оценка фактического технического состояния основного оборудования, определение остаточного ресурса их элементов, а также установление дефицита безопасности для оценки возможности продолжения эксплуатации сверх назначенного (25-летнего) срока эксплуатации, а именно работоспособности. Результаты многофакторного обследования являются основанием для подготовки сооружения к продлению срока эксплуатации.

Остаточный ресурс гидротехнических сооружений Донской шлюзованной системы позволяет установить безопасный срок их эксплуатации без ограничений или с ограничениями, либо принять решение о ремонте или ликвидации гидротехнических сооружений и части его элементов [6]. Основным свойством, определяющим ресурс системы, является надёжность её элементов, т. е. надёжность и безотказность работы в течение определённого срока эксплуатации. Надёжность и безотказность работы системы в целом определяются из условия, что каждый элемент системы может находиться в одном из двух состояний — работоспособном или отказа.

Существующие методы [7] обследования гидротехнических сооружений направлены на оценку пригодности в целом несущих конструкций сооружений к дальнейшей эксплуатации применительно к гидротехническим сооружениям Донской шлюзованной системы. Мониторинг проводится с учётом действующих нормативных документов по проектированию, изготовлению и специфики эксплуатации. Также он выделяет основные требования [8] к процессу проведения измерений технического состояния гидротехнических сооружений Донской шлюзованной системы с применением современных приборов неразрушающего контроля, а именно разработанного программно-технического комплекса для проведения эксплуатационного мониторинга технического состояния гидротехнических сооружений, который предназначен для определения параметров различных дефектов и повреждений [9], а также расчёта прогнозируемого срока остаточного ресурса их элементов [10]. С его помощью можно провести оценку каждого дефекта, а также остаточного ресурса до потери несущей способности железобетонных элементов гидротехнических сооружений Донской шлюзованной системы. Комплекс [11] позволяет также оценить влияние ряда факторов на надёжность отдельный элементов сооружения, наиболее характерными из которых являются фильтрация, истирание, процессы выщелачивания и степень износа по участкам [12] с различными гидравлическими характеристиками.

Были рассчитаны конечно-элементные модели (рис. 2, *а*) разборной плотины — фермы Поаре, на отечественном программном продукте SCAD office, позволяющие определить работоспо-

собность гидротехнических сооружений Донской шлюзованной системы, также получены критерии физического износа отдельных элементов. Одной из главных проблем определения остаточного ресурса является определение физического износа сооружения в целом во времени. Расчет выполнялся с различными сочетаниями, как с нагружениями, так и с дефектами от длительной эксплуатации. Результаты моделирования приведены в виде эпюр усилий (рис. 2, *б*), на основании данных которых можно классифицировать техническое состояние каждого элемента, например, как стержней, так и пластин, при различных как небольших неисправностях, так и опасных повреждениях элементов сооружения. Также представлены изополя напряжений (рис. 3) несущих конструкций для последующего прогнозирования обоснования продления срока надежной работоспособности.

а) б)

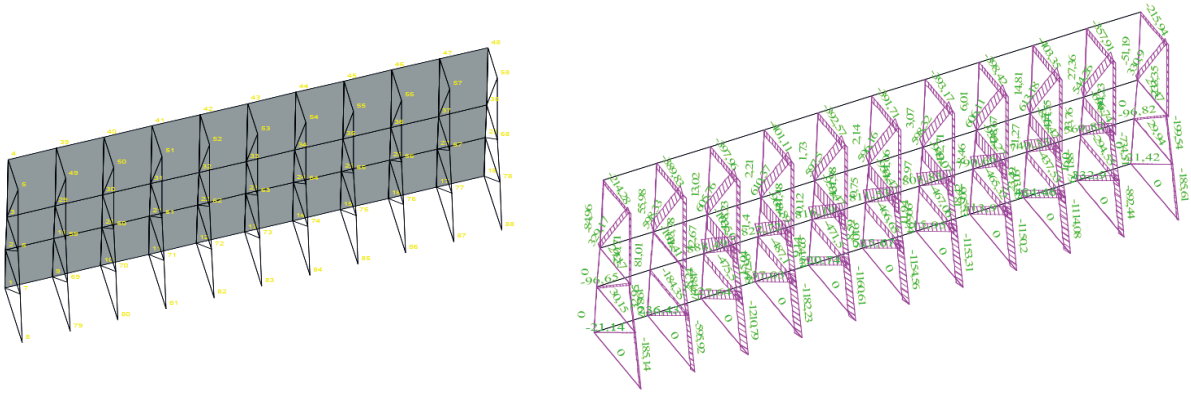


Рис. 2. Общий вид модели на ЭВМ сборной водоподъёмной низконапорной щитовой плотины (*а*) и эпюра ее растягивающих и сжимающих усилий (*б*)

а) б)

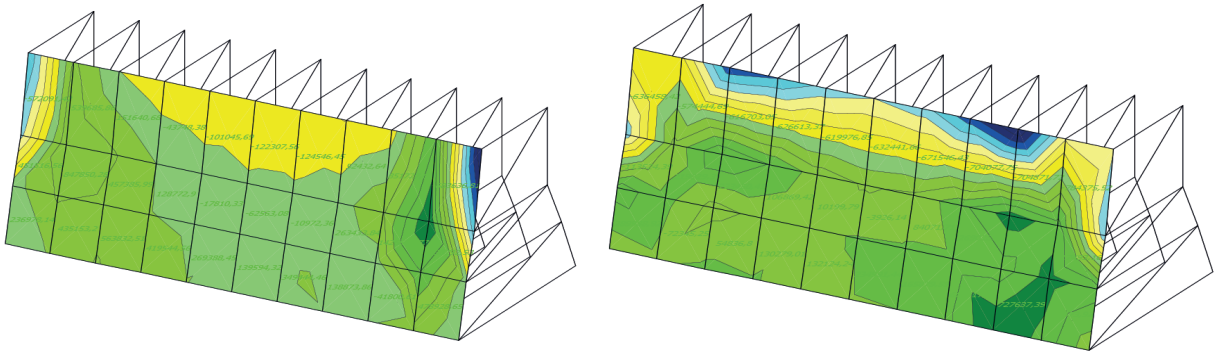


Рис. 3. Эпюры изополей напряжений по горизонтали сооружения (*а*) и по вертикали (*б*)

Обсуждение

Проектирование и строительство объекта «Разработка и реализация комплексного проекта реконструкции Азово-Донского бассейна, а также третий этап (Багаевский гидроузел)» проводятся в соответствии с Распоряжение правительства РФ от 29 февраля 2016 г. № 327-р «Стратегия развития внутреннего водного транспорта Российской Федерации на период до 2030 года». Багаевский гидроузел будет располагаться на 3089 км судового хода, вблизи хутора Арпачин (по схеме Н. П. Пузыревского — это створ № 2, расположение которого несколько выше проектируемого ОПК «Трансгидропроект»).

Багаевский гидроузел [13] является воднотранспортным объектом, предназначенным для обеспечения гарантированных судоходных глубин в период навигации. В состав гидро-

технических сооружений Донской шлюзованной системы входят сооружения, предназначенные для подъёма уровня воды на проблемном участке реки и пропуска расходов, судопропускные сооружения, рыбопропускные сооружения, обеспечивающие благоприятные условия для прохода рыбы из одного бьефа гидроузла в другой бьеф. В конструктивном отношении и по составу сооружений Багаевский гидроузел в значительной своей части повторяет эксплуатирующийся на реке Дон с 1982 г. Константиновский гидроузел [14]. Максимальный расчётный напор на гидроузле (разность между нормальным подпорным уровнем и минимальным уровнем нижнего бьефа с расчетным напором, равным 99 %) — 3,8 м, в среднем величина подпора уровня не превышает 2,0 м.

В области гидротехники широко известны различные способы увеличения минимальных глубин: углубление дна землечерпанием, удаление порогов на отдельных участках русла, выправление русла с помощью регуляционных сооружений (продольных струенаправляющих дамб, полузапруд и запруд, донных бун, береговых шпор и др.), шлюзование рек. Учитывая многообразие условий, определяющих характер того или иного участка реки, следует при проработке проектов увеличения судоходных глубин рассматривать несколько вариантов решений, включая указанные ранее способы.

Реально гарантировать габариты судоходного пути в России можно только подпором воды (шлюзованием рек), но подпорные сооружения в период половодья должны пропускать расходы при минимальном перепаде уровней воды в бьефах и эти уровни не должны превышать бытовых максимальных значений. Таким образом, затворы плотины должны быть разборными либо укладывающимися на флютбет. Не следует игнорировать возможность использования гибких элементов [15] для создания подпора уровня как средств снижения стоимости сооружений гидроузла.

Выводы

1. Национальный стандарт (ГОСТ Р 22.1.12-2005) позволяет сформулировать основные требования к постоянному мониторингу гидротехнических сооружений Донской шлюзованной системы.

2. Ведение Государственного водного реестра осуществляется в соответствии со ст. 31 Водного кодекса РФ, Постановлением Правительства РФ от 28.04.2007 г. № 253 «О порядке ведения государственного водного реестра», Приказом МПР России от 16.07.2007 г. № 186 «Об утверждении Правил внесения сведений в государственный водный реестр», Приказом Министерства природных ресурсов России от 29.05.2007 г. № 138 «Об утверждении формы государственного водного реестра», позволяет сформулировать основные требования к эксплуатационному мониторингу гидротехнических сооружений Донской шлюзованной системы.

3. Качественный мониторинг гидротехнических сооружений позволяет оценить изменение напряжённо-деформированного состояния во времени при различных сочетаниях нагрузок применительно к гидротехническим сооружениям Донской шлюзованной системы.

4. Анализ неудовлетворительного состояния отдельных гидротехнических сооружений юга России свидетельствует о нерешённых проблемах с их эксплуатацией, недостаточности средств, выделяемых на многофакторную оценку факторов, влияющих на их надёжность и безопасность, низкой квалификации эксплуатирующего персонала.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Дейч В. И.* Гидротехнические работы в 1893 г. // Труды экспедиции снаряженной Лесным Департаментом под рук. В. В. Докучаева: отчет Министерству земледелия и государственных имуществ. Вып. 1. / В. И. Дейч. — Т. 2. — СПб.: Изд-во М-ва земледелия и гос. имущества, 1894. — С. 1–94.

2. *Лендов В. Г.* Сооружение № 1 на Дону. Новая жизнь Кочетовского гидроузла / В. Г. Лендов; под ред. Н. Г. Смирнова. — М.: Вестник транспорта, 2009. — 215 с.

3. *Кривошей В. А.* Реки и каналы России / В.А. Кривошей. — М.: ООО «ОМ-Паблишин» & ООО «Журнал «РТ», 2007. — 240 с.

4. Материалы для описания русских рек и истории улучшения их судоходных условий // Водные пути России. — Вып. 25 [Электронный ресурс]. — Режим доступа: http://193.233.14.24/bookscd/ODP_82_2/ (дата обращения: 05.03.17).

5. *Кривошей В. А.* Зачем нужен Багаевский гидроузел? / В. А. Кривошей // Право и инвестиции. — 2013. — № 1-2. — С. 104–108.

6. *Волосухин В. А.* Мониторинг, диагностика и остаточный ресурс несущих конструкций сборных водоподъёмных низконапорных щитовых плотин / В. А. Волосухин, М. А. Бандурин // Вестник Донского государственного аграрного университета. — 2015. — № 4-1 (18). — С. 61–71.

7. *Бандурин М. А.* Обоснование продления срока эксплуатации несущих конструкций сборных водоподъемных низконапорных щитовых плотин / М. А. Бандурин, И. П. Бандурина // Инженерный вестник Дона. — 2014. — Т. 29. — № 2. — С. 102.

8. *Бандурин М. А.* Проблемы определения остаточного ресурса технического состояния закрытых водосбросов низконапорных гидроузлов / М. А. Бандурин // Инженерный вестник Дона. — 2014. — Т. 28. — № 1. — С. 69.

9. *Арифуллин Е. З.* Мониторинг чрезвычайных ситуаций на гидротехнических сооружениях как совокупность органов управления и принятия решений / Е. З. Арифуллин, Е. В. Калач, А. В. Калач // Проблемы обеспечения безопасности при ликвидации последствий чрезвычайных ситуаций. — 2015. — Т. 1. — С. 57–59.

10. *Балонин Н. А.* Новые информационные технологии мониторинга гидротехнических сооружений / Н. А. Балонин, П. А. Гарибин, В. Е. Марлей // Вестник Государственного университета морского и речного флота имени адмирала С.О. Макарова. — 2009. — № 4. — С. 150–154.

11. *Волосухин В. А.* Программно-технический комплекс для решения задачи проведения мониторинга и определения остаточного ресурса водопроводящих сооружений // В. А. Волосухин, М. А. Бандурин // Современные строительные материалы, технологии и конструкции: материалы Междунар. науч.-практ. конф., посвященной 95-летию ФГБОУ ВПО «ГГНТУ им. акад. М. Д. Миллионщикова». — Грозный: ФГУП «Издательско-полиграфический комплекс «Грозненский рабочий», 2015. — С. 637–644.

12. *Волосухин В. А.* Программно-технический комплекс для проведения мониторинга и определения остаточного ресурса длительно эксплуатируемых водопроводящих сооружений / В. А. Волосухин, М. А. Бандурин // Вестник Пермского национального исследовательского политехнического университета. Строительство и архитектура. — 2013. — № 1. — С. 57–68.

13. *Исаков В. М.* Багаевский гидроузел (анализ проблем) / В. М. Исаков // Астраханский вестник экологического образования. — 2016. — № 3 (37). — С. 77–86.

14. *Айдаркина Е. Е.* Водопользование Ростовской области: основные проблемы и пути их решения / Е. Е. Айдаркина // Приволжский научный вестник. — 2012. — № 12 (16). — С. 43–49.

15. *Бойкова И. Г.* Оценка технического состояния и эксплуатационной надежности гидротехнических сооружений / И. Г. Бойкова, В. В. Верменко, М. Н. Волохова [и др.] // Водоснабжение и санитарная техника. — 2012. — № 11. — С. 39–43.

REFERENCES

1. Deich, V. I. “Gidrotekhnicheskie raboty v 1893 g.” *Trudy ekspeditsii snaryazhennoi Lesnym Departamentom pod ruk. V.V. Dokuchaeva: otchet Ministerstvu zemledeliya i gosudarstvennykh imushchestv. Vyp. 1.* SPb.: Izd. M - va zemledeliya i gos. imushchestv, 1894. Vol. 2. 1–94.

2. Lendov, V. G. *Sooruzhenie № 1 na Donu. Novaya zhizn’ Kochetovskogo gidrouzla*. Edited by N. G. Smirnov. M.: Vestnik transporta, 2009.

3. Krivoshey, V. A. *Reki i kanaly Rossii*. M.: OOO «OM-Pablishin» & OOO «Zhurnal «RT», 2007.

4. “Materialy dlya opisaniya russkikh rek i istorii uluchsheniya ikh sudokhodnykh uslovii.” *Vodnye puti Rossii* 25. Web. 5 March 2017 <http://193.233.14.24/bookscd/ODP_82_2/>.

5. Krivoshei, V. A. “Why Bagaevsky waterworks?.” *Pravo i investitsii* 1-2 (2013): 104–108.

6. Volosukhin, V. A., and M. A. Bandurin. “Monitoring, diagnostics and residual life support systems prefabricated low-pressure water-shields DAM.” *Vestnik of Don State Agrarian University* 4-1(18) (2015): 61–71.

7. Bandurin, M. A., and I. P. Bandurina. “Obosnovanie prodleniya sroka ekspluatatsii nesushchikh konstruktsiy sbornykh vodopod”emnykh nizkonapornykh shchitovykh plotin.” *Engineering journal of Don* 29.2 (2014): 102.

8. Bandurin, M. A. "Problem of determining the residual resource of technical condition of low pressure closed spillways waterworks." *Engineering journal of Don* 28.1 (2014): 69.

9. Arifullin, E. Z., E. V. Kalach, and A. V. Kalach. "Monitoring chrezvychaynykh situatsiy na gidrotekhnicheskikh sooruzheniyakh kak sovokupnost' organov upravleniya i prinyatiya resheniy." *Problemy obespecheniya bezopasnosti pri likvidatsii posledstviy chrezvychaynykh situatsiy* 1 (2015): 57–59.

10. Balonin, N. A., P. A. Garibin, and V. E. Marley. "New information technologies for hydraulic structures monitoring." *Vestnik Gosudarstvennogo universiteta morskogo i rechnogo flota imeni admirala S.O. Makarova* 4 (2009): 150–154.

11. Volosukhin, V. A., and M. A. Bandurin. "Hardware and software complex for solving the problem of monitoring and determining the residual life of water conveyance structures." *Sovremennye stroitel'nye materialy, tekhnologii i konstruktsii: materialy Mezhdunarodnoi nauchno-prakticheskoi konferentsii, posvyashchennoi 95-letiyu FGBOU VPO «GGNTU im. akad. M.D. Millionshchikova»*. Groznyi: FGUP «Izdatel'sko-poligraficheskii kompleks «Groznenskii rabochii», 2015. 637–644.

12. Volosukhin, V. A., and M. A. Bandurin. "Software-technical complex for monitoring and determination of residual water or resource facilities operated long." *PNRPU Construction and Architecture Bulletin* 1 (2013): 57–68.

13. Isakov, Vladimir Mikhailovich. "Bagayevsky HPP (Problem analysis)." *Astrakhanskiy vestnik ekologicheskogo obrazovaniya* 3(37) (2016): 77–86.

14. Aidarkina, E. E. "Water consumption of the Rostov region: main problems and ways of their decision." *Privolzhskiy nauchnyy vestnik* 12(16) (2012): 43–49.

15. Boikova, I. G., V. V. Vermenko, M. N. Volokhova, L. N. Mouratova, N. N. Rozanov, and E. A. Timofeyeva. "The appraisal of the technical state and operation reliability of waterworks." *Water Supply and Sanitary Technique* 11 (2012): 39–43.

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

Волосухин Виктор Алексеевич —
Заслуженный деятель науки РФ,
доктор технических наук, профессор
ФГБОУ ВО «Донской государственный аграрный университет»
346493, Российская Федерация, Ростовская область, Октябрьский район, п. Персиановский
e-mail: *ngma_str_meh@mail.ru*

Бандурин Михаил Александрович —
кандидат технических наук, доцент
ФГБОУ ВО «Южно-Российский государственный политехнический университет (НПИ) им. М.И. Платова»
346428, Российская Федерация, Новочеркасск, ул. Просвещения, 132
e-mail: *chepura@mail.ru*

INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Volosukhin, Viktor A. —
Honored Worker of Science of the Russian Federation,
Dr. of Technical Sciences, professor
Don State Agrarian University
Persianovskii village, Oktyabr'skii district,
Rostov region, 346493, Russian Federation
e-mail: *ngma_str_meh@mail.ru*

Bandurin, Mikhail A. —
PhD, associate professor
Platov South-Russian State Polytechnic University (NPI)
132 Prosveschenia Str., Novocherkassk, 346428,
Russian Federation
e-mail: *chepura@mail.ru*

Статья поступила в редакцию 15 марта 2017 г.
Received: March 15, 2017.

СУДОВЫЕ ЭНЕРГЕТИЧЕСКИЕ УСТАНОВКИ, СИСТЕМЫ И УСТРОЙСТВА

DOI: 10.21821/2309-5180-2017-9-2-355-363

ASSESSMENT OF THE STRENGTH RODS WITH DIFFERENT CROSS-SECTION OF THE ROD

A. I. Yamanin[1], V. A. Zhukov[2]

[1] — Yaroslavl State Technical University, Yaroslavl', Russian Federation
[2] — Admiral Makarov State University of Maritime and Inland Shipping, St. Petersburg, Russian Federation

The crossing of modern internal combustion engines is accompanied by increased loads on the main parts. Rod is experiencing a significant alternating load and refers to the most critical parts of the engine. The reliability of the connecting rod is ensured by the choice of material, design and manufacturing technology. The article provides information on the use for the manufacture of connecting rods high-strength materials, but the basic material for connecting rods remains steels. One of the most important structural characteristics of the connecting rod is cross-section shape of the rod. The most typical are an I-beam section of the rod. Last time the information about the development of connecting rods with H-shaped and X-shaped cross-section of the rod, and beam cross section with reinforcement was appeared. The article is devoted to assessing the strength of the connecting rod is made of steel with different cross-sectional shape of the rod. Evaluation of strength was carried out on the basis of the analysis of the stress-strain state of rods using a built solid models with different sectional shape of the rod. The article presents a solid and finite element models of assemblies of crank mechanism, which was used for the numerical simulation of the stress-strain state of the connecting rod under static loading maximum gas power and a maximum force of inertia of the progressive moving masses. The article presents in relative terms the maximum displacement points of the connecting rods and the equivalent static stresses in compression and tension. The task is dynamically addressed using full finite element models of two-cylinder engines. As a result of calculations performed using the software ANSYS/LS-Dyna obtained the RMS equivalent voltage points of the connecting rod under dynamic loading. Stress values are given in the article in relative values. The obtained results show that the strength characteristics of the rods with the H-shaped profile cross-section of the rod in comparison with the characteristics of rods with I-beam cross-section profile of rod have a slight advantage. Rods with cross-shaped profile such benefits have not.

Keywords: the internal combustion engine, the connecting rod, the material, the cross-section shape of the rod, a solid model, finite element model, numerical modeling, static and dynamic loading, move points, equivalent stress.

For citation:
Yamanin, Alexander I., and Vladimir A. Zhukov. "Assessment of the strength rods with different cross-section of the rod." *Vestnik Gosudarstvennogo universiteta morskogo i rechnogo flota imeni admirala S. O. Makarova* 9.2 (2017): 355–363. DOI: 10.21821/2309-5180-2017-9-2-355-363.

УДК 621.432

ОЦЕНКА ПРОЧНОСТИ ШАТУНОВ С РАЗЛИЧНЫМ ПОПЕРЕЧНЫМ СЕЧЕНИЕМ СТЕРЖНЯ

А. И. Яманин[1], В. А. Жуков[2]

[1] ФГБОУ ВО «ЯГТУ», Ярославль, Российская Федерация
[2] ФГБОУ ВО «ГУМРФ имени адмирала С. О. Макарова», Санкт-Петербург, Российская Федерация

Форсирование современных двигателей внутреннего сгорания сопровождается повышением нагрузок на основные детали. Шатун испытывает значительные знакопеременные нагрузки и относится

к наиболее ответственным деталям двигателя. Надежность шатуна обеспечивается выбором материала, конструкцией и технологией изготовления. В статье содержится информация о применении для изготовления шатунов высокопрочных материалов, однако основным материалом шатунов остаются стали. Одной из важнейших конструктивных характеристик шатуна является форма сечения стержня. Наиболее типичными являются двутавровые сечения стержня. В последнее время появилась информация о разработке шатунов с Н-образной и Х-образной формами сечения стержня, а также двутавровом сечении с подкреплением. Статья посвящена оценке прочности шатунов, изготовленных из стали с различной формой сечения стержня. Оценка прочности производилась на основании анализа напряженно-деформированного состояния шатунов с использованием построенных твердотельных моделей с различной формой сечения стержня. В статье приведены твердотельная и конечно-элементная модели сборок кривошипно-шатунного механизма, которые использовались для численного моделирования напряженно-деформированного состояния шатуна при статическом нагружении максимальной газовой силой и максимальной силой инерции поступательно движущихся масс. В статье представлены в относительных величинах максимальные перемещения точек шатунов и эквивалентные напряжения при статическом сжатии и растяжении. Задача в динамической постановке решалась с использованием полноразмерных конечно-элементных моделей двухцилиндровых двигателей. В результате расчетов, выполненных с использованием программного продукта ANSYS/LS-Dyna, получены среднеквадратичные значения эквивалентных напряжений точек шатунов при динамическом нагружении. Значения напряжений приведены в статье в относительных величинах. Полученные результаты свидетельствуют, что прочностные характеристики шатунов с Н-образным профилем сечения стержня по сравнению с характеристиками шатунов с двутавровым профилем сечения стержня имеют незначительные преимущества. Шатуны с крестообразным профилем таких преимуществ не имеют.

Ключевые слова: двигатель внутреннего сгорания, шатун, материал, форма сечения стержня, твердотельная модель, конечно-элементная модель, численное моделирование, статическое и динамическое нагружение, перемещения точек, эквивалентные напряжения.

Для цитирования:
Яманин А. И. Оценка прочности шатунов с различным поперечным сечением стержня / А. И. Яманин, В. А. Жуков // Вестник Государственного университета морского и речного флота имени адмирала С. О. Макарова. — 2017. — Т. 9. — № 2. — С. 355–363. DOI: 10.21821/2309-5180-2017-9-2-355-363.

Введение

В подавляющем большинстве современных двигателей внутреннего сгорания (ДВС) различного назначения (судовых, стационарных, автомобильных) применяются кривошипно-шатунные механизмы (КШМ) преобразования движения. Одним из главных звеньев КШМ является шатун, обеспечивающий кинематическую и силовую связь поршня с коленчатым валом. В процессе эксплуатации ДВС шатуны испытывают динамические знакопеременные переменные нагрузки от действия давления газов и сил инерции. Основной причиной разрушения шатунов являются усталостные трещины. Требуемая надежность шатунов должна обеспечиваться высокой прочностью при действии циклических и статических нагрузок, жесткостью, исключающей недопустимые изменения форм и размеров. В современных ДВС применяются шатуны различных конструкций, отличающиеся способом монтажа, типом разъема нижней головки, способом центрирования крышки нижней головки, формой сечения стержня шатуна.

Повышение степени форсированности двигателей как за счет среднего эффективного давления, так и за счет частоты вращения коленчатого вала приводит к увеличению напряжений и деформаций в элементах шатуна. Для получения требуемой эксплуатационной надежности двигателя в целом необходимо иметь высокую обеспеченную надежность в каждом звене [1]. Обеспечение требуемого уровня надежности ответственных деталей ДВС, к которым относится шатун, достигается за счет рационального выбора материала, конструкции и технологии производства. Наиболее распространенным способом изготовления шатунов является ковка в штампах с последующей термической и механической обработкой.

В качестве материала наиболее часто используют легированные и углеродистые стали. Значительный интерес для изготовления шатунов форсированных двигателей представляют титановые сплавы. Обладая сравнимыми со сталями прочностными свойствами, они имеют почти вдвое меньшую плотность, при этом усталостные свойства у титановых сплавов даже несколько выше, чем у сталей.

В последнее время появились титановые сплавы с повышенным содержанием алюминия (7,5 – 14 % массовых долей). В этом случае в сплаве выделяется интерметаллид титана Tl_3A1, который упрочняет сплав и повышает его прочностные свойства. Так, при увеличении содержания алюминия с 7,5 до 14 % массовых долей модуль упругости возрастает от 120 до 150 ГПа. Учитывая, что сжимающие нагрузки, действующие на шатун, значительно превосходят растягивающие, лучшее сопротивление напряжениям сжатия титановых сплавов является еще одним преимуществом этих материалов. К недостаткам титановых сплавов следует отнести невысокую износостойкость, склонность к ползучести при нормальной температуре, большее снижение предела выносливости по сравнению со сталями при увеличении числа циклов нагружения свыше 10^7. К перспективным материалам могут быть отнесены композиционные материалы: полимерные волокнистые и металломатричные дисперсно-упрочненные частицами керамики (Si_3N_4, $A1_2O_3$, B_4C) размером 5 – 20 мкм, количество которых может колебаться от 5 до 30 % объема материала [2]. Перспективы использования высокопрочных материалов, таких как титановые сплавы, для изготовления шатунов форсированных авиационных двигателей рассматривались в работах [3], [4]. Однако для большинства двигателей широкого назначения традиционным материалом шатунов являются стали [2], [5], [6]. Для шатунов форсированных двигателей целесообразно применять легированные стали, учитывая необходимость обеспечения достаточной циклической прочности без значительного увеличения размеров опасных сечений, а также получения однородных свойств металла в детали после термообработки, т. е. достижения равномерной прокаливаемости по сечениям. Углеродистые стали находят применение для шатунов относительно небольших размеров при умеренной их напряженности или шатунов наиболее крупных размеров. Для реализации высоких прочностных свойств легированных сталей необходимо учитывать их повышенную чувствительность к качеству поверхности, т. е. к её макро- и микрогеометрии, состоянию поверхностного слоя и др. При необработанной поверхности после штамповки может быть потеряно 50 – 70 % циклической прочности материала. Причиной такого снижения является, помимо влияния грубой обработки поверхности, наличие ослабленного слоя металла, в котором вследствие высоких повторных нагревов при штамповке и термообработке (закалке) выгорает значительная часть углерода и легирующих элементов.

Геометрия и конструктивные соотношения шатунов, применительно к двигателям определенного назначения, в последнее время практически перестали сколько-нибудь существенно изменяться. Для средне- и высокооборотных двигателей традиционной является конструкция с неразъемной верхней головкой и разъемной нижней. Используются также конструкции шатунов из трех элементов (дизель М552С фирмы MaK-Caterpillar), обеспечивающие возможность извлекать поршень из цилиндра, не нарушая геометрии подшипника шатунной шейки коленчатого вала [7]. В транспортных поршневых двигателях, в том числе судовых, наиболее часто применяются шатуны с двутавровым сечением стержня [2], [7]. Такая конструкция способствует уменьшению массы шатуна при одновременном обеспечении его жесткости в плоскости, перпендикулярной плоскости качания [8].

Вместе с тем относительно недавно стали появляться сведения о разработке для транспортных двигателей шатунов с *H*-образным, крестообразным (*X*-образным) сечениями стержня, а также двутавровым сечением, включающим наклонные подкрепляющие ребра (рис. 1).

а)



б)



в)



Рис. 1. Общий вид шатуна:
а — с *Н*-образным сечением стержня; *б* — с крестообразным сечением стержня;
в — с двутавровым сечением стержня и подкрепляющими ребрами

По имеющимся сообщениям[1], стержни с измененной формой поперечного сечения могут способствовать значительному (в 1,4 раза) снижению массы шатуна, снижению напряжений (каких — не указывается), увеличению жесткости. Известно также, что компания *United Motors* производит малыми сериями шатуны с *Н*-образным сечением стержня для автомобилей ВАЗ. Отмечается, что эффект от применения подобных шатунов проявляется при повышении частоты вращения коленчатого вала; технология их изготовления усложняется по сравнению с таковой для шатунов традиционной конструкции. Об особенностях применения шатунов, показанных на рис. 1, *б*, *в* сведений практически нет.

Основная часть

Модернизация конструкции шатунов, а также появление новых конструкций кривошипно-шатунного механизма [9] свидетельствуют об актуальности исследования прочностных характеристик шатунов. В связи с этим предпринято исследование напряженно-деформированного состояния шатунов с различной формой сечения стержня. При исследовании напряжено-деформированного состояния деталей КШМ в процессе проектирования и модернизации ДВС успешно используются прикладные пакеты программ, реализующие метод конечных элементов и обеспечивающие высокую достоверность получаемых результатов. Применительно к шатунам данные методы использовались в работах [10] – [12]. В работе [13] проведено сравнение применяемых в России и за рубежом усталостных критериев для оценки долговечности шатунов с использованием конечно-элементного моделирования в программном комплексе ANSYS Workbench.

Для решения поставленной задачи средствами 3D-моделирования с использованием пакета Solid Works (лицензия № 9710 0044 1197 3644) были созданы твердотельные модели шатунов с указанными профилями поперечного сечения стержней (рис. 2). Все шатуны имели одинаковые длину, диаметры кривошипной и поршневой головок и практически идентичные массовые и некоторые инерционные характеристики, приведенные в относительной форме в табл. 1. Прототипом

[1] См. интернет-ресурс http://www.motorzona.ru

являлся шатун дизеля типа ЧН 10,5/12,7 с прямым разъемом кривошипной головки. Поскольку основным материалом шатунов в настоящее время по-прежнему остаются стали, при выполнении расчетов использовались показатели свойств материала (плотность, предел прочности, предел текучести, модуль упругости и др.), характерные для сталей. При определении относительных значений всех параметров за единицу были приняты значения таковых, соответствующих шатуну с традиционной двутавровой формой поперечного сечения. Остальные звенья КШМ во всех случаях не имели изменений в конструктивном оформлении.

Таблица 1

Массово-геометрические характеристики стержней шатунов

Профиль стержня	Площадь* сечения	Моменты инерции		Масса
		I_{xx}	I_{yy}	
Двутавр	1	1	1	1
H-образный	1,001	0,538	3,196	0,952
X-образный	1,076	0,689	1,652	0,965

* в среднем сечении стержня

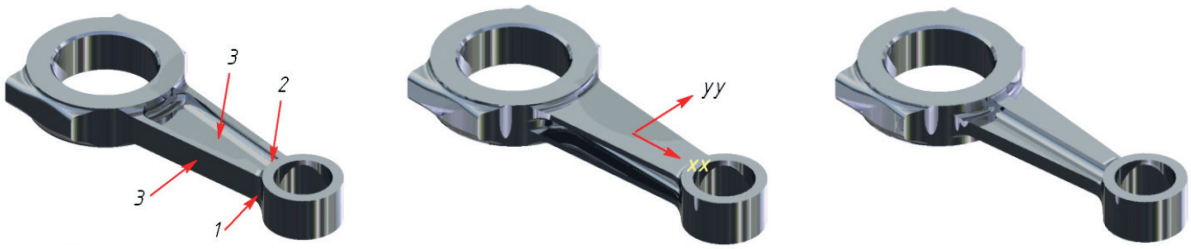


Рис. 2. Твердотельные модели исследованных шатунов с двутавровым, *H*-образным и крестообразным сечениями стержня: *1*, *2*, *3* — расчетные точки; *xx* и *yy* — оси для расчета моментов инерции сечений

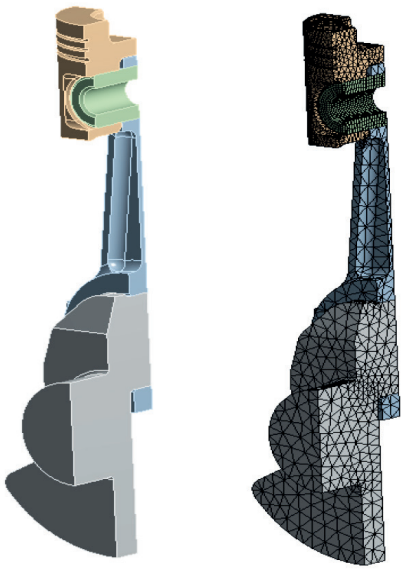


Рис. 3. Твердотельная и конечно-элементная модели сборок КШМ для статического расчета напряженно-деформированного состояния

Некоторое различие геометрических характеристик I_{xx} и I_{yy} сечений стержней (см. табл. 1) при идентичности значений массы и площади поперечного сечения позволяет предположить, что при увеличении длины шатуна может возникнуть необходимость анализа их устойчивости (в нашем расчете такой анализ не выполнялся, так как рассматривались короткие шатуны: во всех случаях постоянная КШМ $\lambda = R/L$ равнялась 0,289).

Первоначально методом конечных элементов были проведены статические расчеты параметров напряженно-деформированного состояния КШМ при условии его нагружения максимальной газовой силой и максимальной силой инерции, развиваемой поступательно движущимися массами. В обоих случаях поршень находится в верхней мертвой точке в начале тактов, соответственно, расширения и впуска. Для этих расчетов были созданы конечно-элементные модели КШМ (одна из них показана на рис. 3; в связи с наличием двух плоскостей симметрии оказалось возможным рассмотреть лишь четверть КШМ одного цилиндра). Принималось, что максимальное давление сгорания равно 18 МПа, а частота враще-

ния коленчатого вала равна 3000 мин$^{-1}$. В ходе расчетов определялись значения эквивалентных напряжений в показанных на рис. 4 точках шатунов, их значения (также в относительной форме) приведены в табл. 2 – 5.

Таблица 2

Максимальные перемещения точек шатунов при статическом сжатии

Профиль стержня	Точка 1	Точка 2	Точка 3
Двутавр	1	1	1
Н-образный	0,962	0,910	0,897
Крестообразный	0,887	0,890	0,891

Таблица 3

Максимальные перемещения точек шатунов при статическом растяжении

Профиль стержня	Точка 1	Точка 2	Точка 3
Двутавр	1	1	1
Н-образный	0,859	0,939	0,912
Крестообразный	0,910	0,913	0,909

Таблица 4

Максимальные эквивалентные напряжения точек шатунов при статическом сжатии

Профиль стержня	Точка 1	Точка 2	Точка 3
Двутавр	1	1	1
Н-образный	0,854	0,821	0,879
Крестообразный	0,919	0,766	0,876

Таблица 5

Эквивалентные напряжения точек шатунов при статическом растяжении

Профиль стержня	Точка 1	Точка 2	Точка 3
Двутавр	1	1	1
Н-образный	1,015	0,860	0,835
Крестообразный	1,018	0,800	0,935

Анализ результатов свидетельствует о наличии лишь незначительных преимуществ шатунов с нетрадиционными формами поперечного сечения стержней. Характер напряженно-деформированного состояния (местоположение концентраторов напряжений и пр.) во всех случаях не претерпевает существенных изменений.

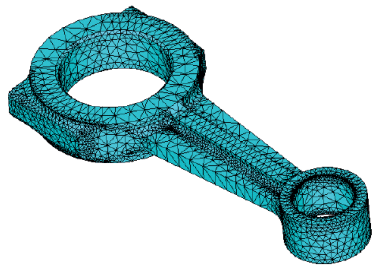


Рис. 4. Конечно-элементная модель шатуна с крестообразным профилем поперечного сечения

Далее был проведен расчет напряженно-деформированного состояния шатунов в динамической постановке. Для этого использовались полноразмерные конечно-элементные модели двухцилиндровых двигателей. Использовалась сетка с умеренной плотностью изопараметрических конечных элементов с квадратичной функцией формы (модель каждого шатуна содержала около 70 тыс. элементов, рис. 4).

Оба поршня такого двигателя движутся в одной фазе, но один из них нагружается максимальной газовой силой, сжимающей шатун, а другой — максимальной инерционной силой, растягивающей шатун. Расчет проводился в среде программного продукта ANSYS/LS-Dyna (лицензионное соглашение Ansys

Customer Number № 1049375 от 17.12.2014) в соответствии с ранее разработанной и неоднократно апробированной методикой [14] – [16], когда параметры напряженно-деформированного и вибрационного состояния механизма определяются с учетом контактного взаимодействия его звеньев при быстропеременном характере нагружения. В ходе такого расчета в среде программного продукта ANSYS/LS-Dyna в показанных на рис. 2 точках шатунов определялись зависимости перемещений и эквивалентных напряжений от времени. При постпроцессорной обработке полученных результатов определены их среднеквадратичные значения [17], приведенные в табл. 6.

Таблица 6

Среднеквадратичные значения эквивалентных напряжений точек шатунов при динамическом нагружении

Профиль стержня	Точка 1	Точка 2	Точка 3
Двутавр	1	1	1
H-образный	0,703	0,773	1,700
Крестообразный	1,300	1,261	1,852

Расчет параметров напряженно-деформированного состояния шатунов с учетом контактного взаимодействия и быстропеременного характера нагружения в целом подтверждает вывод, сделанный по результатам статического расчета, о наличии лишь несущественных преимуществ шатунов с *H*-образным профилем сечения стержня и отсутствии таковых у шатунов с крестообразным профилем.

Выводы

1. Твердотельное моделирование шатунов с различными формами сечения стержня показало, что преимущество по массе шатунов с *H*-образным и *X*-образным сечениями стержня составляет не более 5 %.

2. Характер напряженно-деформированного состояния (местоположение концентраторов напряжений и пр.) для различных форм сечения стержня не претерпевает существенных изменений.

3. Результаты расчетов эквивалентных напряжений, выполненные с использованием программного продукта ANSYS/LS-Dyna при статическом и динамическом нагружениях, свидетельствуют, что незначительные преимущества имеют шатуны с *H*-образным профилем сечения стержня, шатуны с *X*-образным профилем сечения таких преимуществ не имеют.

4. Учитывая усложнение технологии производства шатунов с *H*-образным профилем сечения стержня, перспективность такого способа повышения прочности шатуна требует дополнительного обоснования.

5. Для большинства судовых средне- и высокооборотных дизелей двутавровое сечение стержня шатуна остается наиболее рациональным.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Салтыков М. А.* Прочность ДВС. Методы и средства обеспечения безопасности / М. А. Салтыков. — М.: Изд-во МГОУ, 1995. — Ч. 1. — 90 с.

2. *Чайнов Н. Д.* Конструирование двигателей внутреннего сгорания / Н. Д. Чайнов, Н. А. Иващенко, А. Н. Краснокутский, Л. Л. Мягков. — М.: Машиностроение, 2008. — 496 с.

3. *Краснокутский А. Н.* Оценка и сравнение долговечности шатунов из стали и титанового сплава высокофорсированного авиационного дизеля / А. Н. Краснокутский, А. О. Калинин // Наука и образование: научное издание МГТУ им. Н. Э. Баумана. — 2012. — № 8. — С. 30–32. DOI: 10.7463/0812.0475907.

4. *Калинин А. О.* Применение титановых сплавов для шатунов высокофорсированных авиационных дизелей / А. О. Калинин, А. Н. Краснокутский // Наука и образование: научное издание МГТУ им. Н. Э. Баумана. — 2011. — № 13. — С. 20–22.

5. *Moldenhauer F.* Verbesserungen bei bruchtrennfähigen Pleuelstangen durch neuen mikrolegierten Stahl / F. Moldenhauer // MTZ – Motortechnische Zeitschrift. — 2000. — Vol. 61. — Is. 4. — Pp. 244–245. DOI: 10.1007/BF03226567.

6. *Neugebauer R.* Halbwarm-Präzisionsschmieden eines Pleuels mit offenem Steg / R. Neugebauer, H. Hartwig, A. Wagner. — Düsseldorf: Verlag und Vertriebsgesellschaft, 2008. — 100 p.

7. *Конкс Г. А.* Мировое судовое дизелестроение. Концепции конструирования, анализ международного опыта / Г. А. Конкс, В. А. Лашко. — М.: Машиностроение, 2005. — 512 с.

8. *Новиков Д. С.* Вибрация автомобильного силового агрегата / Д. С. Новиков, А. И. Яманин // Труды НАМИ. — 2012. — № 250. — С. 50–61.

9. *Косенок Б. Б.* Синтез и исследование динамических характеристик перспективного кривошипно-шатунного механизма ДВС / Б. Б. Косенок, В. Б. Балякин, И. Н. Жильцов // Вестник машиностроения. — 2016. — № 10. — С. 47–50.

10. *Вальехо Мальдонадо П. Р.* Реализация процесса проектирования кривошипно-шатунного механизма ДВС в системе AUTODESK INVENTOR / П. Р. Вальехо Мальдонадо, Д. К. Гришин, В. А. Лодня // Вестник Российского университета дружбы народов. Серия: Инженерные исследования. — 2008. — № 2. — С. 85–89.

11. *Чайнов Н. Д.* Расчетно-экспериментальное обоснование прочности и надежности шатунов при создании и модернизации высокофорсированных двигателей / Н. Д. Чайнов, А. Б. Матисен // Наука и образование: научное издание МГТУ им. Н. Э. Баумана. — 2011. — № 12. — С. 7.

12. *Горшкалев А. А.* Использование CAD/CAE-систем для расчета на прочность деталей кривошипно-шатунного механизма ДВС / А. А. Горшкалев, А. В. Кривцов, Е. А. Сайгаков, Д. В. Сморкалов // Вестник Самарского университета. Аэрокосмическая техника, технологии и машиностроение. — 2011. — № 3–4 (27). — С. 172–176.

13. *Арпишкин А. Ю.* Применение критериев многоосного усталостного разрушения к оценке выносливости шатуна / А. Ю. Арпишкин, Л. Л. Мягков // Сб. тезисов докладов международной научно-технической конференции «Двигатель-2017». — М.: МГТУ им. Н. Э. Баумана. — С. 24–25.

14. *Яманин А. И.* Виброактивность форсированного двигателя с продолженным расширением рабочего тела / А. И. Яманин, В. А. Жуков // Вестник Рыбинской государственной авиационной технологической академии им. П. А. Соловьева. — 2014. — № 2 (29). — С. 88–90.

15. *Яманин А. И.* Численное моделирование виброактивности поршневых двигателей с продолженным расширением рабочего тела / А. И. Яманин, В. А. Жуков // Двигатели внутреннего сгорания. — 2014. — № 1. — С. 27–31.

16. *Жуков В. А.* Анализ алгоритмов расчета кинематики кривошипно-шатунных механизмов с прицепными шатунами / В. А. Жуков, А. И. Яманин // Вестник Государственного университета морского и речного флота имени адмирала С. О. Макарова. — 2016. — № 2 (36). — С. 109–118. DOI: 10.21821/2309-5180-2016-8-2-109-118.

17. *Яманин А. И.* Расчет быстропеременных процессов в среде ANSYS/LS-DYNA / А. И. Яманин, В. Ф. Кутенев, Г. Г. Тер-Мкртичьян. — Ярославль: Изд-во ЯГТУ, 2011. — 92 с.

REFERENCES

1. Saltykov, M. A. *Prochnost' DVS. Metody i sredstva obespechenija. Chast' 1*. M.: MGOU, 1995.

2. Chainov, N. D., N. A. Ivashchenko, A. N. Krasnokutskii, and L. L. Myagkov. *Konstruirovanie dvigatelei vnutrennego sgoraniya*. M.: Mashinostroenie, 2008.

3. Krasnokutskii, A. N., and A. O. Kalinin. "Evaluation and comparison of longevity of rods made of steel and titanium alloy in high power aircraft engine." *Engineering Education* 8 (2012): 30. DOI: 10.7463/0812.0475907

4. Kalinin, A. O., and A. N. Krasnokutskii. "77-30569/229603 primenenie titanovykh splavov dlya shatunov vysokoforsirovannykh aviatsionnykh dizelei." *Nauka i obrazovanie: nauchnoe izdanie MGTU im. N.E. Baumana* 13 (2011): 20.

5. Moldenhauer, Frank. "Verbesserungen bei bruchtrennfähigen Pleuelstangen durch neuen mikrolegierten Stahl." *MTZ-Motortechnische Zeitschrift* 61.4 (2000): 244–245. DOI: 10.1007/BF03226567

6. Neugebauer, Reimund, H. Hartwig, and A. Wagner. *Semi-hot precision forging of connecting rods with open shanks*. Düsseldorf: Verlag und Vertriebsgesellschaft, 2008.

7. Konks, G. A., and V. A. Lashko. *Mirovoe sudovoe dizelestroenie. Kontseptsii konstruirovaniya, analiz mezhdunarodnogo opyta*. M.: Mashinostroenie, 2005.

8. Novikov, Dmitriy, and Alexander Yamanin. "Vibration of automotive power unit." *Trudy NAMI* 250 (2012): 50–61.

9. Kosenok, B. B., V. B. Balyakin, and I. N. Zhil'tsov. "Synthesis and research of dynamic characteristics of prospective ICE crank-and-rod mechanism." *Russian Engineering Research* 10 (2016): 47–50.

10. Vallejo Maldonado, P. R., D. K. Grishin, and V. A. Lodnya. "Realization of process of designing ice crankshaft -rod mechanism in autodesk inventor system." *RUDN Journal of Engineering Researches* 2 (2008): 85–89.

11. Chainov, N. D., and A. B. Matisen. "Design and experimental study of connecting rod strength and reliability at the stages of high performance engine creation and modernization." *Nauka i obrazovanie: nauchnoe izdanie MGTU im. N.E. Baumana* 12 (2011): 7.

12. Gorshkalev, Alexey Aleksandrovich, Alexander Vasilevich Krivtsov, Evgeniy Arkadevich Saigakov, and Dmitry Vladimirovich Smorkalov. "Application CAD/CAE - systems for calculation on durability of details crank rod mechanismofinternal combustion engine." *VESTNIK of Samara University. Aerospace and Mechanical Engineering* 3-4(27) (2011): 172–176.

13. Arpishkin, A. Yu., and L. L. Myagkov. "Primenenie kriteriev mnogoosnogo ustalostnogo razrusheniya k otsenke vynos-livosti shatuna." *Sbornik tezisov dokladov mezhdunarodnoi nauchno-tekhnicheskoi konferentsii «Dvigatel'-2017»*. M.: MGTU im. N.E. Baumana. 24–25.

14. Yamanin, A. I., and V. A. Zhukov. "Uprated engine vibro-activity in context of working medium prolonged expansion." *Vestnik Rybinskoi gosudarstvennoi aviatsionnoi tekhnologicheskoi akademii im. P.A. Solov'eva* 2(29) (2014): 88–90.

15. Yamanin, A. I., and V. A. Zhukov. "Numerical simulation of vibration of piston engines with prolonged expansion of working medium." *Internal Combustion engines* 1 (2014): 27–31.

16. Zhukov, Vladimir Anatolevich, and Alexander Ivanovich Yamanin. "The analysis of algorithms for calculation of kinematics of crankshaft-rod mechanism with the coupled connecting-rods." *Vestnik Gosudarstvennogo universiteta morskogo i rechnogo flota imeni admirala S.O. Makarova* 2(36) (2016): 109–118. DOI: 10.21821/2309-5180-2016-8-2-109-118

17. Yamanin, A. I., V. F. Kutenev, and G. G. Ter-Mkrtich'yan. *Raschet bystroperemennykh protsessov v srede ANSYS/LS-DYNA*. Yaroslavl': Izd-vo YaGTU, 2011.

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

Яманин Александр Иванович —
доктор технических наук, профессор
ФГБОУ ВО «ЯГТУ»
150023, Российская Федерация, г. Ярославль, Московский проспект, 88
e-mail: *yamaninai@ystu.ru*

Жуков Владимир Анатольевич —
доктор технических наук, доцент
ФГБОУ ВО «ГУМРФ имени адмирала С. О. Макарова»
198035, Российская Федерация, Санкт-Петербург, ул. Двинская, 5/7
e-mail: *va_zhukov@rambler.ru*, *zhukovva@gumrf.ru*

INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Yamanin, Alexander I. —
Dr. of Technical Sciences, professor
Yaroslavl State Technical University
88 Moskovskii prospekt, Yaroslavl', 150023, Russian Federation
e-mail: *yamaninai@ystu.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*

Статья поступила в редакцию 3 марта 2017 г.
Received: March 3, 2017.

ВЕСТНИК
ГОСУДАРСТВЕННОГО УНИВЕРСИТЕТА
МОРСКОГО И РЕЧНОГО ФЛОТА ИМЕНИ АДМИРАЛА С. О. МАКАРОВА

DOI: 10.21821/2309-5180-2017-9-2-364-372

RESEARCH OF BEHAVIOUR OF HIGH-VISCOSITY LIQUID IN TRANSIT IN THE TANKER TANK IN OPERATING TIME OF AUXILIARY SYSTEM OF HEATING

E. A. Gorbaneva, P. V. Yakovlev

Astrakhan State Technical University, Astrakhan, Russian Federation

A huge impact on the heat exchange process between heated cargo tank and enclosing surfaces having the design of the vessel and thermal properties of the cargo (high viscosity fluids). Studies have shown their influence on initial and boundary conditions, which in turn influences the mode of operation of the auxiliary power plant of the vessel. It is proposed to use lightweight perforated horizontal partition, installed parallel to the heaters in the volume of cargo (liquid) tank liquid vessel. Through numerical simulation we studied the behavior of cargo (liquid) during operation of the heating system in the amount of tank liquid to the vessel, given the physical properties of the cargo without partitions and its application. The analysis of temperature fields and fields of velocities. The resulting effect of the application partition on the heights 4, 6 and 7 m, the effect of reducing the installed power of the heaters without increasing the overall weight and cost of retrofitting existing tanks 7 – 11 %. Adjusting the height of the partitions it is possible to influence the temperature regime of transportation of cargo (liquid) and maintain its temperature within the desired range. The obtained dependences for the heat transfer coefficient lead to the conclusion that effective use of partitions on the mirror of the goods. The efficiency of the use of the partition at a height of 7 m, compared with 3M and is 35 %. The obtained criterion equation allowing to expand the scope of solutions for the heat transfer coefficient at the free surface of the cargo (fluid) that allows easier calculations of heat losses in the calculation of the auxiliary heating system.

Keywords: tank bulk vessel, the cargo heating system, numerical simulation of heat transfer processes in the liquid volume of the tank.

For citation:
Gorbaneva, Evgenia A., and Pavel V. Yakovlev. "Research of behaviour of high-viscosity liquid in transit in the tanker tank, in operating time of auxiliary system of heating." *Vestnik Gosudarstvennogo universiteta morskogo i rechnogo flota imeni admirala S. O. Makarova* 9.2 (2017): 364–372. DOI: 10.21821/2309-5180-2017-9-2-364-372.

УДК 661.21.002.6

ЧИСЛЕННОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ПОВЕДЕНИЯ ВЫСОКОВЯЗКОЙ ЖИДКОСТИ ПРИ ПЕРЕВОЗКЕ В ТАНКЕ НАЛИВНОГО СУДНА ВО ВРЕМЯ РАБОТЫ ВСПОМОГАТЕЛЬНОЙ СИСТЕМЫ ПОДОГРЕВА

Е. А. Горбанева, П. В. Яковлев

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

Огромное влияние на процесс теплообмена между нагреваемым грузом танка и ограждающими поверхностями оказывает конструкция судна и теплофизические свойства груза (высоковязкой жидкости). Исследования показали их влияние на начальные и граничные условия, что, в свою очередь, оказывает влияние на режим работы вспомогательной энергетической установки судна. Предложено использовать легкую перфорированную горизонтальную перегородку, установленную параллельно подогревателям в объеме груза (жидкости) танка наливного судна. Посредством методов численного моделирования изучено поведение груза (жидкости) во время работы системы подогрева в объеме танка наливного судна, учитывая физические свойства груза без перегородки и при ее применении. Проведен анализ температурных полей и полей скоростей. Получен эффект от применения перегородки на высотах 4, 6 и 7 м. Эффект снижения установленной мощности подогревателей без увеличения общей массы и затрат на переоборудование существующих танков составил 7 – 11 %. Регулируя высоту расположения перегородки возможно оказывать влияние на температурный режим транспортировки груза (жидкости) и поддерживать ее температуру в необходимом диапазоне. Получено критериальное уравнение, позволяющее расширить область решений, что позволяет облегчить расчеты тепловых потерь при расчете вспомогательной системы подогрева.

Ключевые слова: танк наливного судна, система подогрева груза, численное моделирование теплообменных процессов в объеме танка наливного судна.

Для цитирования:
Горбанева Е. А. Численное исследование поведения высоковязкой жидкости при перевозке в танке наливного судна во время работы вспомогательной системы подогрева / Е. А. Горбанева, П. В. Яковлев // Вестник Государственного университета морского и речного флота имени адмирала С. О. Макарова. — 2017. — Т. 9. — № 2. — С. 364–372. DOI: 10.21821/2309-5180-2017-9-2-364-372.

Введение

В настоящее время грузоперевозчики России составляют 5 % от общего рынка участников перевозок нефти портов России, что становится решающим в выборе стратегии развития отечественных морских и речных транспортных компаний [1]. Увеличение объемов добычи высоковязких нефтепродуктов (жидкостей) как в стране, так и в Астраханском регионе (открытие новых месторождений) выдвигает на первый план способы транспортировки данных жидкостей к местам переработки или потребителю. Учитывая расположение нашего региона, одним из наиболее доступных и дешевых способов транспортировки является водный путь. Географическое и гидрологическое положение региона позволяет транспортировать нефтепродукты наливным флотом. Так как грузы данного рода перевозят в неблагоприятных климатических условиях, то наливные суда для данного рода груза оборудуют двойным бортом, днищем и изолированной палубой. Судно разделено на отсеки — танки, в которые закачивается нефтепродукт. Так как воздействовать на температуру окружающей среды мы не можем, ставится задача воздействия на температурный режим во время транспортировки, а конкретно — на работу вспомогательной системы подогрева судна.

Нефтепродукты, как правило, являются высоковязкими жидкостями. При температуре ниже температуры кристаллизации парафины и органические соединения, входящие в ее состав, затвердевают, и нефть из жидкого состояния переходит в твердое. В течение всего времени оборота судна в перевозимой жидкости поддерживается температура, которая задается технологическими процессами слива и налива. Данное условие легко осуществимо в летний период. В зимний период при значительных понижениях температуры нужен не просто дополнительный обогрев, а порой и перегрев жидкости. Проблема работы систем подогрева для поддержания температурного режима высоковязкой жидкости в заданных технологическим режимом транспортировки пределах напрямую связана с физическими свойствами перевозимой жидкости, и представляется необходимым изучение тепловых потоков внутри транспортируемой жидкости и гидродинамики пограничных слоев. Данный вопрос мало изучен и сложен с точки зрения гидравлики, теплофизики и теплотехники. Изучение данной проблемы затруднено по причине большого разнообразия конструктивного исполнения емкостей, разнообразия и разнонаправленности теплопереноса внутри транспортируемой жидкости.

При проектировании систем подогрева танков наливных судов и в процессе эксплуатации при разработке энергосберегающих мероприятий возникают определенные трудности, связанные со снижением потерь тепловой энергии в окружающую среду. Так как через зеркало свободной поверхности жидкости теплопотери составляют 35 %, очевидна необходимость разработки способов снижения потерь через палубу. Одним из них является изменение структуры потоков груза с разделением высокотемпературных потоков для локального снижения температуры вдоль ограждающих поверхностей. Вместе с тем процессы теплообмена при стационарных режимах работы системы подогрева в танке с позонным подогревом имеют существенные особенности. Однако существующие методики расчета теплоэнергетического оборудования наливных судов не учитывают возможность управления массовыми и тепловыми потоками в объеме груза, что требует проведения исследований с целью их уточнения и дополнения.

Во время работы вспомогательной системы подогрева в объеме жидкости складывается поле температур переменной структуры, которое за счет свободно-конвективных токов внутри

объема наливного танка формирует пограничные слои. Анализ работ, посвящённых аналитическому решению подобных задач, показал необходимость введения ряда допущений, вносящих существенные погрешности. Так, большинство известных теоретических и экспериментальных исследований выполнено для горизонтальных неограниченных слоёв. Среди них можно отметить зависимости, приведённые С. С. Кутателадзе («Основы теории теплообмена») и С. И. Исаевым («Теория тепломассообмена»).

В танке наливного судна теплообмен существенно сложнее. Это определяется следующими факторами.

1. Ограничением объёма вертикальными поверхностями и прежде всего влиянием на конвективное движение потерь тепла через двойной борт. Охлаждение груза формирует нисходящий поток жидкости вдоль борта, участвующий в общем движении груза в танке.

2. Как правило, в танке используются трубчатые подогреватели, являющиеся, с позиции теплообмена, локальными источниками тепла, от которых формируются восходящие потоки груза. Сложность решения обусловлена формированием восходящих потоков от каждой отдельной трубы, прослеживаемых на расстоянии нескольких десятков диаметров трубы.

3. Взаимодействием нисходящего потока вдоль борта с восходящими потоками, сопровождающимся формированием вихревой зоны с взаимным их перемешиванием.

4. Граничные условия на поверхности зеркала свободной поверхности груза отличаются от классических условий 1-, 2-, или 3-го рода. Теплообмен на поверхности осложнён тем, что:

– циркуляция воздуха под палубой также является свободной конвекцией, определяемой геометрией воздушной прослойки и граничными условиями, и характеризуется значительными изменениями локальных значений коэффициентов теплоотдачи на границах;

– значительные отличия температур поверхностей в воздушном пространстве танка требуют учёта лучистой составляющей;

– набор корпуса судна с позиции теплообмена представляет собой систему рёбер, являющихся тепловыми мостиками;

– сложная геометрия набора приводит к делению воздушного пространства на отдельные ячейки со своими условиями теплообмена.

5. Палуба танкера вносит значительную неопределённость в определение термического сопротивления между палубой и окружающей средой. Изменение направления и скорости ветра, геометрия надстроек, изменение курса, волнение, облачность, осадки и т. д. не позволяют точно установить граничные условия на палубе. Учитывая относительную малость общего вклада этого термического сопротивления целесообразно включать в расчёт худший сценарий на поверхности палубы с граничными условиями 1-го рода.

Численное исследование поведения высоковязких жидкостей во время работы системы подогрева в танке наливного судна

Проведенный анализ публикаций по данной тематике показал, что огромное влияние на процесс теплообмена оказывает конструкция судна и теплофизические свойства высоковязкой жидкости. Большое разнообразие и значительная сложность конструкций ограждающих поверхностей, совместный перенос тепла конвекцией и теплопроводностью делают расчет теплопотерь достаточно сложной и трудоемкой задачей, включающей элементы научного исследования. Методы расчета разрабатываются на основе результатов исследования процессов теплообмена [2] – [6].

В общем режим работы системы подогрева танка состоит из процессов нагрева и поддержания температуры жидкости танка в соответствии с нормами технологического режима. Чем выше вязкость жидкости, тем выше должна быть температура жидкости, при которой она закачивается в танк, температура жидкости в процессе транспортировки тоже будет выше, что служит дополнительной нагрузкой на вспомогательную энергетическую установку. Как уже упоминалось, в объеме груза танка формируется устойчивое течение: от подогревателей горячие слои поднимаются к поверхности жидкости, а холодные слои возле борта за счет работы подогревателей подтягива-

ются в донную область. Таким образом, формируется перегретое зеркало свободной поверхности жидкости. Контактируя с воздушной прослойкой зеркало жидкости отдает тепло, и уже в воздушной прослойке происходит конвективный перенос тепла, осложнённый лучистым теплообменом. В воздушной прослойке формируются отдельные вихри и токи, которые обусловлены наличием рёбер жёсткости палубы.

Для решения задачи снижения потерь тепла через палубу авторы предлагают расположить в объеме жидкости танка новый конструктивный элемент — легкую, проницаемую для жидкости при перегрузочных работах и качке судна, горизонтальную перегородку, которую располагают в объеме жидкости танка параллельно плоскости осей подогревателей. Высота расположения перегородки определяется необходимостью снижения потерь тепла при одновременном повышении средней температуры груза.

Проведенные авторами численные и лабораторные эксперименты позволили выявить значимость влияния и необходимость учета особенности теплообмена при расчете потерь тепла между жидкостью и ограждающими поверхностями танка [7] – [10]. Свободно-конвективное движение груза внутри танка обусловлено поведением изотермического ядра жидкости. Во время работы системы подогрева жидкость, нагретая трубчатыми подогревателями и имеющая меньшую плотность, чем остальная жидкость, за счет действия сил Архимеда поднимается вверх, а жидкость с большей плотностью (остывающая вдоль борта) опускается вниз, что приводит к образованию известных ячеистых течений. Возникающие циркуляционные течения оказывают значительное влияние на картину поведения груза во время процесса транспортировки. Формируется направленное течение груза вдоль зеркала свободной поверхности, в направлении вертикальных охлаждаемых поверхностей, с дальнейшим стеканием груза в придонную область и смещением в зону горячего груза над нагревателями, где груз заново нагревается и поднимется к свободной поверхности с дальнейшим движением вдоль нее в направлении вертикальных охлаждаемых поверхностей. В процессе данного свободно-конвективного движения груза формируется высокотемпературное ядро груза, внутри которого температура меняется крайне незначительно.

Основная масса жидкости представляет практически изотермическое ядро, и лишь вблизи вертикальных, наклонных и горизонтальных поверхностей наблюдается слой с существенным градиентом температуры. Это необходимо учитывать при расчете потерь тепла в танке. Добавленный конструктивный элемент в виде горизонтальной перфорированной перегородки над нагревателями влияет на указанное распределение температур, изменяя тепловой поток от зеркала свободной поверхности груза. Очевидно, что высота расположения перегородки над нагревателями влияет на потери тепла через палубу и температурное поле ядра груза под перегородкой. Оценка влияния горизонтальной перегородки на работу системы подогрева и является целью настоящего исследования.

Сложность геометрии танка и системы подогрева, зависимость параметров груза от температуры, влияние лучистого теплообмена позволяют получить решение задачи, используя численные методы. Система исходных дифференциальных уравнений (1) – (3) включает в себя уравнения Навье–Стокса, уравнение сплошности и уравнение энергии (сложность решения для условий свободноконвективного движения заключается во взаимном влиянии процессов теплообмена и движения груза):

$$\frac{d\vec{w}}{d\tau} = -\vec{g}\beta\Delta t - \frac{1}{\rho}\nabla p + \nu\left(\frac{\partial^2 w_x}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 w_y}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 w_z}{\partial z^2}\right); \quad (1)$$

$$\frac{\partial w_x}{\partial x} + \frac{\partial w_y}{\partial y} + \frac{\partial w_z}{\partial z} = 0; \quad (2)$$

$$\frac{\partial t}{\partial \tau} + w_x\frac{\partial t}{\partial x} + w_y\frac{\partial t}{\partial y} + w_z\frac{\partial t}{\partial z} = a\left(\frac{\partial^2 t}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 t}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 t}{\partial z^2}\right), \quad (3)$$

где w — скорость, м/с; τ — время, с; g — ускорение свободного падения, м/с^2; β — коэффициент объёмного расширения, K^{-1}; ν — коэффициент кинематической вязкости, м^2/с; ρ — плотность, кг/м^3; p — давление, Па; x, y, z — координаты, м; a — коэффициент температуропроводности, м^2/с.

Система уравнений дополняется условиями однозначности — начальными и граничными условиями:

– начальные условия: $t(x, 0) = t_0$; $0 \le x \le H$;

– граничные условия для перегородки: $\left.\frac{\partial t_1(H,\tau)}{\partial y}\right|_{y=H} = \left.\frac{\partial t_2(H,\tau)}{\partial y}\right|_{y=H}$, $t_1(H,\tau) = t_2(H,\tau)$;

– граничные условия для борта и днища соответственно:

$$k_{\text{днища}}(t_{\text{нп}} - t_{\text{зв}}) = -\lambda\frac{\partial t}{\partial y};\ k_{\text{борт}}(t_{\text{нп}} - t_{\text{зв}}) = -\lambda\frac{\partial t}{\partial x},$$

где $t_1(H, \tau)$ — температура на нижней поверхности перегородки, °С; $t_2(H, \tau)$ — температура на верхней поверхности перегородки, °С; $k_{\text{днища}}$, $k_{\text{борт}}$ — коэффициенты теплопередачи через двойные днище и борт, Вт/(м^2·°С); λ — коэффициент теплопроводности нефтепродукта, Вт/(м·°С); $t_{\text{нп}}$ — температура нефтепродукта, °С; $t_{\text{зв}}$ — температура забортной воды, °С.

Тепловой поток в направлении соседних танков (по направлению z) не учитывался, так как в большинстве случаев температуры в соседних танках близки и тепловые потоки через стенки смежных танков считаются равными $q = 0$. Отдельным классом задач можно считать расчёт танка речного судна без продольной переборки. В этом случае граничные условия по оси танка устанавливаются по условию «симметрия», т. е. касательные напряжения в жидкости на оси симметрии принимаются

$$\tau = -\mu\frac{\partial w}{\partial x} = 0,$$

где μ — коэффициент динамической вязкости, Па·с; τ — касательные напряжения, н/м^2.

Экспериментальные исследования показали наибольшую эффективность непроницаемой перегородки. Вместе с тем выполнение перегрузочных операций, переливы нефтепродукта при качке требуют определённой доли проницаемости, легко реализуемой системой клапанов, нормально закрытых в условиях отсутствия качки. В расчёте принято непроницаемое состояние клапанов.

Как показали исследования ряда авторов (А. З. Щербаков, Н. В. Селиванов), локальное изменение вязкости, например, около трубчатых подогревателей, оказывает существенное влияние на движение высоковязких жидкостей. В связи с этим, как отмечалось ранее, для свободно-конвективного движения крайне важно учитывать взаимозависимость плотности и вязкости от температуры, что и реализовано в численной модели. На рис. 1 представлена расчётная модель танка наливного судна.

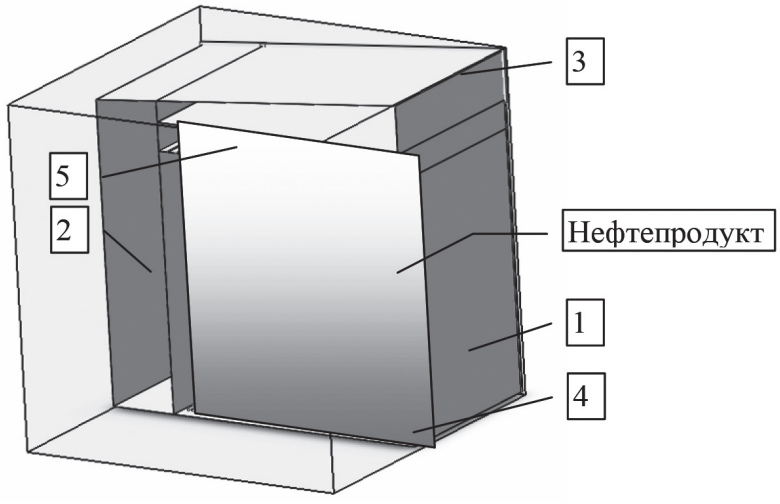


Рис. 1. Модель танка наливного судна (в разрезе):
1 — танк; *2* — двойной борт; *3* — палуба; *4* — система трубчатых подогревателей;
5 — горизонтальная перегородка

Способ разбивки модели сеткой определялся из условия сходимости решения и зависел от степени детализации модели и соотношения размеров элементов танка и теплотехнического оборудования как наиболее мелких элементов расчётной схемы. В решениях использовалась неравномерная сетка с уменьшением размера ячеек в угловых зонах и на гранях элементов танка. Пример разбивки приведён на рис. 2.

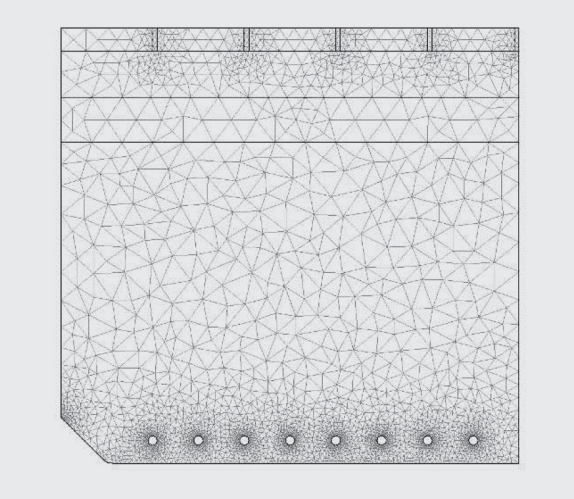


Рис. 2. Расчётная сетка

Основные закономерности работы систем подогрева танка можно проиллюстрировать общим видом полей скорости и температур нефтепродукта и воздуха между палубой и зеркалом свободной поверхности. На рис. 3, *а* представлен результат расчёта без горизонтальной перегородки над нагревателями. Как видно из поля температур, над нагревателями прослеживаются чётко выраженные восходящие струйки нефтепродукта, причиной появления которых является сочетание двух факторов: первый — разогрев нефтепродукта около подогревателя со снижением его плотности (появление сил Архимеда); второй — разогретый нефтепродукт обладает меньшей вязкостью, а, следовательно, именно в зоне теплового следа трубчатого подогревателя силы трения минимальны.

а) б)

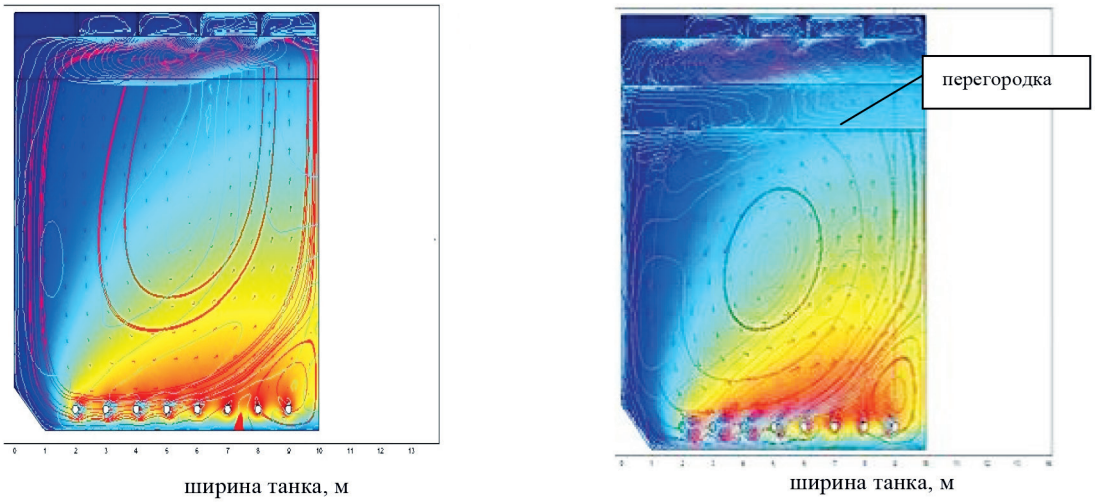


Рис. 3. Поля скоростей и температур в объеме танка:
а — без перегородки; *б* — с перегородкой ($H_{перег}$ = 7 м)

Разогретый нефтепродукт «всплывает» к зеркалу свободной поверхности, повышая его температуру, что способствует росту потерь тепла.

Еще один фактор, влияющий на движение нефтепродукта,— присутствие холодного борта. Остывающий нефтепродукт вдоль борта опускается вниз к подогревателям, отклоняя восходящие струи от вертикали. Взаимное влияние этих двух факторов объясняет интенсивную циркуляцию нефтепродукта в танке. Похожие процессы происходят в воздушной прослойке между палубой и зеркалом груза. Расчёт этого участка танка осложнён неправильной геометрией расчётной зоны, наличием тепловых мостиков (стальных рёбер жёсткости палубы) и лучистым теплообменом, учённых в расчёте.

На рис. 3, *б* представлена аналогичная схема с добавленной горизонтальной перегородкой над нагревателями. Расчёты дали прогнозируемый результат использования перегородки. Восходящие потоки разогретого нефтепродукта не дошли до зеркала свободной поверхности груза, а циркуляция в верхней части танка уменьшилась. Как показали расчёты, произошло снижение потерь тепла при росте средней температуры ядра транспортируемого груза. Приведённые на рис. 4 поля скоростей подтверждают сделанные выводы относительно особенностей характера движения груза в танке.

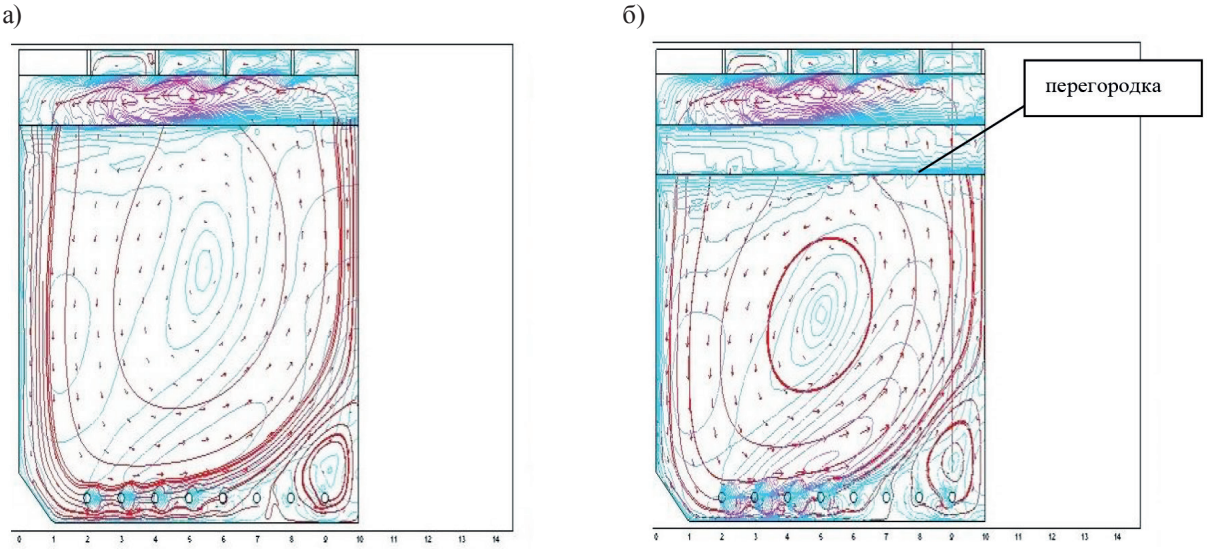


Рис. 4. Поле скорости в танке:
а — без перегородки; *б* — с перегородкой ($H_{\text{перег}}$ = 7 м)

Выводы

Обработка полученных результатов расчётов производилась с использованием методов теории подобия, в результате для расчёта коэффициента теплопередачи через палубу получено критериальное уравнение

$$\mathrm{Nu} = 2\mathrm{Ra}^{0,6014} \cdot \left(-0,05H^3 + 0,4H^2 - 0,7H + 1,4\right), \qquad (4)$$

где Nu — число Нуссельта; Ra — число Рэлея; H — относительная высота расположения перегородки над нагревателями, $H = H_{\text{пер}} / H_{\text{взлива}}$; $H_{\text{пер}}$ — высота расположения перегородки над нагревателями, м; $H_{\text{взлива}}$ — взлив (уровень нефтепродукта в танке), м. Определяющий размер — высота смоченной части ограждающей поверхности танка, определяющая температура — средняя температура нефтепродукта.

Полученные авторами результаты позволили сделать выводы о возможности снижения потерь тепла от разогретого нефтепродукта через палубу, при размещении легкой горизонтальной перегородки над трубчатыми подогревателями. Общее расчётное снижение потерь тепла и потребной мощности систем подогрева танка составляет 7 – 11 %. Полученное обобщающее критериальное уравнение может быть использовано для расчёта потерь тепла от разогретых высоковязких нефтепродуктов (мазутов) в танках и топливных цистернах судов. Получен эффект от при-

менения перегородки на высотах 4, 6 и 7 м. Регулируя высоту расположения перегородки, можно оказывать влияние на температурный режим транспортировки груза (жидкости) и поддерживать ее температуру в необходимом диапазоне.

Расчёты показали возможность и целесообразность позонного разделения грузового и воздушного пространства топливных танков для снижения потерь тепла и гибкого управления работой систем подогрева для снижения затрат на поддержание температур нефтепродуктов, что может быть предметом дальнейших исследований. В перспективе работа может быть продолжена в направлении учёта особенностей теплообмена в условиях качки. Отдельным вопросом является получение данных по качке судна. В существующих теоретических и экспериментальных работах до настоящего времени используется допущение о гармоническом законе и учитывается, как правило, только бортовая качка судна. Это не совсем совпадает с реальной ситуацией. Построение модели с динамической сеткой позволяет смоделировать движение судна на волне, в том числе учесть перелив воды через палубу, характерный для танкеров. Влияющими параметрами судна являются длина, ширина, высота борта, осадка и метацентрическая высота судна, геометрия палубы, носовой оконечности, в том числе современные обводы, применяемые при строительстве судов обеспечения нефтяных платформ и последних проектов военных кораблей, снижающих сопротивление движению судна на волнении. Среди стандартных параметров волны, таких как длина, высота, скорость движения судна относительно фронта волны и курс, должна быть учтена несимметричность, обусловленная ветровым воздействием, а в перспективе — интерференция волн.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *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. 558–560.

2. *Яковлев П. В.* Транспортировка высоковязких жидкостей с подогревом в танках наливного судна / П. В. Яковлев, Е. А. Горбанева // Вестник Астраханского государственного технического университета. Серия: Морская техника и технология. — 2015. — № 3. — С. 38–44.

3. *Яковлев П. В.* Исследование влияния конструктивных особенностей танков наливных судов на процессы тепломассобмена при перевозке высоковязких 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. 99–103.

4. *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.

5. *Моисеев В. И.* Естественная конвекция горячих нефтепродуктов при перевозках в условиях низких температур / В. И. Моисеев // Математика в вузе: труды XXII Междунар. науч.-практ. конф. — СПб.: ПГУПС, 2010. — С. 132–136.

6. *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.

7. *Яковлев П. В.* Моделирование процессов тепломассообмена при перевозке высоковязких 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.

8. Пат. 104542 Российская Федерация, МПК B 65 D 88/74. Устройство для снижения теплопотерь 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; опубл. 20.05.2011; бюл. № 14.

9. Пат. № 130595 Российская Федерация, МПК B 65 D 88/74. Устройство для снижения теплопотерь от разогретой жидкости в танках судна / П. В. Яковлев, Е. А. Горбанева, Ю. А. Аляутдинова; заявитель и патентообладатель ФГОУ ВПО АГТУ. — № 2012157889/12; заявл. 27.12.2012; опубл. 27.07.2013; бюл. № 21.

10. Пат. № 154604 Российская Федерация, МПК B 65D 88/74. Устройство для снижения теплопотерь от разогретой жидкости в танках судна / П. В. Яковлев, Е. А. Горбанева; заявитель и патентообладатель ФГОУ ВПО АГТУ. — № 2015105857/12; заявл. 19.02.2015; опубл. 27.08.2015; бюл. № 24.

REFERENCES

1. Berdina, M. Yu., and E. K. Torosyan. "Maritime transport in international business operations." *Modern problems of science and education* 1-1 (2015): 558–560.

2. Yakovlev, Pavel Viktorovich, and Evgeniya Aleksandrovna Gorbaneva. "Transportation of highly viscous liquids in the heated tankers." *Vestnik of Astrakhan State Technical University. Series: Marine Engineering and Technologies* 3 (2015): 38–44.

3. Yakovlev, Pavel Viktorovich, Yulia Amirovna Alyautdinova, and Evgeniya Aleksandrovna Gorbaneva. "Research of influence of structural features of tanks of oil tankers on the processes of heat-mass exchange at transportation of high-viscosity loads by water transport." *Vestnik of Astrakhan State Technical University. Series: Marine Engineering and Technologies* 2 (2009): 99–103.

4. Moiseev, V. I. Teorija i modeli processov teplomassoperenosa pri transportnyh operacijah s zastyvajushhimi nalivnymi gruzami. Dr. diss. SPb., 2012.

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

6. Golovchun, S. N. Modelirovanie teplomassoperenosa v sudovyh sistemah podogreva vysokovjazkih topliv i zhidkih gruzov. PhD diss. Astrahan', 2010.

7. 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.

8. 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. 20 May 2011.

9. Jakovlev, P. V, E. A. Gorbaneva, and Ju. A. Aljautdinova. RU 130 595 U1, IPC B 65 D 88/74. Ustrojstvo dlja snizhenija tep-lopoter' ot razogretoj zhidkosti v tankah sudna. Russian Federation, assignee. 27 July 2013.

10. Jakovlev, P. V., and E. A. Gorbaneva. RU 154 604 U1, IPC B 65 D 88/74. Ustrojstvo dlja snizhenija tep-lopoter' ot razogretoj zhidkosti v tankah sudna. Russian Federation, assignee. 27 Aug. 2015.

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

Горбанева Евгения Александровна — аспирант
Научный руководитель:
Яковлев Павел Викторович
ФГБОУ ВО «Астраханский государственный технический университет»
414056, Российская Федерация, Астрахань, ул. Татищева, 16
e-mail: *eugine-astra@rambler.ru*
Яковлев Павел Викторович —
доктор технических наук, профессор
ФГБОУ ВО «Астраханский государственный технический университет»
414056, Российская Федерация, Астрахань, ул. Татищева, 16
e-mail: *zvs01jak@rambler.ru*

INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Gorbaneva, Evgenia A. — Postgraduate
Supervisor:
Yakovlev, Pavel V.
Astrakhan State Technical University
16 Tatishcheva Str., Astrakhan, 414056, Russian Federation
e-mail: *eugine-astra@rambler.ru*
Yakovlev, Pavel V. —
Dr. of Technical Sciences, professor
Astrakhan State Technical University
16 Tatishcheva Str., Astrakhan, 414056, Russian Federation
e-mail: *zvs01jak@rambler.ru*

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

ВЕСТНИК
ГОСУДАРСТВЕННОГО УНИВЕРСИТЕТА
МОРСКОГО И РЕЧНОГО ФЛОТА ИМЕНИ АДМИРАЛА С. О. МАКАРОВА

DOI: 10.21821/2309-5180-2017-9-2-373-379

A STUDY OF LOAD DISTRIBUTION OF MARINE DIESEL-GENERATOR SETS IN PARALLEL OPERATION

A. A. Vinogradov

Admiral Makarov State University of Maritime and Inland Shipping,
Saint-Petersburg, Russian Federation

The article describes load balancing issues of diesel-generator units of ship power plant in accordance with the Russian Maritime Register of Shipping and taking into account the features of the dependence of the specific fuel consumption of the load of diesel generator set, used for ship power plants, containing in its composition of diesel generator sets of various power ratings by selection of the optimal combination of operating generating units for a given load electricity station, based on the values of the nominal power of the generator. The paper proposes the actual load on the bus of the main switchboard (MSB) to distribute between the parallel operating units so that the extent to which they meet the minimum load the specific fuel consumption, which is typically 75-85 % of the nominal power of DGA, or was close to such value while respecting the rules PMPS. In addition, the article describes the features of a single work of DGA of ship plants that contain generators of different power ratings, and recommendations are given to reduce the specific fuel consumption when a single work by transferring power backup DGA depending on the actual load on the bus of the main switchboard.

Keywords: nominal power, diesel generating set, specific fuel consumption, parallel operation, optimum load, ship power, fuel economy.

For citation:
Vinogradov, Andrey A. "A study of load distribution of marine diesel-generator sets in parallel operation." *Vestnik Gosudarstvennogo universiteta morskogo i rechnogo flota imeni admirala S. O. Makarova* 9.2 (2017): 373–379. DOI: 10.21821/2309-5180-2017-9-2-373-379.

УДК 621.313.322-843.6

ИССЛЕДОВАНИЕ РАСПРЕДЕЛЕНИЯ НАГРУЗКИ СУДОВЫХ ДИЗЕЛЬ-ГЕНЕРАТОРНЫХ АГРЕГАТОВ ПРИ ИХ ПАРАЛЛЕЛЬНОЙ РАБОТЕ

А. А. Виноградов

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

В статье рассмотрены вопросы распределения нагрузки дизель-генераторных агрегатов судовой электростанции в соответствии с требованиями Российского морского регистра судоходства и с учетом зависимости удельного расхода топлива от нагрузки дизель-генераторного агрегата, применяемого к судовым электростанциям, содержащих в своем составе дизель-генераторные агрегаты различных номинальных мощностей, путем подбора оптимальной комбинации работающих генераторных агрегатов для заданной нагрузки электростанции, исходя из значений номинальных мощностей генераторов. Предлагается фактическую нагрузку на шинах главного распределительного щита распределять между параллельно работающими агрегатами так, чтобы степень их загрузки соответствовала минимальному удельному расходу топлива, который, как правило, составляет 75 – 85 % от номинальной мощности дизель-генераторного агрегата, или была приближена к такому значению при соблюдении правил. Кроме того, в статье рассмотрены особенности одиночной работы дизель-генераторного агрегата судовых электростанций, содержащих генераторы различных номинальных мощностей, и приведены рекомендации по уменьшению удельного расхода топлива при их одиночной работе путем перевода мощности на резервный дизель-генераторный агрегат в зависимости от фактической нагрузки на шинах главного распределительного щита. Показано, как должна распределяться электрическая нагрузка между несколькими параллельно работающими генераторами различных номиналь-

ных мощностей или перераспределяться при одиночной работе генератора, приведены примеры современных средств автоматизации судовых электроэнергетических систем, обеспечивающих выполнение таких задач.

Ключевые слова: номинальная мощность, дизель-генераторный агрегат, удельный расход топлива, параллельная работа, оптимальная нагрузка, судовая электростанция, экономия топлива.

Для цитирования:
Виноградов А. А. Исследование распределения нагрузки судовых дизель-генераторных агрегатов при их параллельной работе / А. А. Виноградов // Вестник Государственного университета морского и речного флота имени адмирала С. О. Макарова. — 2017. — Т. 9. — № 2. — С. 373–379. DOI: 10.21821/2309-5180-2017-9-2-373-379.

Введение

При параллельной работе генераторов переменного тока в диапазоне 20 – 100 % общей нагрузки распределение нагрузки на каждый генератор должно происходить пропорционально мощностям генераторов и не должно отличаться более чем на 15 % от расчетной нагрузки большего из генераторов или на 25 % от расчетной нагрузки рассматриваемого генератора в зависимости от того, что меньше [1]. В работе проведен анализ распределения электрической нагрузки между дизель-генераторными агрегатами (ДГА) судовой электростанции (СЭС) при их параллельной и одиночной работе с учетом требований Российского морского регистра судоходства (РМРС) и особенностей зависимости удельного расхода топлива от нагрузки.

Основная часть

Рассмотрим параллельную работу двух ДГА на шины главного распределительного щита (ГРЩ) СЭС. Пусть $P_{1н}$ (кВт) — номинальная мощность ДГА, работающего на шины ГРЩ; $P_{2н}$ (кВт) — номинальная мощность ДГА, подключаемого к шинам ГРЩ; $k = P_{1н} / P_{2н}$ — отношение номинальных мощностей первого и второго генераторов; $P_{нагр}$ (кВт) — нагрузка на шинах ГРЩ. Для дальнейшего анализа предположим, что все рассматриваемые ДГА имеют одинаковые зависимости удельного расхода топлива (УРТ) от нагрузки. Оптимальный диапазон нагрузки ДГА, как правило, составляет 75 – 85 % от номинальной мощности и соответствует минимальному УРТ, вне этого диапазона нагрузок (при уменьшении или увеличении нагрузки) УРТ будет возрастать. На рис. 1 показана зависимость УРТ от относительной мощности нагрузки судового ДГА с синхронным генератором HF C6506-14E фирмы *Hyundai* и дизелем MAH-B&W марки 6L23/30H с частотой вращения 720 об/мин, которая была получена при заводских испытаниях. Вопросы, связанные с оптимизацией режимов работы судовых синхронных генераторов и оптимизацией удельного расхода топлива (УРТ) ДГА в зависимости от мощности нагрузки и коэффициента мощности, рассмотрены в работах [2] – [4].

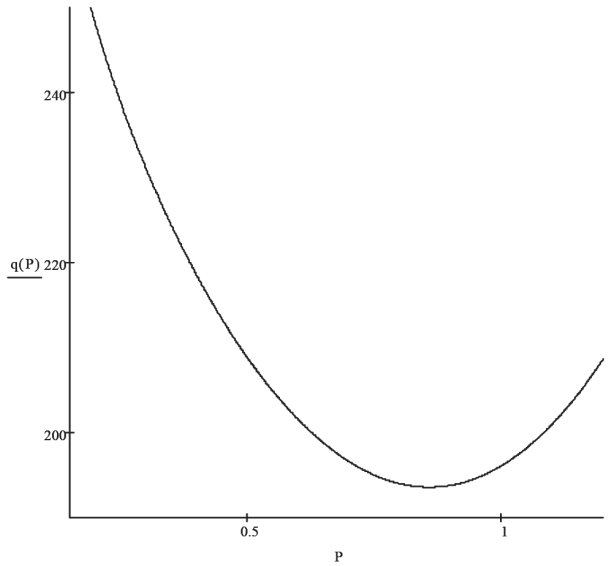


Рис. 1. Зависимость удельного расхода топлива от относительной мощности ДГА

При достижении $P_{нагр}$ предельно допустимого значения, т. е. при $P_{нагр} / P_{1н} \geq k_{уст}$, где $k_{уст}$ — установка на подачу сигнала на включение резервного ДГА (как правило, $k_{уст} = 0{,}8$), запускается резервный ДГА, подключается к шинам ГРЩ, и вся имеющаяся нагрузка $P_{нагр}$ распределяется между ДГА пропорционально их номинальным мощностям (если не предусмотрено иное).

Обозначим P_1 (кВт) — часть общей нагрузки $P_{нагр}$ первого ДГА; P_2 (кВт) — часть общей нагрузки, принятой вторым ДГА. Отношение P_1 и P_2 должно быть, согласно требованиям РМРС, таким же, как и отношение $P_{1н}$ и $P_{2н}$, т. е.

$$P_1 / P_2 = k \tag{1}$$

при

$$P_1 + P_2 = P_{\text{нагр}}. \tag{2}$$

Из (1) и (2) следует, что нагрузка двух работающих ДГА составит:

$$P_1 = \frac{k \cdot P_{\text{нагр}}}{1+k} = \frac{P_{\text{нагр}}}{1+\frac{1}{k}}; \tag{3}$$

$$P_2 = \frac{P_{\text{нагр}}}{1+k}. \tag{4}$$

При рассмотрении СЭС, состоящей из большего числа работающих на шины ГРЩ ДГА, выражения для определения принятой тем или иным ДГА нагрузки будут другими (в зависимости от числа ДГА). Так, например, для трех параллельно работающих ДГА принятая каждым из них нагрузка (мощность) при ее распределении пропорционально номинальным мощностям генераторов будет определяться следующими выражениями (*a*, *b*, *c*):

$$P_1 = P_{\text{нагр}} \cdot \frac{k_{12} \cdot k_{13}}{k_{12} + k_{13} + k_{12} \cdot k_{13}}; \tag{a}$$

$$P_2 = P_{\text{нагр}} \cdot \frac{k_{23}}{1 + k_{23} + k_{12} \cdot k_{23}}; \tag{b}$$

$$P_3 = P_{\text{нагр}} \cdot \frac{1}{1 + k_{13} + k_{23}}, \tag{c}$$

где P_1, P_2, P_3 — мощности принятые первым, вторым и третьим ДГА соответственно; $P_{\text{нагр}}$ — общая судовая электрическая нагрузка; k_{12} — отношение номинальных мощностей первого и второго ДГА; k_{13} — отношение номинальных мощностей первого и третьего ДГА; k_{23} — отношение номинальных мощностей второго и третьего ДГА.

Если номинальные мощности первого и второго ДГА одинаковы, т. е. $P_{1\text{н}} = P_{2\text{н}}$, тогда $k = 1$ и нагрузку следует распределить между ними поровну; если $P_{1\text{н}} \neq P_{2\text{н}}$, то нагрузка распределяется пропорционально мощностям ДГА и рассчитывается согласно выражениям (3) и (4), при этом степень загрузки каждого работающего ДГА будет одна и та же (так же будет загружена и СЭС). Покажем это.

Степень загрузки ДГА определяется отношением нагрузки, приходящейся на данный ДГА, к номинальной мощности ДГА:

– степень загрузки первого ДГА — $y_1 = \frac{P_1}{P_{1\text{н}}}$; (5)

– степень загрузки второго ДГА — $y_2 = \frac{P_2}{P_{2\text{н}}}$, (6)

а степень загрузки СЭС определяется отношением нагрузки на шинах ГРЩ к полной мощности СЭС (сумме номинальных мощностей обоих работающих на ГРЩ генераторов):

$$y_{12} = \frac{P_{\text{нагр}}}{P_{1\text{н}} + P_{2\text{н}}}, \tag{7}$$

так как $\frac{P_{1\text{н}}}{P_{2\text{н}}} = k$, то $P_{1\text{н}} = P_{2\text{н}} \cdot k$. (8)

Подставив в выражение (5) уравнения (3) и (8) и преобразовав его, получим

$$y_1 = \frac{P_{\text{нагр}}}{P_{1\text{н}} + P_{2\text{н}}}.$$

Подставив в выражение (6) уравнения (4) и (8) и преобразовав его, получим

$$y_2 = \frac{P_{\text{нагр}}}{P_{1\text{н}} + P_{2\text{н}}}.$$

После преобразования выражений оказалось, что правые части для y_1, y_2 и y одинаковы, следовательно, $y_1 = y_2 = y$, т. е. требования РМРС удовлетворяются.

Рассмотрим СЭС, состоящую из двух ДГА (№ 1 и 2) одинаковой мощности, например, $P_{1\text{н}} = P_{2\text{н}} = 1000$ кВт и одного ДГА (№ 3) меньшей мощности, например, $P_{3\text{н}} = 500$ кВт. К шинам ГРЩ подключен ДГА № 1 и нагрузка на шинах ГРЩ $P_{\text{нагр}} = 900$ кВт, тогда $\frac{P_{\text{нагр}}}{P_1} = 0,9 \geq 0,8$ — формируется сигнал на включение резервного ДГА (следующего по очередности включения).

Рассмотрим два варианта:

1) нагрузка распределяется между ДГА № 1 и ДГА № 2. Тогда степень загрузки СЭС, состоящей из ДГА № 1 и № 2, $y_{12} = \frac{P_{\text{нагр}}}{P_{1\text{н}} + P_{2\text{н}}} = \frac{900}{1000 + 1000} = 0,45$. Так как $P_{1\text{н}} = P_{2\text{н}}$, нагрузку следует распределить поровну между параллельно работающими генераторами $P_1 = P_2 = 450$ кВт;

2) нагрузка распределяется между ДГА № 1 и ДГА № 3. Тогда степень загрузки СЭС, состоящей из ДГА № 1 и 3, $y_{13} = \frac{P_{\text{нагр}}}{P_{1\text{н}} + P_{3\text{н}}} = \frac{900}{1000 + 500} = 0,6$; k_{13} — отношение номинальных мощностей ДГА № 1 и 3, $k_{13} = 2$. Согласно выражению (3), $P_1 = \frac{2 \cdot 900}{1 + 2} = 600$ кВт (загрузка ДГА № 1 — 0,6); согласно выражению (4), $P_3 = \frac{900}{1 + 2} = 300$ кВт (загрузка ДГА № 3 — 0,6).

Так как $y_{13} \geq y_{12}$, второй вариант решения задачи, с точки зрения эффективности расхода топлива, более приемлем, потому что при загрузке в 60 % УРТ меньше, чем при загрузке в 45 %. Несложно показать, что при подключении к шинам ГРЩ ДГА меньшей мощности, чем мощность работающего ДГА, загрузка каждого из параллельно работающих ДГА будет больше, чем если бы мощность подключаемого ДГА была больше.

Пусть $P_{1\text{н}}$, $P_{2\text{н}}$, $P_{3\text{н}}$ — номинальные мощности ДГА № 1 – 3, $P_{\text{нагр}}$ — нагрузка на шинах ГРЩ. К шинам ГРЩ подключен ДГА № 1. Известно, что $P_{2\text{н}} > P_{3\text{н}}$. Степень загрузки СЭС после подключения ДГА № 2 $\frac{P_{\text{нагр}}}{P_{1\text{н}} + P_{2\text{н}}}$, а степень загрузки СЭС после подключения ДГА № 3 $\frac{P_{\text{нагр}}}{P_{1\text{н}} + P_{3\text{н}}}$. Сравним эти значения:

$$\frac{P_{\text{нагр}}}{P_{1\text{н}} + P_{2\text{н}}} \vee \frac{P_{\text{нагр}}}{P_{1\text{н}} + P_{3\text{н}}};$$

$$\frac{1}{P_{1\text{н}} + P_{2\text{н}}} \vee \frac{1}{P_{1\text{н}} + P_{3\text{н}}};$$

$$P_{1\text{н}} + P_{3\text{н}} \vee P_{1\text{н}} + P_{2\text{н}};$$

$$P_{3\text{н}} \vee P_{2\text{н}}.$$

По условию $P_{3\text{н}} < P_{2\text{н}}$,

$$\frac{P_{\text{нагр}}}{P_{1\text{н}} + P_{2\text{н}}} < \frac{P_{\text{нагр}}}{P_{1\text{н}} + P_{3\text{н}}}.$$

Отсюда следует, что при достижении нагрузкой работающего ДГА предельно допустимого значения (или больше) для обеспечения наиболее оптимальной загрузки каждого из работающих в параллель ДГА (после подключения резервного ДГА) следует распределить нагрузку между работающим ДГА и ДГА меньшей мощности. При этом необходимо, чтобы был обеспечен резерв мощности (20 %).

Ранее был рассмотрен вариант, когда электрическая нагрузка на шины ГРЩ возрастала, и возникала необходимость введения в работу резервного ДГА (или замены работающего ДГА на ДГА большей мощности) и перераспределения нагрузки. Проанализируем другой случай: когда нагрузка уменьшается, предположим, по мере отключения судовых приемников электроэнергии. Здесь возможны следующие варианты:

1. Когда работает один ДГА и по мере снижения нагрузки (при наличие резервных ДГА мощностей меньших, чем у работающего), запускается ДГА меньшей мощности, подключается к шинам ГРЩ, принимая на себя всю нагрузку, а ДГА большей мощности выводится из системы (при условии обеспечения резерва мощности в 20 %). Так обеспечится большая степень загрузки СЭС. Условием формирования сигнала для осуществления такой операции должно быть снижение нагрузки до величины, составляющей 60 – 75 % от номинальной мощности ДГА меньшей мощности в течение некоторого промежутка времени.

2. Когда работают в параллель два (и более) ДГА и снижение нагрузки приводит к снижению степени загрузки ДГА, т. е. увеличению УРТ, а отключение одного из параллельно работающих ДГА невозможно, так как это приведет к нехватке мощности. При наличии среди резервных дизель-генераторных агрегатов ДГА меньшей мощности (по сравнению с работающими в параллель), запускается и вводится в параллель такой генератор, а один из ранее работающих ДГА выводится из работы (при всем этом должен быть обеспечен резерв мощности в 20 %). Тем самым величина неиспользуемой мощности СЭС уменьшится и степень загрузки ДГА возрастет. Вопросы, связанные с особенностями управления ДГА судовой электростанции по резервной мощности, рассмотрены в работе [4].

Современные средства автоматизации позволяют решить задачу оптимизации работы судовой электростанции по топливу. Программа оптимизации расхода топлива таких средств обеспечивает автоматический выбор оптимальной комбинации работающих генераторных агрегатов для любой заданной нагрузки, исходя из значений номинальных мощностей генераторов. В качестве примера таких средств автоматизации может быть рассмотрена микропроцессорная система управления DELOMATIC [6], [7], [9], [10], предназначенная для автоматического управления электростанцией, имеющей в своём составе максимально 8 ДГ, или система управления электростанцией PPM-300 [5], [7], [8], содержащая широкий набор функций, необходимый для управления электроустановками морского базирования, и ряд других. Команды на «пуск / остановку» генераторов такими системами формируются на основе расчетов необходимого количества генераторов для поддержания на шинах ГРЩ требуемой мощности. Расчет значения мощности для «пуска / остановки» генераторов основывается на заданных оператором установках запуска и отключения ДГ. В таких системах предусмотрен автоматический выбор оптимальной комбинации ДГА, обеспечивающий минимизацию расхода топлива с учетом значений номинальных мощностей генераторов и фактической электрической нагрузки на шинах ГРЩ.

Заключение

Принимая во внимание особенности зависимости УРТ от нагрузки (мощности) ДГА, следует стремиться нагружать дизель-генераторные агрегаты (при одиночной работе или работе в параллель) в пределах оптимальных нагрузок (75 – 85 %), соответствующих минимальному удельному расходу топлива. В статье рассмотрен вопрос оптимизации расхода топлива параллельно работающих ДГА за счет минимизации неиспользуемой (резервной) мощности, но в пределах допустимого (не ниже 20 %), путем подбора оптимальной комбинации ДГА, работающих на шины ГРЩ для судовых электростанций, содержащих ДГА различных номинальных мощностей.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Правила классификации и постройки морских судов. — СПб.: РМРС, 2015. — 807 с.

2. *Кузнецов С. Е.* Потери и коэффициент полезного действия судового синхронного генератора / С. Е. Кузнецов // Эксплуатация морского транспорта. — 2009. — № 3. — С. 67–71.

3. *Кузнецов С. Е.* Влияние нагрузки и коэффициента мощности на коэффициент полезного действия судового синхронного генератора // С. Е. Кузнецов, Ю. В. Кудрявцев // Судостроение. — 2011. — № 5. — С. 29–32.

4. *Кузнецов С. Е.* Влияние нагрузки и коэффициента мощности на расход топлива судового дизель генераторного агрегата // С. Е. Кузнецов, Ю. В. Кудрявцев // Судостроение. — 2011. — № 6. — С. 30–32.

5. *Алексеев Н. А.* Особенности выбора способа управления резервными агрегатами судовой электростанции в зависимости от нагрузки на шинах главного распределительного щита / Н. А. Алексеев, А. А. Виноградов // Сборник научных трудов профессорско-преподавательского состава Государственного университета морского и речного флота имени адмирала С. О. Макарова. — СПб.: Изд-во ГУМРФ им. адм. С. О. Макарова, 2016. — С. 7–13.

6. *Алексеев Н. А.* PPM 300 — новая платформа комплектации систем автоматизации судовых электростанций / Н. А. Алексеев, А. А. Виноградов, Г. М. Ростиславин // Сборник научных трудов профессорско-преподавательского состава Государственного университета морского и речного флота имени адмирала С. О. Макарова. — СПб.: Изд-во ГУМРФ им. адм. С. О. Макарова, 2016. — С. 14–20.

7. *Алексеев Н. А.* Контроллеры DEIF. Защита автономного генератора, работающего параллельно с сетью / Н. А. Алексеев, Г. М. Ростиславин // Новости электротехники. — 2006. — № 2 (38). — С. 40–42.

8. *Алексеев Н. А.* Некоторые аспекты обеспечения параллельной работы автономного генератора с сетью большой мощности / Н. А. Алексеев, А. Н. Дуксин, Г. М. Ростиславин // Тезисы докладов научно-технической конференции ППС, науч. сотрудников и курсантов. — СПб.: ГМА им. адм. С. О. Макарова, 2006. — С. 161–164.

9. *Алексеев Н. А.* Контроль, защита и управления подключением к береговой сети в системе DELOMATIC фирмы DEIF / Н. А. Алексеев, А. Н. Дуксин // Тезисы докладов научно-технической конференции ППС, научных сотрудников и курсантов. — СПб.: ГМА им. адм. С. О. Макарова, 2006. — С. 168–169.

10. *Алексеев Н. А.* Особенности синхронизации судовых генераторов в микропроцессорной системе DELOMATIC / Н. А. Алексеев, А. Н. Дуксин // Тезисы докладов научно-технической конференции ППС, научных сотрудников и курсантов. — СПб.: ГМА им. адм. С. О. Макарова, 2008. — С. 193–196.

REFERENCES

1. *Pravila klassifikatsii i postroiki morskikh sudov.* SPb.: RMRS, 2015.

2. Kuznetsov, S. E. “Poteri i koeffitsient poleznogo deistviya sudovogo sinkhronnogo generator.” *Ekspluatatsiya morskogo transporta* 3 (2009): 67–71.

3. Kuznetsov, S. E., and Yu. V. Kudryavtsev. “Influence of load and power factor on marine synchronous generator efficiency.” *Shipbuilding* 5 (2011): 29–32.

4. Kuznetsov, S. E., and Yu. V. Kudryavtsev. “Effect of load and power factor on fuel consumption of marine diesel generator set.” *Shipbuilding* 6 (2011): 30–32.

5. Alekseev, N. A., and A. A. Vinogradov. “Features choice of control method of backup power units ship depending on the load on the tires main switchboard.” *Sbornik nauchnykh trudov professorsko-prepodavatel’skogo sostava Gosudarstvennogo universiteta morskogo i rechnogo flota imeni admirala S.O. Makarova*. SPb.: Federal’noe gosudarstvennoe byudzhetnoe obrazovatel’noe uchrezhdenie vysshego obrazovaniya Gosudarstvennyi universitet morskogo i rechnogo flota im. admirala S.O. Makarova, 2016. 7–13.

6. Alekseev, N. A., A. A. Vinogradov, and G. M. Rostislavin. “PPM 300 — a new platform of complectation of ship power systems automation.” *Sbornik nauchnykh trudov professorsko-prepodavatel’skogo sostava Gosudarstvennogo universiteta morskogo i rechnogo flota imeni admirala S.O. Makarova*. SPb.: Federal’noe gosudarstvennoe byudzhetnoe obrazovatel’noe uchrezhdenie vysshego obrazovaniya Gosudarstvennyi universitet morskogo i rechnogo flota im. admirala S.O. Makarova, 2016. 14–20.

7. Alekseev, N. A., and G.M. Rostislavin. “Kontrollery DEIF. Zashchita avtonomnogo generatora, rabotayushchego paral-lel’no s set’yu.” *Novosti elektrotekhniki* 2(38) (2006): 40–42.

8. Alekseev, N. A., A. N. Duksin, and G. M. Rostislavin. "Nekotorye aspekty obespecheniya parallel'noi raboty avtonomnogo gene-ratora s set'yu bol'shoi moshchnosti." *Tezisy dokladov. Nauchno-tekhnicheskaya konferentsiya PPS, nauchnykh sotrudnikov i kursantov.* SPb.: GMA im. adm. S.O. Makarova, 2006. 161–164.

9. Alekseev, N. A., and A. N. Duksin. "Kontrol', zashchita i upravleniya podklyucheniem k beregovoi seti v sisteme DELOMATIC firmy DEIF." *Tezisy dokladov. Nauchno-tekhnicheskaya konferentsiya PPS, nauchnykh sotrudnikov i kursantov.* SPb.: GMA im. adm. S.O. Makarova, 2006. 168–169.

10. Alekseev, N. A., and A. N. Duksin. "Osobennosti sinkhronizatsii sudovykh generatorov v mikroprotsessornoi sisteme DELOMATIC." *Tezisy dokladov. Nauchno-tekhnicheskaya konferentsiya PPS, nauchnykh sotrudnikov i kursantov.* SPb.: GMA im. adm. S.O. Makarova, 2008. 193–196.

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРЕ

Виноградов Андрей Александрович —
доцент
ФГБОУ ВО «ГУМРФ имени
адмирала С.О. Макарова»
198035, Российская Федерация, Санкт-Петербург,
ул. Двинская, 5/7
e-mail: *Eric_esseker@mail.ru*

INFORMATION ABOUT THE AUTHOR

Vinogradov, Andrey A. —
associate professor
Admiral Makarov State University
of Maritime and Inland Shipping
5/7 Dvinskaya Str., St. Petersburg, 198035,
Russian Federation
e-mail: *Eric_esseker@mail.ru*

Статья поступила в редакцию 1 марта 2017 г.
Received: March 1, 2017.

ВЕСТНИК
ГОСУДАРСТВЕННОГО УНИВЕРСИТЕТА
МОРСКОГО И РЕЧНОГО ФЛОТА ИМЕНИ АДМИРАЛА С. О. МАКАРОВА

ЭЛЕКТРОТЕХНИЧЕСКИЕ КОМПЛЕКСЫ И СИСТЕМЫ

DOI: 10.21821/2309-5180-2017-9-2-380-389

COMPARATIVE ANALYSIS OF THE POTENTIAL INFORMATIVE CAPACITY OF COASTAL AND SHIP RADAR STATIONS

N. T. Nichiporenko, B. N. Sivachenko

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

Comparative analysis of the potential information capacity ashore and aboard ships radar stations.

The wide application of radar stations as information sensors in the navigation safety system poses the task of optimally matching the received information from the radar (radar) with the channels of transmission, processing and storage of information in digital computers and specialized digital processor systems Processing and display, which necessitates a quantitative assessment of the information capacity of radars.

Similar problems must be solved when translating information from posts to the center of ship traffic control systems (VTS), when creating documentation devices, etc. To evaluate the potential informative capacity of each radar, the choice of methods from the information theory available in the theory for quantitative evaluation is justified. At the stage of detection and reception of signals, structural and statistical methods for estimating the amount of information are justified. At the stage of processing, transformation, mapping and registration of signals, estimates of the amount of information based on Kolmogorov's method are justified. When determining the influence of the received information for the consumer on obtaining the final result, it is proposed to apply semantic methods for estimating the amount of information. Formulas for calculating the potential information capacity of radars, taking into account their technical parameters and operational characteristics, are obtained and quantitative results are presented in Table 1. These data confirm that ship and shore stations with the best resolution in range and angle have the ability to extract from Surrounding environment more information. The analysis showed that the radar with probing pulses at higher frequencies have better accuracy characteristics and greater potential information Other things being equal.

Comparative analysis showed that with a minimum pulse length, the potential information capacity of radars is proportional to the frequency to the power of 11/4, i.e. Increases with a decrease in the wavelength of the probe pulse, approximately proportional to f 3. The potential informativity of radars in the millimeter wave band (K-band) is an order of magnitude higher than in the centimeter band(X-band) and three orders of magnitude higher than the radar of the decimeter band(S-band), etc. The quantitative estimate of the potential informativity Different ship and coastal radars makes it possible to carry out their optimal choice for solving specific radar problems.

Keywords: radar station, coastal and ship radar, potential informativeness of the radar, the amount of information, the pulse width, the milimeter range(K-band), the centimeter range(X-band), the decimeter range(S-band), the comparative analysis, the potential information content of the various radars.

For citation:
Nichiporenko, Nikolay T., and Boris N. Sivachenko. "Comparative analysis of the potential informative capacity of coastal and ship radar stations." *Vestnik Gosudarstvennogo universiteta morskogo i rechnogo flota imeni admirala S.O. Makarova* 9.2 (2017): 380–389. DOI: 10.21821/2309-5180-2017-9-2-380-389.

УДК 621.396

СРАВНИТЕЛЬНЫЙ АНАЛИЗ ПОТЕНЦИАЛЬНОЙ ИНФОРМАЦИОННОЙ ЁМКОСТИ БЕРЕГОВЫХ И СУДОВЫХ РАДИОЛОКАЦИОННЫХ СТАНЦИЙ

Н. Т. Ничипоренко, Б. Н. Сиваченко

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

Широкое применение радиолокационных станций в качестве датчиков информации в системах обеспечения безопасности судовождения ставит задачу оптимального согласования получаемой информации

от радиолокационной станции (РЛС) с каналами передачи, обработки и хранения информации в цифровых вычислительных машинах и специализированных цифровых процессорах систем обработки и отображения, что вызывает необходимость количественной оценки информационной емкости радаров.

Аналогичные задачи необходимо решать при трансляции информации из постов в центр систем управления движением судов (СУДС), при создании устройств документирования и др. Для оценки потенциальной информативной ёмкости каждого радара обоснован выбор методов из существующих в теории информации для количественной её оценки. На этапе обнаружения и приёма сигналов обоснованы структурный и статистический методы оценки количества информации. На этапе обработки, преобразования, отображения и регистрации сигналов обоснованы оценки количества информации по методике Колмогорова. При определении влияния принятой информации для потребителя на получение конечного результата предлагается применять семантические методы оценки количества информации. Получены формулы для вычисления потенциальной информационной ёмкости радиолокаторов с учётом их технических параметров и эксплуатационных характеристик, а также представлены количественные результаты. Полученные данные свидетельствуют о том, что судовые и береговые станции с лучшим разрешением по дальности и углу позволяют извлечь из окружающей обстановки большее количество информации. Анализ показал, что РЛС с зондирующими импульсами на более высоких частотах имеют лучшие точностные характеристики и большую потенциальную информативную ёмкость при прочих равных условиях.

Сравнительный анализ показал, что при минимальной длительности импульса потенциальная информационная ёмкость радаров пропорциональна частоте в степени 11/4, т. е. возрастает при уменьшении длины волны зондирующего импульса примерно пропорционально f^3. Потенциальная информативность радиолокаторов миллиметрового диапазона волн на порядок-два выше сантиметрового диапазона и на три порядка выше, чем радары дециметрового диапазона и др. Полученная количественная оценка потенциальной информативности разных судовых и береговых радаров позволяет осуществлять их оптимальный выбор для решения конкретных задач радиолокации.

Ключевые слова: радиолокационная станция, береговая и судовая РЛС, потенциальная информативность РЛС, количество информации, длительность импульса, миллиметровый диапазон, сантиметровый диапазон, дециметровый диапазон, сравнительный анализ, потенциальная информативность различных РЛС.

Для цитирования:

Ничипоренко Н. Т. Сравнительный анализ потенциальной информационной ёмкости береговых и судовых радиолокационных станций / Н. Т. Ничипоренко, Б. Н. Сиваченко // Вестник Государственного университета морского и речного флота имени адмирала С. О. Макарова. — 2017. — Т. 9. — № 2. — С. 380–389. DOI: 10.21821/2309-5180-2017-9-2-380-389.

Введение

Широкое применение радиолокационных станций в качестве датчиков информации в системах обеспечения безопасности судовождения ставит задачу оптимального согласования получаемой информации от радиолокационных станций (РЛС) с каналами передачи, обработки и хранения информации в цифровых вычислительных машинах и специализированных цифровых процессорах систем обработки и отображения, что вызывает необходимость количественной оценки информационной емкости береговых и судовых РЛС. При использовании удалённых постов в системах управления движением судов (СУДС) на протяженных фарватерах важной проблемой является обеспечение трансляции радиолокационной информации по каналам связи в единый диспетчерский центр. Понятно, что можно создать оптимальные системы передачи при количественной оценке передаваемой информации от каждого поста УДС. Подобная проблема возникает также при создании канала передачи радиолокационной информации с экранов постов УДС непосредственно на суда, находящиеся в зоне их обслуживания с целью повышения надежности проводки. Оптимальное документирование данных в виде радиолокационного изображения о процессе управления судами на акваториях портов при проводке по каналам и фарватерам, особенно в случае возникновения аварий и аварийных случаев, важно и необходимо.

Решение указанных и других задач является затруднительным без количественной оценки информативности судовых и береговых РЛС различных диапазонов. Под потенциальной информативностью $C_{\text{п}}$ судовых и береговых РЛС будем понимать максимально количество информации, которое может выдать (извлечь) РЛС с учетом ее эксплуатационных характеристик и технических

параметров в условиях свободного пространства (без учета влияния различных метеорологических факторов, подстилающей поверхности, влияния оконечного устройства отображения информации и шумов).

Радиолокация включает в себя ряд различных процессов: генерацию СВЧ-сигналов и создание методов зондирования пространства, обнаружение отражённых сигналов и оптимальная обработка, оценку параметров положения и движения объектов, обработку информации с помощью ЭВМ и процессоров, отображение информации в оконечных устройствах. При этом необходим разный подход к количественной информативной оценке этих процессов. Краткий обзор основных теоретико-информативных представлений позволяет выбрать наиболее адекватный исследуемым процессам метод количественной оценки информации.

В теории информации существуют следующие направления: структурное, статистическое, семантическое и по Колмогорову [1]. *Структурная теория* рассматривает дискретное строение массивов информации [2], [3]. Количественная оценка определяется путем подсчета количества элементов, связей между ними или комбинаций из них. *Статистическая теория* использует вероятностный подход к определению количества информации [4]. Информация рассматривается как сообщение об исходе случайных событий, реализация случайных величин и функций. Количество информации ставится в зависимость от соотношения вероятностей данного события после поступления информации и до ее получения. Статистическая теория оперирует понятием энтропии как меры неопределенности, учитывающей информативность сообщений. *Семантическая теория* информации, определяемая содержанием и смыслом информации, учитывает целесообразность, ценность и полезность информации [5]. Понятие *ценность информации* связано с влиянием, которое оказывает полученная информация на успешность осуществления цели, ради достижения которой эта информация получается и перерабатывается.

В работе [6] предложен более общий подход к оценке суммарного (предельного) количества информации как суммы количества информации по дальности, скорости, азимуту и углу места. Рассмотрим более детально сущность этих направлений. В работах [9] и [10] словосочетаниям «цифровые информационные потоки» и «сравнительная оценка информативности судовой РЛС / САРП в режимах радиолокационного измерения и Overlay» не даётся необходимая количественная оценка информации.

Основная часть

В структурной теории различают геометрическую, комбинаторную и аддитивную меры информации.

Геометрический метод измерения количества информации заключается в определении длины, площади или объема геометрической модели информационного канала в количестве дискретных единиц (квантов).

Пусть сообщение занимает объем по координатным осям x, y, z. Если дискретные отсчеты по осям соответствуют интервалам Δx, Δy, Δz, то количество информационных квантов по осям составляет:

$$n_x = \frac{x}{\Delta x};\ n_y = \frac{y}{\Delta y};\ n_z = \frac{z}{\Delta z}. \quad (1)$$

Тогда количество информационных квантов в полном объеме

$$N = n_x n_y n_z. \quad (2)$$

Количество информации при применении комбинаторной меры вычисляется как количество комбинаций элементов с учетом разнообразия их связей и позиций. Этот метод нашел широкое применение при кодировании информации в системах передачи информации.

Статистические меры информации учитывают вероятностную зависимость наступления различных событий и оперирует статистическим множеством. Согласно мере Шеннона, при ве-

роятностном подходе информация рассматривается как сообщение об исходе случайных событий. Из теорем 10 и 16 [4] вытекает основное соотношение статистической теории информации:

$$J(x) = H(x) - H\left(\frac{x}{x_y}\right), \tag{3}$$

где $J(x)$ — количество передаваемой информации по каналу связи при наличии помех;

$H(x)$ — энтропия передаваемого сообщения;

$H\left(\frac{x}{x_y}\right)$ — энтропия шума, условная энтропия.

Используя выражение (3), определим количество информации:

$$J_{\text{РЛС}} = H_{\text{апр}} - H_{\text{апост}}. \tag{4}$$

Здесь $H_{\text{апр}}$ — энтропия информации о наличии цели в зоне обзора РЛС до обнаружения (априорная информация);

$H_{\text{апост}}$ — энтропия информации после радиолокационного наблюдения (апостериорная информация);

$$H_{\text{апр}} = -\int_D \int_\varphi P(D,\varphi) \cdot \log_2 P(D,\varphi) \cdot \mathrm{d}D \cdot \mathrm{d}\varphi, \tag{5}$$

где $P(D, \varphi)$ — плотность распределения вероятности появления целей в зоне обзора РЛС;

$$H_{\text{апост}} = -\int_D \int_\varphi P(\delta D,\delta\varphi) \cdot \log_2 P(\delta D,\delta\varphi) \cdot \mathrm{d}(\delta D) \cdot \mathrm{d}(\delta\varphi), \tag{6}$$

где $P(\delta D, \delta\varphi)$ — плотность вероятностей распределения погрешностей измерения дальности и азимутального положения целей.

Использование в качестве информационного критерия количества информации при независимости следующих друг за другом измерений дает статистическую оценку. Динамическую характеристику системы можно оценить с учетом скорости передачи информации:

$$R_{\lim\limits_{T\to\infty}} = \frac{J}{T}. \tag{7}$$

Наибольшая скорость передачи информации характеризует пропускную способность радиолокационного канала за время одного обзора:

$$C = R_{\max} = \frac{J}{T_{\text{обз}}}, \tag{8}$$

где $T_{\text{обз}}$ — время одного обзора пространства.

Количественная мера Шеннона абстрагирует от смыслового содержания информации. Это позволяет получать обобщенные характеристики по загрузке каналов при передаче радиолокационной информации, каналов преобразования информации цифровой вычислительной машине, оценке объема памяти и т. д.

Шенноновская теория информации рассматривает только неотрицательные величины энтропий и количество информации, поэтому не может описать важный случай поступления дезинформации. Колмогоровская мера информации [8] уточняет понятие энтропии и количества информации без привлечения теоретико-вероятностного подхода применительно к индивидуальным объектам, а не к множеству объектов и явлений.

Построение меры Колмогорова основано на таких фундаментальных понятиях, как алгоритм, вычислимая функция, машина Тьюринга и др. А. Н. Колмогоровым показано, что

$$J(x,y) = H(x) - H\left(\frac{x}{y}\right), \tag{9}$$

где $J(x, y)$ — количество информации в индивидуальном объекте y относительно индивидуального объекта x;

$H(x)$ — алгоритмическая энтропия объекта x;

$H\left(\frac{x}{y}\right)$ — условная алгоритмическая энтропия.

Кроме того, показано, что $J(x; x) \approx H(x)$, т. е. количество информации, необходимой для восстановления данного объекта x, совпадает с его алгоритмической энтропией. Количество информации определяется как минимальная длина программы (сложность), позволяющая однозначно преобразовывать один объект в другой. Сложность программы определяется степенью различия объектов. Чем большая степень различия объектов, тем больше требуется команд при реализации программы для преобразования одного объекта в другой.

Предложенный А. Н. Колмогоровым алгоритмический подход к построению информационной меры открывает новые возможности, определяя количество информации в одном индивидуальном объекте относительно другого. Применительно к радиолокационным системам этот метод оценки информативности необходимо и целесообразно использовать при оценке отображения вторичной информации на экранах РЛС и САРП. Речь идет о том, что с помощью процессоров вычисляются определенные величины, которые должны однозначно и детерминировано представляться на экранах и дисплеях.

В различных областях науки и техники, включая радиолокацию, необходимо учитывать также ценность информации, что характерно для семантической меры информации [5]. Под потенциальной информативностью РЛС будем понимать максимальное количество информации, которое может выдать (извлечь) РЛС с учетом ее эксплуатационных характеристик и технических параметров в условиях свободного пространства (без учета влияния различных метеофакторов, подстилающей поверхности, влияния конечного устройства отображения информации и шумов). Исходя из выбранной ранее структурной оценки, количество информации соответствует количеству пространственных ячеек и определяется по формуле

$$n = N_D N_\varphi = \frac{D_{\max} - D_{\min}}{\Delta D_0} \cdot \frac{\varphi}{\Delta\varphi_0}, \tag{10}$$

где $D_{\max}, D_{\min}$ — соответственно максимальная и минимальная дальность обнаружения;

φ — угол обзора РЛС в горизонтальной плоскости;

$\Delta D_0, \Delta\varphi_0$ — разрешение РЛС по дальности и углу соответственно.

Так как $D_{\max} >> D_{\min}$, можно с некоторым приближением принять, что $D_{\max} - D_{\min} \approx D_{\max}$. В случае аппроксимации диаграммы направленности антенны (ДНА) гауссовой кривой имеем

$$\Delta\varphi = 0{,}7\alpha, \tag{11}$$

где α — ширина ДНА в горизонтальной плоскости.

Количество дискретных элементов n, наблюдаемых при круговом обзоре, определяется выражением

$$n = \frac{D_{\max}}{\Delta D_0} \cdot \frac{2\pi}{\Delta\varphi} = \frac{D_{\max}}{\frac{c\tau}{2}} \cdot \frac{2\pi \cdot 57{,}3^\circ}{0{,}7\alpha}, \tag{12}$$

где $\Delta D_0 = \frac{c\tau}{2}$ — потенциальное разрешение РЛС по дальности;

c — скорость распространения радиоволн;

τ — длительность зондирующего импульса и $\Delta D_0 = 150\ \tau_{\text{мкс}}$.

$$n = 3{,}43\frac{D_{\max}}{\tau\alpha}. \tag{13}$$

В оконечных устройствах судовых РЛС фиксируется одно из двух условий: в данной ячейке пространства имеется или отсутствует отраженный сигнал от цели, т. е. сумма условий обнаружения $m = 2$. Общее количество возможных комбинаций всего множества состояний равно m^n.

Количество информации равно энтропии исходного множества:

$$J = \log_2 m^n = n, \tag{14}$$

т. е. при бинарном обнаружении количество информации в идеальном случае не превосходит число элементарных ячеек пространства в зоне обзора.

Динамическую оценку количества информации РЛС можно получить с учетом скорости передачи информации. Согласно выражениям (10) и (11), наибольшая скорость передачи информации характеризует пропускную способность радиолокационной системы:

$$\mathrm{C}_{\text{п}} = \frac{J}{T_{\text{а}}}, \tag{15}$$

где $T_{\text{а}} = \dfrac{60}{N}$ — время одного оборота антенны;

N — скорость вращения антенны (об/мин), $N = 20$.

Подставив в выражение (15) значения из выражений (13) и (14), получим

$$C_{\text{п.дв.ед}} = 1{,}14\frac{D_{\max}}{\tau\alpha}. \tag{16}$$

Для условий свободного пространства максимальную дальность судовой РЛС можно определить из основного уравнения радиолокации [7]:

$$D_{\max} = \left(\frac{P_{\text{и}}\sigma\lambda^2\eta^2G^2}{(4\pi)^3P_{\text{пр min}}}\right)^{1/4}, \tag{17}$$

где $D_{\max}$ — максимальная дальность обнаружения объекта с эффективной поверхностью рассеивания в свободном пространстве;

$P_{\text{и}}$ — импульсная мощность СВЧ-генератора;

G — КПД антенного устройства;

λ — длина волны зондирующего импульса;

η — КПД антенно-волноводного тракта;

σ — эффективная поверхность рассеивания объекта;

$P_{\text{пр min}}$ — минимальная чувствительность приемника.

Преобразуем выражение (17) с учетом значения G:

$$G = \frac{4\pi}{\alpha\theta} = \frac{4\pi(57{,}3)^2}{\alpha\theta}, \tag{18}$$

где θ, α — ширина ДНА, соответственно, в вертикальной и горизонтальной плоскости в град.

С учетом выражения (18) формула (17) запишется в виде

$$D_{\max} = \left(\frac{P_{\text{и}}\eta^2}{P_{\text{пр min}}}\right)^{1/4}\cdot\left(\frac{\lambda\cdot 4\pi(57{,}3)^2}{\alpha\theta}\right)^{1/2}\cdot\left(\frac{\bar{\sigma}}{(4\pi)^3}\right)^{1/4}. \tag{19}$$

Подставив полученное значение в выражение (16), после преобразования получим

$$C_{\text{п.дв.ед}} = 34{,}3\left(P_{\text{и}}\eta^2\right)^{\frac{1}{4}}P_{\text{пр min}}^{-\frac{1}{4}}\lambda^{\frac{1}{2}}\alpha^{-\frac{3}{2}}\theta^{-\frac{1}{2}}\tau^{-1}\bar{\sigma}^{\frac{1}{4}}. \tag{20}$$

Формула (20) позволяет определить потенциальную информационную емкость РЛС через ее технические параметры и эксплуатационные характеристики, а также эффективную поверхность рассеивания объекта. Потенциальная информативная емкость судовой РЛС является ее важной

комплексной характеристикой. Она показывает технический уровень системы с точки зрения способности РЛС выдать (извлечь) максимальное количество информации об окружающей обстановке.

Выражение (20) позволяет получить непосредственную связь информационной емкости с ее точностными характеристиками. Чем короче длительность импульса τ и уже диаграмма направленности РЛС в горизонтальной и вертикальной плоскости, тем больше потенциальная информационная емкость РЛС и выше точность измерений.

Представляет интерес получение зависимости между потенциальной информативностью РЛС и такими важнейшими точностными характеристиками, как среднеквадратичные потенциальные погрешности измерения дальности $\delta_{D_п}$ и углового положения $\delta_{\varphi_п}$. Известно, что величины $\delta_{\varphi_п}$ и $\delta_{D_п}$ связаны с разрешающей способностью по дальности ΔD_0 и шириной диаграммы направленности антенны в горизонтальной плоскости следующими соотношениями [7]:

$$\delta_{\varphi_п} = \frac{\alpha}{\sqrt{\pi q}}; \quad \delta_{D_п} = \frac{c\tau}{2\sqrt{\pi q}}, \tag{21}$$

где $q = \frac{P_с}{P_ш}$ — отношение мощности сигнала к мощности шума на выходе приемного устройства.

Преобразовав выражение (20) с учетом (21), получим

$$C_п = \frac{17,2}{\delta_{D_п}(\delta_{\varphi_п})^{3/2}} \cdot \left(\frac{P_ц \eta^2}{P_{пр\ min}}\right)^{1/4} \cdot \lambda^{3/2} \theta^{-1/2} f \overline{\sigma}^{1/4}. \tag{22}$$

Сравнивая РЛС одного диапазона, можно определить, что радар, у которого потенциальная информативность больше, имеет лучшие точностные характеристики при прочих равных параметрах. Из выражения (22) также следует, что РЛС с зондирующими импульсами на более высоких частотах имеют лучшие точностные характеристики и большую потенциальную информативную емкость. На этих частотах существует техническая возможность создания лучшей разрешающей способности по углу и дальности. Естественно, представляет большой практический интерес оценка и сравнение потенциальной информационной емкости существующих отечественных и зарубежных судовых РЛС, приведенных в следующей таблице.

Анализ потенциальной емкости береговых и судовых РЛС

Технические параметры	«Балтика-Б»	«Нева-Б»	МР-2ПВ	JRC (JMA (922-6XA)	Океан-М	Океан-М	Наяда-5	Орион-М
Длина волны, см	0,9	0,9	0,9	3,2	3,2	10	3,2	0,815
Шкала, мили	0,125-24	0,125-24	0,125-24	0,125-96	0,5/4/8/16/32/64	0,5/4/8/16/32/64	0,5/4/8/16/32/64	0,125-32
N, об/мин	10/20	10/20	10/20	26	16	16	16	16
$P_и$, кВт	12	15	12	25	50	50	20	50
$P_{пр.min}$, Вт	$3\cdot10^{-13}$	$3\cdot10^{-13}$	$3\cdot10^{-13}$	$3\cdot10^{-11}$	$2\cdot10^{-12}$	$2\cdot10^{-12}$	$2\cdot10^{-12}$	$2\cdot10^{-11}$
η	0,95	0,95	0,95	0,95	0,95	0,95	0,95	0,95
θ, град	20	20	20	20	20	20	20	20
α, град	0,35	0,23	0,4	1,2	0,7	2,3	0,7	0,25
δ, м^2	155140	155140	155140	12265	12265	1256	12265	189188
$\tau_и$, мкс	0,05/0,25/0,6	0,03/0,2/0,6	0,05/0,2/0,6	0,07/0,1/15/0,2/0,3/0,6/1,2	0,11/0,2/0,4/0,8	0,1/0,2/0,4/0,8	0,25/0,7	0,05
$C_{п.дв.ед.}$, бит/с	$44,7\cdot10^9$	$1,4\cdot10^{10}$	$3,8\cdot10^9$	$4,9\cdot10^8$	$1,2\cdot10^8$	$6,7\cdot10^7$	$6,5\cdot10^8$	$1,7\cdot10^9$
	$91,4\cdot10^{10}$	$2,1\cdot10^9$	$9,6\cdot10^8$	$3,5\cdot10^8$	$6,4\cdot10^8$	$3,4\cdot10^7$	$2,3\cdot10^8$	–
	$32,1\cdot10^9$	$6,9\cdot10^8$	$3,2\cdot10^8$	$2,3\cdot10^8$	$3,2\cdot10^8$	$1,7\cdot10^7$	–	–
	–	–	–	$1,7\cdot10^8$	$1,6\cdot10^8$	$8,4\cdot10^6$	–	–

Анализ потенциальной емкости существующих судовых РЛС по результатам, представленным в таблице, позволяет сделать следующие выводы:

– потенциальная информативность конкретной РЛС зависит от длительности импульсов $\tau_и$ и при прочих равных условиях. Например, потенциальная емкость РЛС «Нева-Б» миллиметрового диапазона изменяется от значения $C_п = 1{,}4 \cdot 10^{10}$ дв. ед. при $\tau_и = 0{,}03$ мкс до $C_п = 6{,}9 \cdot 10^8$ дв. ед. при $\tau_и = 0{,}6$ мкс;

– потенциальная информативность РЛС-миллиметрового диапазона волн на один-два порядка выше сантиметрового диапазона и на три порядка выше, чем РЛС-дециметрового диапазона.

Полученные выражения (20) и (22) не позволяют непосредственно получить потенциальную информационную емкость РЛС в зависимости от частоты, так как длина волны в явном или неявном виде входит в целый ряд параметров. Для того чтобы получить такую возможность, выполним дальнейшие преобразования.

Известно, что $P_{\text{пр min}}$ определяется согласно выражению

$$P_{\text{пр min}} = KT_0 N_ш m\Delta f, \tag{23}$$

где K — постоянная Больцмана, $K = 1{,}38 \cdot 10^{-23}\left(\frac{D}{K}\right)$;

T_0 — температура антенны, которую принимают равной 290 К [$KT_0 = 4 \cdot 10^{-21}$ Вт · с];

$N_ш$ — коэффициент шума приемного устройства;

m — коэффициент различимости (для судовых *РЛС* $m = 3$);

Δf — полоса пропускания приемного устройства.

Для РЛС с прямоугольной формой зондирующего импульса

$$\Delta f = \frac{1 \ldots 1{,}37}{\tau_и}. \tag{24}$$

С учетом выражений (23) и (24) формула (20) примет следующий вид:

$$C_{\text{п.дв.ед}} = 34{,}3(P_и\eta^2)^{\frac{1}{4}} \cdot (KT_0 N_ш m)^{-1/4} \lambda^{1/2} \tau_и^{-3/4} \sigma^{1/4} \alpha^{-3/2} \Theta^{-1/2}. \tag{25}$$

Из уравнения (25) следует, что для получения максимального количества информации при заданной длине волны длительность генерируемого импульса необходимо выбирать как можно короче. Для СВЧ-источников импульсных колебаний существует зависимость [5]

$$\lambda = \frac{C}{Q}\tau, \tag{26}$$

где Q — добротность колебательной системы.

Следовательно, между длиной волны и минимальной длительностью зондирующего импульса существует прямо пропорциональная зависимость:

$$\tau_{\min} = Qf^{-1}, \quad Q = 10^{-1} - 10^{-4} \text{ (для магнетронов)}. \tag{27}$$

Подставив значения выражений (26) и (27) в формулу (25) после преобразования получим

$$C_{\text{п.дв.ед}} = 34{,}3(P_и\eta^2)^{1/4} \cdot (KT_0 N_ш m)^{-1/4} \alpha^{-3/2} \theta^{-1/2} \sigma^{1/4} Q^{-3/4} C^{1/2} f^{1/4}. \tag{28}$$

Для зеркальной антенны между размерами симметрично усеченного параболического рефлектора и шириной ДНА в вертикальной и горизонтальной плоскости существуют зависимости вида

$$\alpha = 68{,}8\frac{\lambda}{d_г}\theta = 68{,}8\frac{\lambda}{d_в}, \tag{29}$$

где $d_г$, $d_в$ — соответственно горизонтальные и вертикальные размеры усеченного параболоида вращения.

Кроме того, если предположить, что в качестве цели используется металлическая пластина $S = 1$ м^2, ЭПР которой определяется из выражения [7]:

$$\sigma_{пл} = \frac{4\pi S^2}{\lambda^2}, \tag{30}$$

то, подставив выражения (29), (30) в (28), получим

$$C_{п.дв.ед} = 6{,}04 \cdot 10^{-18} (P_и \eta^2)^{\frac{1}{4}} d_г^{\frac{3}{2}} d_в^{\frac{1}{2}} f^{\frac{11}{4}} (N_ш \cdot m)^{-\frac{1}{4}}. \tag{31}$$

Из выражения (31) можно сделать следующий вывод: при принятых ограничениях информативность судовой РЛС с зеркальной антенной при фиксированных размерах $d_г$, $d_в$ и минимальной длительности импульса пропорциональна частоте в степени 11/4, т. е. возрастает при уменьшении длины волны зондирующего импульса примерно пропорционально f^3.

Если в выражении (31) задаться реально реализуемыми значениями параметрами РЛС в используемых диапазонах радиоволн, то это позволит получить количественные значения потенциальной информативности соответствующих радаров для сравнения их между собой. Физически это объясняется тем, что при допустимых размерах антенных систем и технически реализуемой минимальной длительности импульса с увеличением частоты улучшается разрешающая способность по углу и дальности, т. е. возрастает подробность наблюдаемой обстановки. В процессе обзора пространства судовая РЛС с помощью зондирующего объема считывает информацию об окружающей обстановке. Чем меньше разрешаемый объем (площадка), тем большая подробность получаемой информации и выше помехозащищённость от гидрометеоров. Данную закономерность уместно сравнить с работой передающей телевизионной трубки: чем меньше диаметр считывающего луча трубки, тем больше подробность и четкость передаваемой телевизионной информации.

Выводы

1. Для оценки потенциальной информативной ёмкости каждого радара обоснован выбор методов из существующих в теории информации для количественной её оценки.

2. Получены формулы для вычисления потенциальной информационной ёмкости радиолокаторов с учётом их технических параметров и эксплуатационных характеристик и количественные результаты расчёта.

3. Сравнительный анализ показал, что при минимальной длительности импульса потенциальная информационная ёмкость радаров пропорциональна частоте в степени 11/4, т. е. она возрастает при уменьшении длины волны зондирующего импульса примерно пропорционально f^3.

4. Полученная количественная оценка потенциальной информативности разных судовых и береговых радаров позволяет осуществлять их оптимальный выбор для решения конкретных задач эффективности и безопасности судовождения для морского и речного флота.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Ничипоренко Н. Т.* Теория, разработка и внедрение комплекса радиолокационных средств миллиметрового диапазона с целью повышения безопасности мореплавания: дис. … д - ра техн. наук: 05.22.16 «Судовождение» / Н. Т. Ничипоренко. — Л.: ЛВИМУ, 1991. — 332 с.

2. *Дулевич В. Е.* Информационные свойства радиолокационных систем / В. Е. Дулевич. — Л.: ЛВИКА, 1970. — 301 с.

3. *Сколник М.* Справочник по радиолокации: в 4 т. / М. Сколник; под общ. ред. К. Н. Трофимова. — М.: Сов. Радио, 1976. — Т. 1. Основы. — 435 с.

4. *Шеннон К.* Математическая теория связи / К. Шеннон // Работы по теории связи и кибернетики; под ред. Р. Л. Добрушина и О. Б. Лупанова. — М.: ИЛ, 1964. — 829 с.

5. *Хартли В. Л.* Передача информации. Теория информации и её приложение / В. Л. Хартли; под ред. А. А. Харкевича. — М.: Физматгиз, 1959. — 342.

6. *Быстров Р. П.* Миллиметровая радиолокация с фрактальной обработкой / Р. П. Быстров, А. А. Потапов, А. В. Соколов. — М.: Радиотехника, 2005. — 367 с.

7. *Байрашевский А. М.* Судовые радиолокационные системы / А. М. Байрашевский, Н. Т. Ничипоренко. — М.: Транспорт, 1982. — 317 с.

8. *Колмогоров А. Н.* Три подхода к понятию количества информации / А. Н. Колмогоров // Проблемы передачи информации. — 1965. — Т. 1. — № 1. — С. 3–11.

9. *Маринич А. Н.* Цифровые информационные потоки в судовых интегрированных системах навигации и системах связи / А. Н. Маринич, А. В. Припотнюк, Ю. М. Устинов // Вестник Государственного университета морского и речного флота имени адмирала С. О. Макарова. — 2015. – № 2 (30). — С. 48–56.

10. *Маринич А. Н.* Сравнительная оценка информативности судовой РЛС/САРП в режимах радиолокационного измерения и overlay с использованием данных АИС-целей / А. Н. Маринич, А. В. Припотнюк, Ю. М. Устинов, А. Р. Шигабутдинов // Эксплуатация морского транспорта. — 2012. — № 4 (70). — С. 21–23.

REFERENCES

1. Nichiporenko, N. T. Teoriya, razrabotka i vnedrenie kompleksa radiolokatsionnykh sredstv millimetrovogo diapazona s tsel'yu povysheniya bezopasnosti moreplavaniya. Dr. diss. L.: LVIMU, 1991.

2. Dulevich, V. E. *Informatsionnye svoistva radiolokatsionnykh sistem*. L.: LVIKA, 1970.

3. Skolnik, M. *Spravochnik po radiolokatsii*. Edited by K.N. Trofimov. M.: Sov. Radio, 1976. Vol. 1. Osnovy.

4. Shennon, K. "Matematicheskaya teoriya svyazi." *Raboty po teorii svyazi i ki-bernetiki*. M.: IL, 1964.

5. Khartli, V. L. *Peredacha informatsii. Teoriya informatsii i ee prilozhenie.* Edited by A. A. Kharkevich. M.: Fizmatgiz, 1959.

6. Bystrov, R. P., A. A. Potapov, and A. V. Sokolov. *Millimetrovaya radiolokatsiya s fraktal'noi obrabotkoi*. M.: Radiotekhnika, 2005.

7. Bairashevskii, A. M., and N. T. Nichiporenko. *Sudovye radiolokatsionnye sistemy*. M.: Transport, 1982.

8. Kolmogorov, A. N. "Tri podkhoda k ponyatiyu kolichestva informatsii." *Problemy peredachi informatsii* 1.1 (1965): 3–11.

9. Marinich, A. N., A. V. Pripotnyuk, and Yu. M. Ustinov. "Digital information streams in the ship integrated systems of navigation and communication systems." *Vestnik Gosudarstvennogo universiteta morskogo i rechnogo flota imeni admirala S.O. Makarova* 2(30) (2015): 48–56.

10. Marinich, A. N., A. V. Pripotnyuk, Yu. M. Ustinov, and A. R. Shigabutdinov. "Comparative estimation of information provided by RADAR/ARPA in the modes of the radio-location measuring and OVERLAY with the use of these AIS-targets." *Ekspluatatsiya morskogo transporta* 4(70) (2012): 21–23.

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

Ничипоренко Николай Тимофеевич —
доктор технических наук, профессор
ФГБОУ ВО «ГУМРФ имени
адмирала С. О. Макарова»
198035, Российская Федерация, Санкт-Петербург,
ул. Двинская 5/7
e-mail: *fkt_pt@gumrf.ru*

Сиваченко Борис Николаевич —
кандидат технических наук, доцент
ФГБОУ ВО «ГУМРФ имени
адмирала С. О. Макарова»
198035, Российская Федерация, Санкт-Петербург,
ул. Двинская 5/7
e-mail: *sbn1@mail.ru*, *fkt_pt@gumrf.ru*

INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Nichiporenko, Nikolay T. —
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: *fkt_pt@gumrf.ru*

Sivachenko, Boris N. —
PhD, associate professor
Admiral Makarov State University
of Maritime and Inland Shipping
5/7 Dvinskaya Str., St. Petersburg 198035,
Russian Federation
e-mail: *sbn1@mail.ru*, *fkt_pt@gumrf.ru*

Статья поступила в редакцию 15 марта 2017 г.
Received: March 15, 2017.

ВЕСТНИК
ГОСУДАРСТВЕННОГО УНИВЕРСИТЕТА
МОРСКОГО И РЕЧНОГО ФЛОТА ИМЕНИ АДМИРАЛА С. О. МАКАРОВА

DOI: 10.21821/2309-5180-2017-9-2-390-401

CONTROL OF THE RELUCTANCE MOTOR WITH AN ANISOTROPIC MAGNETIC CONDUCTIVITY OF ROTOR IN SHIP PROPULSION SYSTEM

V. F. Samoseiko, S. V. Sharashkin

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

The work describes the different types of electrical motors for ship propulsion system, given their advantages and disadvantages. A new type of electric motor, which for obvious reasons is the most promising in the motor selection issue for electric propulsion systems. Based on research conductede the advantages of synchronous reluctance machine with anisotropic magnetic conductivity of rotor compared to other types of engines. It was revealed that the synchronous reluctance machine have high-energy characteristics and good mass-dimensional indicators. Shows different embodiments of the rotor of the synchronous reluctance machine with anisotropic magnetic conductivity of rotor and their advantages. The mathematical description of the voltages and currents in synchronous reluctance machine, set their connection with the electromagnetic torque and rotor speed. Based on the mathematical description of the resulting contours formed by the control of electromagnetic torque and rotor speed. Methods for reducing the static and dynamic control errors. It formed a block diagram of a motor control system. In accordance with the block diagram produced by modeling of electromagnetic processes in synchronous reluctance machine with anisotropic magnetic conductivity of rotor. As a result of simulation obtained graphs of the electromagnetic torque and the electric machine rotor speed when starting idling and then lashed the load. It was concluded that a synchronous reluctance machine with anisotropic magnetic conductivity of rotor in the construction of the subordinate control system provides the necessary characteristics for the construction of electromechanical propulsion system of ships. It is shown that, when setting up the control circuits, electromechanical drive with synchronous reluctance machine characteristics close to those of an electric motor drive with DC motor.

Key words: sheep propulsion system, synchronous reluctance machine, control system, anisotropic magnetic conductivity

For citation:
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.

УДК 621

УПРАВЛЕНИЕ ГРЕБНЫМ РЕАКТИВНЫМ ЭЛЕКТРОДВИГАТЕЛЕМ С АНИЗОТРОПНОЙ МАГНИТНОЙ ПРОВОДИМОСТЬЮ РОТОРА

В. Ф. Самосейко, С. В. Шарашкин

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

В статье приведены достоинства и недостатки различных типов электрических машин, применяемых при построении систем электродвижения судов. Предложен новый тип электрического двигателя, который по объективным причинам является наиболее перспективным в вопросе выбора электродвигателя для электропривода гребной электрической установки. На основании разработок обоснованы преимущества реактивных электрических машин с анизотропной магнитной проводимостью ротора по сравнению с другими типами двигателей. Выявлено, что реактивные электрические машины обладают высокими энергетическими характеристиками и хорошими массогабаритными показателями. Приведены различные варианты исполнения ротора реактивной электрической машины с анизотропной магнитной проводимостью ротора и показаны их преимущества. Получено математическое описание напряжений и токов в реактивной электрической машине, установлена их связь с электромагнитным моментом и скоростью вращения ротора. На основе полученного математического описания сформированы контуры управления электромагнитным моментом и скоростью вращения ротора. Предложены методы уменьшения статиче-

ской и динамической ошибок управления. Сформирована структурная схема электродвигателя с системой управления. В соответствии со структурной схемой произведено моделирование электромагнитных процессов в реактивном электродвигателе с анизотропной магнитной проводимостью ротора. В результате моделирования получены графики изменения электромагнитного момента и скорости вращения ротора электрической машины при пуске на холостом ходу и последующим набросом нагрузки. Сделан вывод, что реактивный электродвигатель с анизотропной магнитной проводимостью ротора при построении подчиненной системы управления обеспечивает необходимые электромеханические характеристики для работы системы электродвижения судов. Показано, что при настройке контуров управления электромеханические характеристики привода с реактивным электродвигателем близки к характеристикам привода с двигателем постоянного тока.

Ключевые слова: реактивный электродвигатель, электродвижение судов, анизотропная магнитная проводимость, система управления

Для цитирования:
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.

Введение

В настоящее время выбор электрического двигателя для построения системы электродвижения судов является актуальной задачей [1], [2]. При построении гребной электрической установки используют следующие типы электрических машин: асинхронный электрический двигатель с короткозамкнутым ротором, двигатель постоянного тока, синхронный электродвигатель с постоянными магнитами. В работах [3] – [5] приводятся исследования в области создания гребных установок на базе асинхронного электрического двигателя с короткозамкнутым ротором. В источнике [6] подробно рассматривается система электродвижения с электродвигателем постоянного тока при питании его от сети переменного тока через выпрямитель напряжения. В работах [7] – [9] выявлены основные преимущества современных систем электродвижения на базе синхронных электрических машин с постоянными магнитами на роторе.

На основании анализа литературы выявлены достоинства и недостатки различных типов электрических двигателей (табл. 1).

Таблица 1

Достоинства и недостатки различных типов электрических машин

	Двигатель постоянного тока	Асинхронный двигатель с короткозамкнутым ротором	Синхронный двигатель с возбуждением от постоянных магнитов
Достоинства	виброшумовые характеристики; высокая перегрузочная способность; простота управления	высокая технологичность производства; низкая стоимость; надежность	возможность глубокого регулирования без потерь энергетической эффективности; хорошие массогабаритные характеристики; простота управления; отсутствие обмоток на роторе
Недостатки	низкая надежность, за счет щеточно-коллекторного механизма; плохие массогабаритные характеристики; необходимость отведения тепла из якоря	низкая перегрузочная способность; необходимость отведения тепла из ротора	чувствительность к высоким электромагнитным полям; необходимость обеспечения защиты от металлической пыли; высокая аварийная опасность, связанная с невозможностью снятия поля с ротора

Интерес к применению реактивных электрических машин с анизотропной магнитной проводимостью ротора обусловлен тем, что они обладают хорошими габаритами и высокими энер-

гетическими характеристиками (не уступают синхронным электродвигателям с постоянными магнитами на роторе), отведение тепла от ротора производится естественным путем без дополнительных устройств охлаждения, и без усложнения конструкции [10] – [12]. Поскольку на роторе реактивной машины отсутствуют электрические обмотки, он является пассивным, в связи с этой особенностью при аварийном отключении электродвигателя не возникает необходимость развязывать обмотки двигателя с питающей сетью, так как это происходит в системах электродвижения судов с применением синхронных электродвигателей с возбуждением от постоянных магнитов.

Наряду с решением проблемы выбора типа электродвигателя, важным является вопрос реализации системы его управления. Как известно, в современном электроприводе переменного тока для управления электрическими машинами применяются преобразователи частоты (ПЧ) [3], [13]. Построение силовой части ПЧ хорошо изучено и отработано многими отечественными и зарубежными компаниями, так же как разработка системы управления ПЧ и составление алгоритмов управления, формирующих необходимые характеристики напряжения питания на обмотках электрического двигателя [13] – [16]. Разработкой реактивных электрических машин и построением алгоритмов управления занимаются как зарубежные, так и отечественные организации.

Настоящая работа посвящена построению системы управления реактивным электродвигателем с анизотропной магнитной проводимостью ротора, обеспечивающей необходимые электромеханические характеристики, а также моделированию электромагнитных процессов в двигателе.

Математическое описание напряжений и токов в обмотках реактивной машины

Рассмотрим более подробно реактивные электрические машины с анизотропной магнитной проводимостью ротора. Существуют два типа таких машин: с поперечной и продольной шихтовкой ротора.

В одном случае анизотропия магнитных свойств ротора достигается за счет поперечной шихтовки ротора листами электротехнической стали с вырезами, формирующими магнитные полюсы (рис. 1, *а*), а в другом — за счет продольной шихтовки (рис. 1, *б*). Машины с такой конструкцией ротора имеют различное отношение продольной и поперечной индуктивностей, характеризующее их качество. У машин с продольной шихтовкой это отношение существенно выше, чем у машин с поперечной шихтовкой ротора сталью. Управление напряжением питания обмоток машин с анизотропной магнитной проводимостью ротора может быть реализовано от стандартного преобразователя частоты.

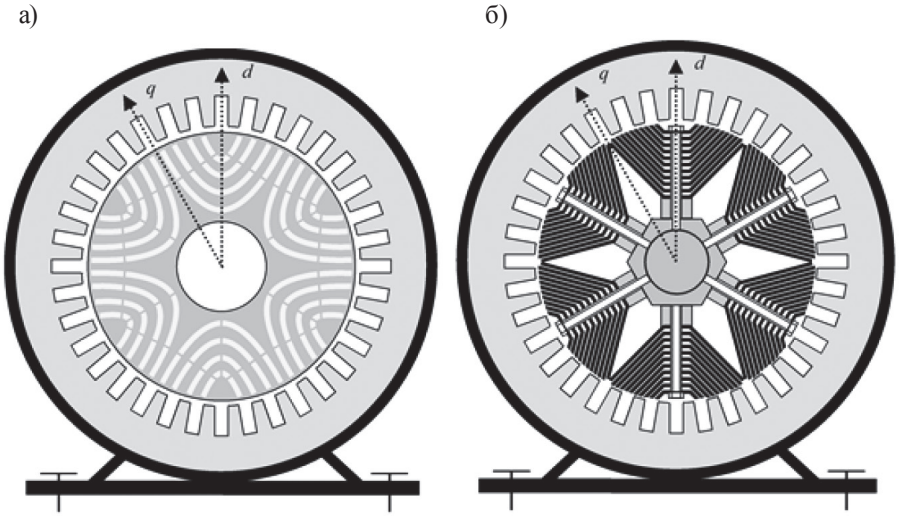


Рис. 1. Магнитопровод шестиполюсных машин с поперечной (*а*) и продольной (*б*) шихтовкой

Рассмотрим уравнения напряжений на обмотках статора и ротора и их отображения на плоскость поперечного сечения машины в оси координат ротора *d*, *q*. Будем полагать, что питание

обмоток реактивного электродвигателя осуществляется симметричной системой *m*-фазных синусоидальных напряжений с угловой частотой ω_1, представленной вектором $\mathbf{U}_S$. По обмоткам статора протекают фазные токи $\mathbf{I}_S$, а по контурам ротора протекают токи $\mathbf{I}_R$. Схема замещения машины приведена на рис. 2.

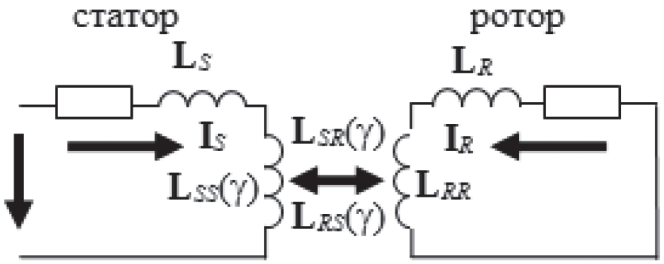


Рис. 2. Схема замещения машины

Вектор напряжений $\mathbf{U}_S$ синтезирует вентильный коммутатор-инвертор (рис. 3), где φ — начальная фаза, характеризующая сдвиг напряжения относительно продольной оси магнитной симметрии ротора *d*; $\rho = 2\cdot\pi/3$; U_m — амплитуда напряжения; ω — угловая частота; *m* — число фаз двигателя.

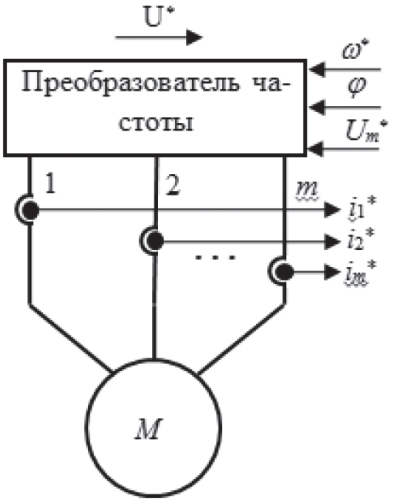


Рис. 3. Схема питания реактивного электродвигателя от преобразователя частоты

При составлении уравнения напряжений полагается, что кроме обмоток статора на роторе машины находятся продольный и поперечный короткозамкнутые контуры, образующие демпферную обмотку. Полученные далее уравнения напряжений справедливы как для синхронного, так и асинхронного режимов работы электродвигателя.

В соответствии со схемой замещения по второму закону Кирхгофа, уравнения напряжений на обмотках статора и ротора могут быть записаны в матричной форме:

$$\mathbf{U}_S = \mathbf{R}_S \cdot \mathbf{I}_S + p\{\mathbf{L}_{SS}(\gamma)\cdot\mathbf{I}_S\} + \mathbf{L}_S \cdot p\mathbf{I}_S + p\{\mathbf{L}_{SR}(\gamma)\cdot\mathbf{I}_R\};$$

$$\mathbf{0} = \mathbf{R}_R \cdot \mathbf{I}_R + \mathbf{L}_{RR} \cdot p\mathbf{I}_R + \mathbf{L}_R \cdot p\mathbf{I}_R + p\{\mathbf{L}_{RS}(\gamma)\cdot\mathbf{I}_S\},$$

где $\mathbf{U}_S$ — вектор напряжений на обмотках статора; $\mathbf{I}_S$ — вектор токов в обмотках статора; $\mathbf{I}_R$ — вектор тока в контурах ротора; $\mathbf{L}_{SS}(\gamma)$ — матрица основных индуктивностей *m*-фазной обмотки статора; $\mathbf{L}_{RR}$ — матрица индуктивностей продольного и поперечного контуров ротора; $\mathbf{L}_{SR}(\gamma) = \mathbf{L}^{\mathrm{T}}_{SR}(\gamma)$ — матрица взаимных индуктивностей фазных обмоток статора и ротора; $\mathbf{L}_S = L_S\cdot\mathbf{1}$ — матрица индуктивностей рассеяния обмотки статора; $\mathbf{L}_S$ — матрица индуктивностей рассеяния обмотки статора; $\mathbf{R}_S = R_S\cdot\mathbf{1}$ — матрица сопротивлений обмотки статора; R_S — сопротивление обмотки статора; $\mathbf{L}_R$ — матрица индуктивностей рассеяния обмотки ротора; $\mathbf{R}_R$ — матрица сопротивлений обмотки рото-

ра; p — оператор дифференцирования по времени t; $\gamma = \omega \cdot t$ — угол поворота ротора; ω — угловая электрическая скорость вращения ротора.

Уравнения напряжений на обмотках имеют периодические коэффициенты, поэтому их аналитическое решение затруднительно. Выполним преобразование переменных уравнения, полагая:

$$\mathbf{U}_1 = \begin{bmatrix} u_d \\ u_q \end{bmatrix} = \frac{2}{m} \cdot \mathbf{D}_S(\gamma) \cdot \mathbf{U}_S; \quad \mathbf{I}_1 = \begin{bmatrix} i_d \\ i_q \end{bmatrix} = \mathbf{D}_S(\gamma) \cdot \mathbf{I}_S; \quad \mathbf{I}_2 = \begin{bmatrix} j_d \\ j_q \end{bmatrix} = \frac{1}{k_{\text{об}} \cdot w} \cdot \mathbf{I}_R,$$

где $\mathbf{D}_S(\gamma) = \mathbf{V}(\gamma) \cdot \mathbf{D}_S$ — фазная матрица обмотки статора во вращающейся системе координат ротора; $\mathbf{V}(\gamma)$ — матрица вращения, формирующаяся из сигналов энкодера; $\mathbf{D}_S$ — фазная матрица обмотки статора; ω — число витков обмотки; $k_{\text{об}}$ — обмоточный коэффициент, зависящий от распределения и укорочения обмотки, а также от скоса пазов.

$$\mathbf{V}(\gamma) = \frac{1}{\sqrt{v_d^{\,2} + v_q^{\,2}}} \cdot \begin{bmatrix} v_d & -v_q \\ v_q & v_d \end{bmatrix}; \quad \mathbf{D_S} = \begin{bmatrix} 1 & \cos(\rho_S) & \cos(2 \cdot \rho_S) & \cdots & \cos((m-1) \cdot \rho_S) \\ 0 & \sin(\rho_S) & \sin(2 \cdot \rho_S) & \cdots & \sin((m-1) \cdot \rho_S) \end{bmatrix}.$$

Уравнения напряжений обмоток статора и ротора, подвергнутые преобразованию, примут следующий вид:

$$\mathbf{U}_1 = R_1 \cdot \mathbf{I}_1 + \omega \cdot \mathbf{E} \cdot \mathbf{L}_{01} \cdot \mathbf{I}_1 + \mathbf{L}_{01} \cdot p\mathbf{I}_1 + \omega \cdot \mathbf{E} \cdot \mathbf{L}_0 \cdot \mathbf{I}_2 + \mathbf{L}_0 \cdot p\mathbf{I}_2;$$
$$0 = \mathbf{R}_2 \cdot \mathbf{I}_2 + \mathbf{L}_{02} \cdot p\mathbf{I}_2 + \mathbf{L}_0 \cdot p\mathbf{I}_1,$$

где $\mathbf{L}_{01}$ — матрица полных индуктивностей обмотки статора; $\mathbf{L}_0$ — отображение матрицы основных индуктивностей фазных обмоток статора на плоскость поперечного сечения машины; $\mathbf{E}=\mathbf{V}(\pi/2)$ — матрица поворота на угол $\pi/2$; R_1 — отображение сопротивления обмотки статора на плоскость поперечного сечения машины; $\mathbf{L}_{02}$ — матрица полных приведенных индуктивностей обмотки ротора; $\mathbf{R}_2$ — матрица приведенных сопротивлений обмотки ротора к обмотке статора.

$$\mathbf{L}_{01} = \begin{bmatrix} L_d & 0 \\ 0 & L_q \end{bmatrix}; \quad \mathbf{L}_0 = \mathbf{L}_{11} = \begin{bmatrix} L_{dd} & 0 \\ 0 & L_{qq} \end{bmatrix}; \quad R_1 = \frac{2}{m} \cdot R_S; \quad \mathbf{L}_{02} = \begin{bmatrix} L_{d2} & 0 \\ 0 & L_{q2} \end{bmatrix}; \quad \mathbf{R}_2 = \begin{bmatrix} R_{d2} & 0 \\ 0 & R_{q2} \end{bmatrix},$$

где $L_d = L_{dd} + L_1$ — полная индуктивность обмотки по оси d; L_{dd} — основная индуктивность обмотки по оси d; L_1 — индуктивность рассеивания; $L_q = L_{qq} + L_1$ — полная индуктивность обмотки по оси q; L_{dd} — основная индуктивность обмотки по оси d; L_{d2} и L_{q2} — приведенная индуктивность рассеяния продольного и поперечного контура ротора к обмотке статора, где R_{d2} и R_{q2} — приведенное сопротивление, соответственно, продольного и поперечного контура ротора к обмотке статора.

Данные уравнения являются отображениями исходных уравнений в оси координат d, q. В развернутой форме записи уравнения напряжений статора и ротора и примут следующий вид:

$$u_d = R_1 \cdot i_d - \omega \cdot L_q \cdot i_q + L_d \cdot pi_d - \omega \cdot L_{qq} \cdot j_q + L_{dd} \cdot pj_d;$$
$$u_q = R_1 \cdot i_q + \omega \cdot L_d \cdot i_d + L_q \cdot pi_q + \omega \cdot L_{dd} \cdot j_d + L_{qq} \cdot pj_q;$$
$$0 = R_{d2} \cdot j_d + L_{d2} \cdot pj_d + L_{dd} \cdot pi_d;$$
$$0 = R_{q2} \cdot j_q + L_{q2} \cdot pj_q + L_{qq} \cdot pi_q.$$

Если демпфирующие контуры на роторе отсутствуют, то уравнения, описывающие динамику электромагнитных процессов, примут вид:

$$u_d = R_1 \cdot i_d - \omega \cdot L_q \cdot i_q + L_d \cdot pi_d;$$
$$u_q = R_1 \cdot i_q + \omega \cdot L_d \cdot i_d + L_q \cdot pi_q.$$

Если положить, что $pi_d = 0$; $pi_q = 0$; $i_d = I_d$; $i_q = I_q$, получим уравнения стационарного режима работы машины $j_d = j_q = 0$:

$$U_d = R_1 \cdot I_d - \omega \cdot L_q \cdot I_q; \quad U_q = R_1 \cdot I_q + \omega \cdot L_d \cdot I_d,$$

где I_d и I_q — проекции вектора стационарного тока $\mathbf{I}_1$ на продольную и поперечную оси соответственно.

В стационарном режиме электромагнитные процессы характеризуются токами:

$$I_{(1)d} = \frac{R_1 \cdot U_{(1)d} + \omega \cdot L_q \cdot U_{(1)q}}{R_1^2 + \omega^2 \cdot L_d \cdot L_q} = \frac{U_{(1)} \cdot (R_1 \cdot \cos(\varphi) + \omega \cdot L_q \cdot \sin(\varphi))}{R_1^2 + \omega^2 \cdot L_d \cdot L_q};$$

$$I_{(1)q} = \frac{R_1 \cdot U_{(1)q} - \omega \cdot L_d \cdot U_{(1)d}}{R_1^2 + \omega^2 \cdot L_d \cdot L_q} = \frac{U_{(1)} \cdot (R_1 \cdot \sin(\varphi) - \omega \cdot L_d \cdot \cos(\varphi))}{R_1^2 + \omega^2 \cdot L_d \cdot L_q},$$

где $U_{(1)d} = U_{(1)} \cdot \cos(\varphi)$; $U_{(1)q} = U_{(1)} \cdot \sin(\varphi)$; R_1 — активное сопротивление обмотки статора.

Электромагнитный момент на пару полюсов ротора и фаз статора в этом случае определяется подстановкой токов в формулу

$$M = 2 \cdot L_m \cdot I_{d(1)} \cdot I_{q(1)}.$$

После подстановки получим выражение электромагнитного момента:

$$M = 2 \cdot L_m \cdot \frac{\left(R_1 \cdot U_{(1)d} + \omega \cdot L_q \cdot U_{(1)q}\right) \cdot \left(R_1 \cdot U_{(1)q} - \omega \cdot L_d \cdot U_{(1)d}\right)}{\left(R_1^2 + \omega^2 \cdot L_d \cdot L_q\right)^2}.$$

Построение алгоритма управления электроприводом на базе реактивного электродвигателя с анизотропной магнитной проводимостью ротора

Формирование электромагнитного момента возможно путем воздействия на параметры напряжения: $U_{(1)}$, ω, φ. Положим, что заданы амплитуда напряжения $U_{(1)}$ и частота ω. Начальная фаза φ в этом случае будет определяться нагрузкой на валу электродвигателя, а электрическая скорость вращения ротора совпадает с угловой частотой напряжения инвертора, и реактивный электродвигатель работает в синхронном режиме.

Если положение вектора напряжений относительно положения ротора контролируется, то угол φ может быть задан системой управления. Для обеспечения максимальной энергетической эффективности необходимо обеспечивать равенство токов $I_{(1)d}$ и $I_{(1)q}$, из этого равенства следует

$$\varphi = \varphi_0 = \arctan\left(\frac{R_1 + \omega \cdot L_d}{R_1 - \omega \cdot L_q}\right).$$

Если поддерживать угол нагрузки φ= φ_0, то управлять электромагнитным моментом и скоростью вращения ротора можно, воздействуя на амплитуду напряжения $U_{(1)}$. Величина электромагнитного момента в этом случае будет определяться соотношением

$$M = \frac{U_m^2 \cdot (L_d - L_q)}{[(\omega \cdot L_d + R_1)^2 + (\omega \cdot L_q - R_1)^2]}.$$

Данное выражение определяет механические характеристики реактивного электродвигателя при управлении с максимальным значением показателя энергетической эффективности. Формирование электромагнитного момента удобно выполнять при постоянном токе намагничивания $I_{(1)d}$, при этом электромагнитный момент пропорционален току $I_{(1)q}$, который будем называть током нагрузки. Подробно вопросы формирования характеристик рассмотрены в [10], [16].

Контур управления током намагничивания можно представить в виде структурной схемы (рис. 4), опираясь на закономерности, описанные ранее.

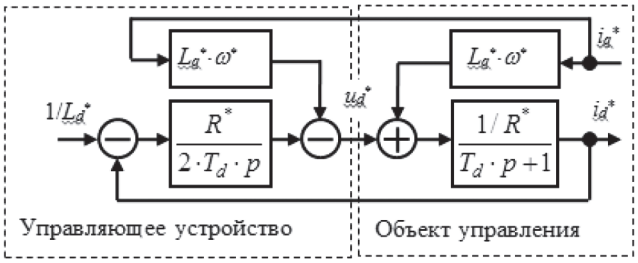


Рис. 4. Система стабилизации тока намагничивания

На данной структурной схеме также изображено управляющее устройство. Объект управления и управляющее устройство образуют систему управления. Система управления имеет контур управления по возмущающему воздействию i_q^* и контур управления по отклонению тока намагничивания i_d^* от заданного значения с интегральным регулятором. Желаемая передаточная функция системы управления током намагничивания i_d^* будет иметь следующий вид:

$$W_d = \frac{1}{2 \cdot T_d^{\,2} \cdot p^2 + 2 \cdot T_d \cdot p + 1} \approx \frac{1}{2 \cdot T_d \cdot p + 1}.$$

Передаточную функцию контура управления током намагничивания можно аппроксимировать апериодическим звеном первого порядка, постоянная времени которого равна $2T_d$. На вход контура управления током намагничивания действует постоянный сигнал $1/L_d^*$, который позволит стабилизировать ток намагничивания на уровне тока холостого хода.

Контур управления электромагнитным моментом можно представить в виде структурной схемы (рис. 5).

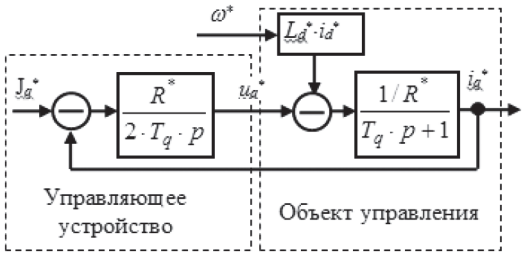


Рис. 5. Контур управления электромагнитным моментом

На данной структурной схеме также изображено управляющее устройство. Система управления, представляет собой замкнутый контур по току нагрузки с интегральным регулятором. Интегральный регулятор обеспечивает стандартное динамическое поведение контура тока i_q. Передаточная функция контура управления током нагрузки будет иметь следующий вид

$$W_q = \frac{1}{2 \cdot T_q^{\,2} \cdot p^2 + 2 \cdot T_q \cdot p + 1} \approx \frac{1}{2 \cdot T_q \cdot p + 1}.$$

Передаточную функцию контура можно аппроксимировать звеном первого порядка с постоянная времени $2T_q$. При моделировании электромагнитных процессов в приводе было принято для уменьшения статической ошибки добавить второй контур управления электромагнитным моментом с интегральным регулятором (рис. 6) с передаточной функцией

$$W_{\text{рт}} = \frac{1}{4 \cdot T_d \cdot p}.$$

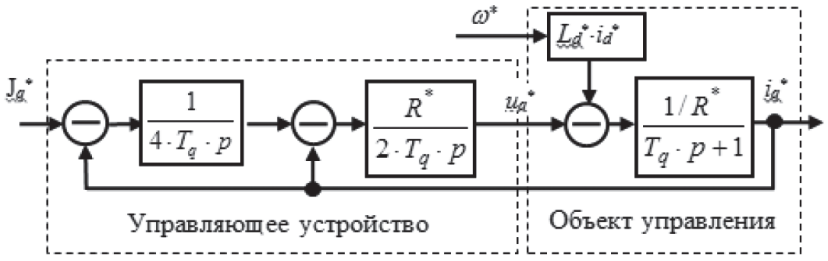


Рис. 6. Структурная схема со вторым контуром управления моментом

На вход контура управления моментом действует сигнал J_q^*, который позволяет задавать ток нагрузки и, соответственно, электромагнитный момент. На входе контура тока следует устанавливать блок ограничения значения электромагнитного момента, представляющий собой звено ограничения выходного сигнала.

Управление скоростью вращения ротора связано с управлением электромагнитным моментом. Эта связь следует из основного уравнения движения:

$$J \cdot p\omega = M - M_c.$$

Для увеличения скорости необходимо, чтобы электромагнитный момент M превосходил момент сопротивления M_c, а для уменьшения скорости необходимо, чтобы электромагнитный момент M был ниже момента сопротивления M_c.

Формирование заданных динамических характеристик скорости вращения ротора производится методом последовательной коррекции. Структурная схема контура скорости приведена на рис. 7. Объектом регулирования контура скорости являются: механическая часть электродвигателя и контур тока с передаточной функцией:

$$W_0(p) = \frac{1}{(2 \cdot T_q \cdot p + 1) \cdot T_{\text{мех}} \cdot p}.$$

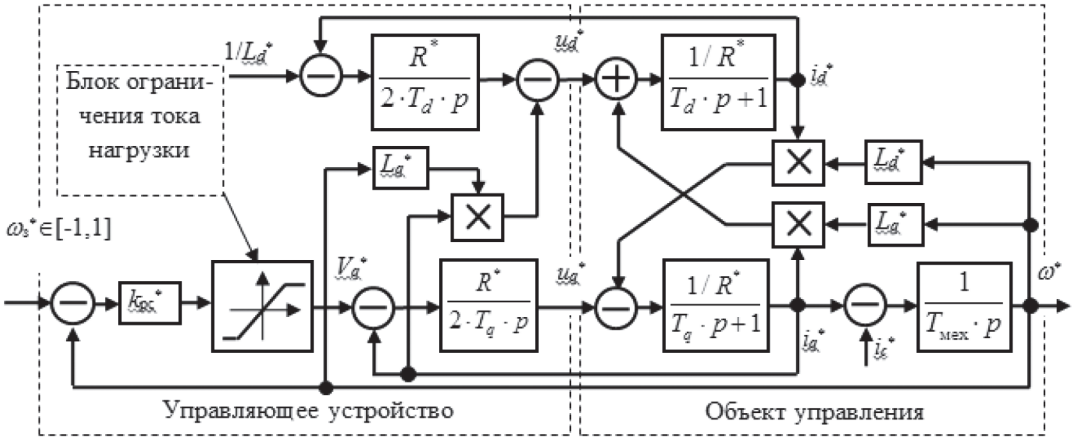


Рис. 7. Структурная схема системы управления реактивным электродвигателем

Передаточную функцию регулятора скорости выбирают таким образом, чтобы обеспечить стандартную передаточную функцию контура скорости:

$$W_{\text{РС}} = \frac{(2 \cdot T_q \cdot p + 1) \cdot T_{\text{мех}} \cdot p}{2 \cdot T_{\mu} \cdot p \cdot (T_{\mu} \cdot p + 1)}.$$

Полагаем $T_{\mu} = 2T_q$ и получим выражение передаточной функции регулятора тока в следующем виде:

$$W_{\text{РС}} = \frac{T_{\text{мех}}}{4 \cdot T_q} = k_{\text{РС}}.$$

Пропорциональный регулятор скорости дает статическую ошибку, обусловленную нагрузкой. Если необходимо уменьшить ошибку, для обеспечения требований технологического процесса, применяется адаптивный регулятор скорости, подана заявка на изобретение [17]. На основании вышеизложенного алгоритма, была составлена и зарегистрирована программа для ЭВМ, которая позволяет осуществлять управление реактивным электродвигателем с анизотропной магнитной проводимостью ротора [18].

Результаты моделирования электропривода с реактивным электродвигателем с анизотропной магнитной проводимостью ротора.

Для моделирования пуска двигателя на холостом ходу (без нагрузки) с последующим набросом нагрузки была использована программная среда MatLab пакет Simulink. На рис. 8 изображена структурная схема, на рис. 9 приведены результаты моделирования. По результатам моделирования были получены электромеханические характеристики, сходные с двигателем постоянного тока.

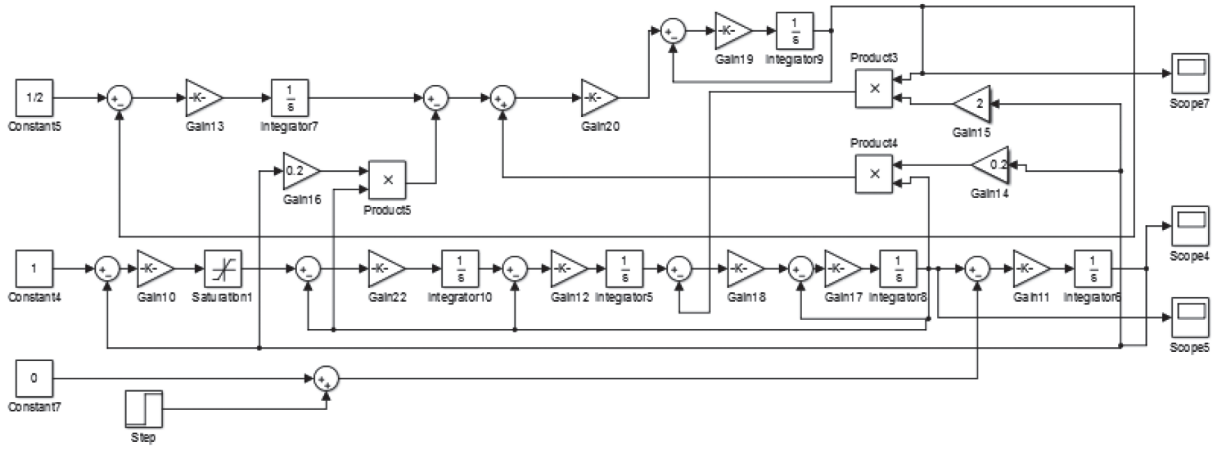


Рис. 8. Структурная схема модели электропривода в программной среде MatLab

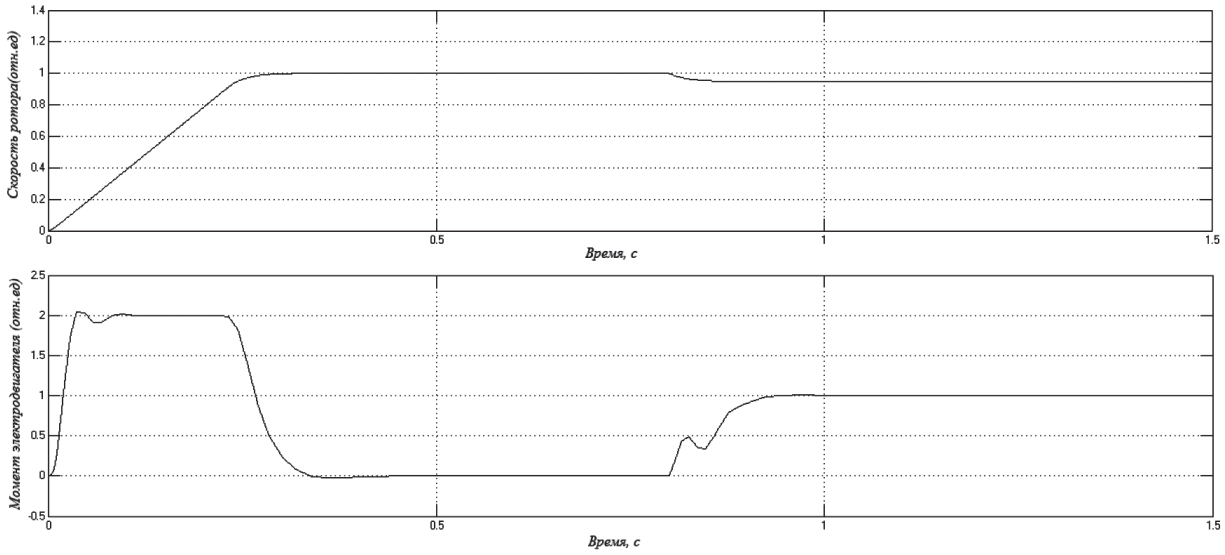


Рис. 9. Результаты моделирования пуска двигателя
на холостом ходу с последующим набросом нагрузки

Выводы

Реактивный электродвигатель с анизотропной магнитной проводимостью ротора является наиболее перспективным для построения гребных электрических установок судов за счет высоких энергетических показателей, низких габаритов и высокой надежности. Управление реактивным электродвигателем может быть реализовано путем подачи на обмотки симметричной системы синусоидальных напряжений. В этом случае контроль выходных параметров осуществляется путем воздействия на параметры напряжения: амплитуду, частоту и угол сдвига начальной фазы напряжения относительно продольной оси магнитной симметрии. Если заданы амплитуда напряжения и частота, то реактивная машина развивает синхронный момент, величина которого

связана с углом сдвига начальной фазы напряжения относительно продольной оси магнитной симметрии. Если имеется датчик контроля положения осей магнитной симметрии ротора, то можно определить напряжения по осям магнитной симметрии *d*, *q* и сформировать электромагнитный момент так, чтобы обеспечить максимальную энергетическую эффективность или постоянство тока намагничивания. Управление при постоянном токе намагничивания обеспечивает большее быстродействие при формировании заданного значения электромагнитного момента. В результате моделирования электропривода можно сделать вывод о том, что построение замкнутой системы управления электродвигателем с анизотропной магнитной проводимостью ротора позволяет обеспечить необходимые механические характеристики для построения привода гребной электрической установки. Введение дополнительных контуров управления током и скоростью приводит к уменьшению статической и динамической ошибки.

Работа была выполнена при финансовой поддержке в рамках государственного контракта №14411.1879999.09.039 от 20.11.2014 г. между Министерством промышленности и торговли Российской Федерации и ФГУП «Крыловский государственный научный центр».

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: Национальный 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. *Хватов О. С.* Гребная электрическая установка колесного судна / О. С. Хватов, Е. М. Бурда, Г. И. Коробко // Материалы Конгресса междунар. форума «Великие реки». — 2014. — С. 223–227.

5. *Ананьев С. С.* Асинхронный электропривод с улучшенными виброакустическими показателями / С. С. Ананьев, А. Н. Голубев // Электричество. — 2008. — № 8. — С. 52–56.

6. *Быков А. С.* Реверсивные режимы переменно-постоянного тока / А. С. Быков // Эксплуатация морского транспорта. — 2008. — № 2. — С. 74–75.

7. *Григорьев А. В.* Судовые системы электродвижения на базе двигательно-движительных систем кольцевой конструкции / А. В. Григорьев, Ю. А. Кулагин // Вестник Государственного университета морского и речного флота имени адмирала С. О. Макарова. — 2015. — № 4 (32). — С. 164–169.

8. *Целуйко И. Г.* Развитие электродвижения военных флотов в мире / И. Г. Целуйко // Молодой ученый. — 2012. — № 4. — С. 54–57.

9. Протокол совместного заседания секции «Электротехническое оборудование» НП «НТС ЕЭС» и НТС АО «НТЦ ФСК ЕЭС» по теме «Разработка и внедрение вентильных электроприводов на основе вентильных двигателей с возбуждением от постоянных магнитов» от 15 марта 2016 г. — Москва, 2016.

10. *Самосейко В. Ф.* Синхронные машины с анизотропной магнитной проводимостью ротора. Методика проектирования. Алгоритмы управления / В. Ф. Самосейко, Ф. А. Гельвер, В. А. Хомяк, Д. А. Хайров; под ред. Самосейко В. Ф. — СПб.: Крыловский государственный научный центр, 2016. —174 с.

11. *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.

12. Пат. 2603200 Российская Федерация, МПК H 02 K 1/24, H 02 K 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.

13. *Григорьев М. А.* Система импульсно-векторного управления синхронным реактивным электродвигателем с независимым управлением по каналу возбуждения. / М. А. Григорьев, А. Н. Шишков, Е. В. Белоусов [и др.] // Научная дискуссия: вопросы технических наук. — 2015. — № 5–6. — С. 110–116.

14. *Глухенький Т. В.* Разработка и исследование бездатчиковых систем управления вентильно-индукторными электродвигателями: автореф. дис. … канд. тех. наук / Т. В. Глухенький. — Чебоксары, 2004. — 19 с.

15. *Исаков А. С.* Синтез алгоритмов управления частотно-регулируемым электроприводом в условиях информационной неопределенности: дис. … канд. тех. наук / А. С. Исаков. — СПб., 2009. — 140 с.

16. *Самосейко В. Ф.* Теоретические основы управления электроприводом: учеб. пособие / В. Ф. Самосейко. — СПб.: Элмор, 2007. — 464 с.

17. Быстродействующий адаптивный регулятор частоты вращения электродвигателя // заявка на изобретение № 2015145548; заявл. 22.10.2015 / В. А. Хомяк, В. Ф. Самосейко, И. В. Гагаринов, С. И. Шарашкин.

18. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2015663328 РФ. Программа для управления синхронной машиной с анизотропной магнитной проводимостью ротора с успокоительной обмоткой / В. А. Хомяк, В. Ф. Самосейко, С. В. Шарашкин, И. В. Белоусов, И. В. Гагаринов; заявитель и правообладатель Федеральное государственное унитарное предприятие «Крыловский государственный научный центр». — № 2015660165; заяв. 26.10.2015; опубл. 20.01.2016.

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, G. M. Minaev. "A frequency converter for a propelling electric motor." *Russian Electrical Engineering* 85.1 (2014): 45–52. DOI: 10.3103/S106837121401009X.

4. Khvatov, O. S., E. M. Burda, and G. I. Korobko. "Grebnaya elektricheskaya ustanovka kolesnogo sudna." *Kongress Mezhdunarodnogo foruma «Velikie reki»*. 2014. 223–227.

5. Anan'ev, S. S., and A. N. Golubev. "Asinkhronnyi elektroprivod s uluchshennymi vibroakusticheskimi po-kazatelyami." *Elektrichestvo* 8 (2008): 52–56.

6. Bykov, A. S. "Reversing services of the alternating-direct current." *Ekspluatatsiya morskogo transporta* 2 (2008): 74–75.

7. Grigor'ev, A. V., and Yu. A. Kulagin. "Theoretical basis of operation modes of ship shaft generator plants with frequency converters and synchronous compensators." *Vestnik gosudarstvennogo universiteta morskogo i rechnogo flota imeni admirala S.O. Makarova* 4(32) (2015): 164–169.

8. Tseluiko, I. G. "Razvitie elektrodvizheniya voennykh flotov v mire." *Molodoi uchenyi* 4 (2012): 54–57.

9. *Protokol sovmestnogo zasedaniya sektsii «Elektrotekhnicheskoe oborudovanie» NP «NTS EES» i NTS AO «NTTs FSK EES» po teme «Razrabotka i vnedrenie ventil'nykh elek-troprivodov na osnove ventil'nykh dvigatelei s vozbuzhdeniem ot postoyannykh magnitov» ot 15 marta 2016 g.* Moskva, 2016.

10. 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.

11. 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.

12. 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.

13. 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.

14. Glukhen'kii, T. V. Razrabotka i issledovanie bezdatchikovykh sistem upravleniya ventil'no-induktornymi elektrodvigatelyami. Abstract of PhD dis. Cheboksary, 2004.

15. Isakov, A. S. Sintez algoritmov upravleniya chastotno-reguliruemym elektroprivodom v usloviyakh informatsionnoi neopredelennosti. PhD diss. SPb., 2009.

16. Samoseiko, V. F. *Teoreticheskie osnovy upravleniya elektroprivodom: uchebnoe posobie*. SPb.: Elmor, 2007.

17. Khomyak, V. A., V. F. Samoseiko, I. V. Gagarinov and S. V. Sharashkin. RU 2015145548 A. The application for the invention. “Bystrodeistvuyustchiy adaptivnyi regulyanjh chastity vrastcheniya elektrodvigatelya”. Russian Federation, stated 22.10.2015.

18. RU 2015663328. Khomyak, V. A., V. F. Samoseiko, S. V. Sharashkin, I. V. Belousov, and I. V. Gagarinov. Certificate of state registration of the computer program. “Programma dlya upravleniya sinkhronnoi mashinoi s anizotropnoi magnitnoi provodimo-st’yu rotora s uspokoitel’noi obmotkoi.” Publ. 20 Jan. 2016.

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

Самосейко Вениамин Франциевич —
доктор технических наук, профессор
ФГБОУ ВО «ГУМРФ имени
адмирала С. О. Макарова»
198035, Российская Федерация, Санкт-Петербург,
ул. Двинская, 5/7
e-mail: *kaf_electroprivod@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, Санкт-Петербург,
ул. Двинская, 5/7
e-mail: *s_sharashkin@mail.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_electroprivod@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
e-mail: *s_sharashkin@mail.ru*

Статья поступила в редакцию 10 марта 2017 г.
Received: March 10, 2017.

ВЕСТНИК
ГОСУДАРСТВЕННОГО УНИВЕРСИТЕТА
МОРСКОГО И РЕЧНОГО ФЛОТА ИМЕНИ АДМИРАЛА С. О. МАКАРОВА

DOI: 10.21821/2309-5180-2017-9-2-402-413

CONSTRUCTION OF CONTROL SYSTEM OF DIFFERENTIAL SUBSYSTEM OF GLONASS/GPS WITH USE OF THE METHOD OF MATHEMATICAL PROCESSING OF SIGNAL PARAMETERS OF DIFFERENTIAL CORRECTION

S. F. Shakhnov, A. A. Ageeva

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

The paper discusses the problems of construction of highly effective from the technical and economic point of view regional system for monitoring and managing of the local differential subsystem of the global navigation satellite system GLONASS / GPS, which provides the control of integrity both of the satellite navigation system and its differential subsystem, as well as consumer notification of all contingencies. The optimal structure of the control and management system of the differential subsystem on inland waterways of Russia is proposed. This system uses mid-wave frequency control and correction stations and includes regional control and management center, a network of remote control and management stations and a network of remote control points providing the control of integrity of the differential subsystem with the required discreteness in time. It is established that the necessity for a branched network of remote control points is caused by the strong influence of the underlying surface on the propagation of radio waves of the medium-wave range, as well as by the presence of considerable industrial disturbances and mutual disturbances from adjacent control and correction stations. The options of construction of an information network for data exchange between the elements of the considering system are suggested. A new method of quality control of a signal of the differential correction was developed. This method is based on the mathematical processing of signal parameters and leads to a significant simplification of the equipment of remote control points and, as a result, to a significant increase of the economic efficiency of the system implementation. The correspondence of the error probability of the piece-by-piece receiving of digital signal of the differential correction message to the permissible error probability was chosen as one of the criteria for the quality assessing. An expression for the error probability for incoherent receiving under the influence of fluctuation noise and also concentrated disturbances is presented in the article. The algorithm for calculation of the error probability was obtained. It includes the determination of the signal energy and the concentrated disturbance at the receiving point and the coefficient of mutual difference of the signal and noise. The structural scheme and composition of the equipment realizing the given algorithm are given.

Keywords: differential subsystem, control and correction station, remote control point, differential correction, control of integrity, error probability, mutual noises, coefficient of mutual difference, disturbance energy, signal quality criteria.

For citation:
Shakhnov, Sergei F., and Aleksandra A. Ageeva. "Construction of control system of differential subsystem of GLONASS/GPS with use of the method of mathematical processing of signal parameters of differential correction." *Vestnik Gosudarstvennogo universiteta morskogo i rechnogo flota imeni admirala S.O. Makarova* 9.2 (2017): 402–413. DOI: 10.21821/2309-5180-2017-9-2-402-413.

УДК 656.629, 621.396

ПОСТРОЕНИЕ СИСТЕМЫ КОНТРОЛЯ ДИФФЕРЕНЦИАЛЬНОЙ ПОДСИСТЕМЫ ГЛОНАСС/GPS С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ МЕТОДА МАТЕМАТИЧЕСКОЙ ОБРАБОТКИ ПАРАМЕТРОВ СИГНАЛА ДИФФЕРЕНЦИАЛЬНОЙ ПОПРАВКИ

С. Ф. Шахнов, А. А. Агеева

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

В работе рассматриваются проблемы построения высокоэффективной, с технической и экономической точки зрения, региональной системы контроля и управления локальной дифференциальной подсисте-

мой глобальной навигационной спутниковой системы ГЛОНАСС/GPS, обеспечивающей контроль целостности как самой спутниковой навигационной системы, так и ее дифференциальной подсистемы, а также оповещение потребителей обо всех нештатных ситуациях. Предложена оптимальная структура системы контроля и управления дифференциальной подсистемой на внутренних водных путях России, использующей контрольно-корректирующие станции средневолнового диапазона частот, включающая в себя региональный центр контроля и управления, сеть удаленных контрольно-управляющих станций и сеть удаленных пунктов контроля, обеспечивающих контроль целостности дифференциальной подсистемы с требуемой дискретностью по времени. Установлено, что необходимость в разветвленной сети удаленных пунктов контроля обусловлена сильным влиянием подстилающей поверхности на распространение радиоволн средневолнового диапазона, а также наличием значительных индустриальных помех и взаимных помех от соседних контрольно-корректирующих станций. Предложены варианты построения информационной сети для обмена данными между звеньями рассматриваемой системы. Разработан новый метод контроля качества сигнала дифференциальной поправки, основанный на математической обработке параметров сигнала, приводящий к существенному упрощению аппаратуры удаленных пунктов контроля и, как следствие, к существенному повышению экономической эффективности внедрения системы. Одним из критериев оценки качества выбрано соответствие вероятности ошибки поэлементного приема цифрового сигнала сообщения дифференциальной поправки допустимой вероятности ошибки. Представлено выражение для вероятности ошибки при некогерентном приеме в условиях воздействия флуктуационного шума, а также сосредоточенных помех. Получен алгоритм расчета вероятности ошибки, включающий в себя определение энергетики сигнала и сосредоточенной помехи в точке приема и коэффициента взаимного различия сигнала и помех. Приведена структурная схема и состав аппаратуры, реализующей данный алгоритм.

Ключевые слова: дифференциальная подсистема, контрольно-корректирующая станция, удаленный пункт контроля, дифференциальная поправка, контроль целостности, вероятность ошибки, взаимные помехи, коэффициент взаимного различия, энергетика помехи, критерии качества сигнала.

Для цитирования:
Шахнов С. Ф. Построение системы контроля дифференциальной подсистемы ГЛОНАСС/GPS с использованием метода математической обработки параметров сигнала дифференциальной поправки / С. Ф. Шахнов, А. А. Агеева // Вестник Государственного университета морского и речного флота имени адмирала С. О. Макарова. — 2017. — Т. 9. — № 2. — С. 402–413. DOI: 10.21821/2309-5180-2017-9-2-402-413.

Введение

Повышение уровня безопасности плавания при навигации на внутренних водных путях (ВВП) России является одной из важнейших задач, стоящих перед внутренним водным транспортом. Ее решение связано с переходом от лоцманского метода судоходства к инструментальному, который позволяет в полной мере использовать высокую эксплуатационную скорость движения современных судов при одновременном повышении безопасности плавания, что особенно актуально в условиях постоянного роста интенсивности грузоперевозок на ВВП России. Развитие инструментальных методов проводки базируется на внедрении на речном флоте организационных и технических составляющих принятой Международной морской организацией (ИМО) концепции электронной навигации (e-Navigation), одной из основных составляющих которой является глобальная навигационная спутниковая система (ГНСС) ГЛОНАСС/GPS [1].

Особенностью использования спутниковых навигационных систем на ВВП являются высокие требования к точности позиционирования и дискретности определения целостности системы (соответствия спутников наблюдаемого созвездия их заданным эфемеридам). В зависимости от категории пути погрешность позиционирования на ВВП не должна превышать 1 – 5 м, а время принятия решения (при скорости 10 уз), и, следовательно, дискретность определения целостности системы — 20 – 30 с [2]. Указанная точность позиционирования для гражданских судов в настоящее время может быть обеспечена только при использовании дифференциального режима, создаваемого дифференциальной подсистемой ГНСС. При этом требуемая дискретность определения целостности системы может быть обеспечена только локальными дифференциальными подсистемами (ЛДПС), базирующимися на контрольно-корректирующих

станциях (ККС), работающих на границе MF-диапазона (283,5 – 325,0 кГц), дальность действия которых в речных условиях составляет порядка 200 – 400 км [3]. На таких расстояниях приемники ГНСС как ККС, так и судна используют при решении навигационной задачи одно и то же созвездие спутников. При этом в сообщения ККС, согласно международному стандарту RTSM SC 104 v. 2.2 (v. 2.3), помимо дифференциальной поправки (ДП), включается информация о номерах спутников, которые исключаются из рассмотрения при решении навигационной задачи и, следовательно, контроль целостности системы осуществляется практически в режиме реального времени [4].

При развертывании ЛДПС ГНСС на ВВП России возникла проблема контроля целостности не только ГНСС, но и самой ЛДПС, причем с той же высокой дискретностью. Частично эта проблема была решена уже на стадии разработки ККС, которая первоначально создавалась в морском варианте для обеспечения портовых акваторий и устьевых районов. Согласно [5], в состав ККС, помимо опорной станции (ОС), определяющей поправку и формирующей RTSM-сообщение для передачи потребителям, входит контрольная станция (КС), следящая за состоянием ОС и передатчика ККС и вносящая необходимые корректировки в работу этого оборудования, а также удаленная контрольно-управляющая станция (УКУС), следящая за состоянием сигнала дифференциальной поправки в одной удаленной точке.

Однако при работе ККС в речных условиях, возникли дополнительные проблемы, связанные с существенным влиянием неоднородной подстилающей поверхности на дальность распространения сигнала в MF-диапазоне [6], наличием существенных индустриальных помех [7], а также взаимных помех от соседних ККС [8]. Последнее объясняется значительными размерами речных бассейнов, что наряду с требованием обеспечения сплошного поля дифференциальной поправки, приводит к созданию в бассейнах ВВП цепочек ККС с перекрывающимися зонами действия, в областях пересечения которых и возникают взаимные помехи. Все это и привело к необходимости создания в каждом бассейне сетей удаленных пунктов контроля (УПК), объединяемых в единую систему контроля и управления ЛДПС ГНСС ГЛОНАСС/GPS и, соответственно, к необходимости проведения исследований в этой области [9]. В мировой практике подобные исследования еще не проводились, поэтому здесь необходимо опираться на фундаментальные труды в области создания сложных систем управления [10] и использовать опыт аналогичных работ, накопленный в смежных областях [11].

Целью представленного исследования является разработка методологии построения высокоэффективной с технической и экономической точек зрения региональной системы контроля и управления речной локальной дифференциальной подсистемой ГНСС ГЛОНАСС/GPS, базирующейся как на методах измерений, так и на методах математической обработки измеренных параметров.

Методология построения системы контроля и управления дифференциальной подсистемой ГНСС ГЛОНАСС/GPS

Организационно система контроля и управления ККС ЛДПС, так же, как и сама ЛДПС, в качестве звена нижнего уровня входит в разворачиваемую в настоящее время на ВВП России инфокоммуникационную триаду: КРИС (корпоративная речная информационная система) – РИС (речная информационная служба) – АСУ ДС (автоматизированная система управления движением судов). Поэтому эффективный синтез региональных систем контроля и управления дифференциальным полем, формируемым ЛДПС ГНСС ГЛОНАСС/GPS, возможен только при комплексном рассмотрении всей глобальной системы в целом и ее внутренних связей между различными подсистемами. Т. е. синтез дифференциальных подсистем производится с учетом структуры и целеполагания систем верхнего уровня, каковыми являются перспективные КРИС – РИС – АСУ ДС, что позволит эффективно использовать выделяемые ресурсы и в полной мере обеспечить решение задачи повышения безопасности и эффективности судоходства на ВВП.

На первом этапе построения региональных систем контроля и управления ККС ЛДПС проводилось концептуальное исследование, которое осуществлялось на базе системного подхода [12]. Здесь требуется выбрать рациональный вариант структуры системы так, чтобы потенциальная эффективность этой системы в операции, направленной на достижение цели, была наибольшей. Заканчивается концептуальное исследование формированием рациональных требований к системе, которое достигается детальным исследованием технического и технико-экономического характера. Синтез систем контроля и управления дифференциальным полем относится к классу задач, для решения которых производится выработка варианта построения системы, в которой поставленная цель достигается при минимуме потребных ресурсов. В данном случае под ресурсом подразумевается мощность и количество передатчиков, стоимость выделяемых каналов связи, сложность и стоимость измерительной аппаратуры, численность и квалификация обслуживающего персонала и т. д.

В соответствии с Кодексом внутреннего водного транспорта Российской Федерации, ответственность за безопасность судоходства и, в частности, за навигационно-гидрографическое обеспечение условий плавания судов по ВВП, возлагается на бассейновые органы государственного управления на внутреннем водном транспорте, т. е. федеральные бассейновые управления (ФБУ) Администраций бассейнов. Развертывание РИС в рамках единой КРИС, так же как и внедрение речных ЛДПС ГНСС в рамках ФЦП «Глобальная навигационная система», осуществляется по бассейновому принципу, с перспективой обслуживания оборудования ККС после ввода их в эксплуатацию службами связи и радионавигации соответствующих Администраций бассейнов. В связи с большим объемом задач и особой важностью передаваемой информации для обеспечения безопасности судоходства региональную систему управления и контроля дифференциальной подсистемой ГНСС, разворачиваемую в пределах административных границ Администрации бассейна, также рационально создавать на базе Бассейновой службы оповещения в каждой Администрации бассейна. В целях экономии материальных и человеческих ресурсов речные ККС выполняются в автоматическом варианте. При этом КС вместе с рабочим местом оператора вынесена из ККС и располагается в УКУС.

Кроме того, в силу неоднородности подстилающей поверхности, влияющей на дальность распространения радиоволн в MF-диапазоне и, соответственно, на целостность поля дифференциальной поправки на ВВП, а также существенного изменения параметров подстилающей поверхности в течение навигационного периода, помимо УКУС, дополнительно необходимо использовать сеть удаленных пунктов контроля (УПК), представляющих собой автоматические центры записи и передачи параметров поля дифференциальной поправки, создаваемого ККС ЛДПС, и обеспечивающих оперативный контроль за качеством сигнала ДП на границах зон действия ККС.

Объединяющим элементом системы контроля и управления ККС ЛДПС является региональный центр управления и контроля (РЦУК), в задачи которого входит:

– гарантированное обеспечение высокоточной навигацией потребителей системы ГЛОНАСС на ВВП в зоне ответственности Администрации бассейна;

– компенсация последствий для потребителей возможного введения селективного доступа к гражданским сигналам системы GPS;

– обеспечение потребителей информацией о целостности ГНСС;

– непрерывный мониторинг параметров ККС из удаленных точек ее рабочей зоны;

– обеспечение целостности дифференциальной подсистемы;

– обеспечение информацией о целостности ДГНСС центра управления (ЦУ) соответствующей РИС, а также ЦУ РИС смежных бассейнов.

Структурная схема предлагаемой региональной системы управления и контроля ЛДПС представлена на рис. 1.

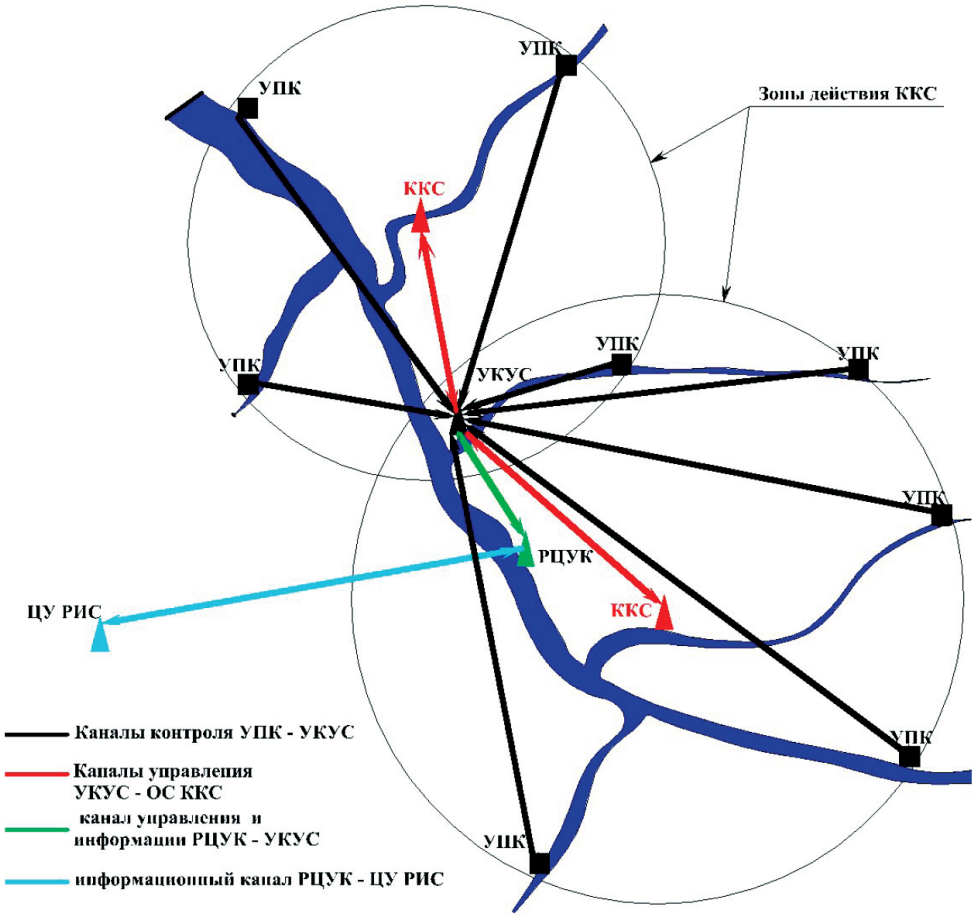


Рис. 1. Структура системы контроля и управления ККС ЛДПС

Исходя из целеполагания и структуры вышестоящей инфокоммуникационной триады, а также из целевой функции, определяющей минимизацию затрат материальных и технических ресурсов, РЦУК должен располагаться в бассейновом узле связи (БУС) соответствующего ФБУ, что позволяет существенно сэкономить ресурсы и обеспечить центр квалифицированным персоналом. По этим же причинам УКУС будут располагаться в линейных узлах связи (ЛУС).

Наибольшее влияние на обеспечение целевой функции, определяющей минимизацию затрат материальных и технических ресурсов, будет оказывать расположение и состав оборудования многочисленных УПК. При расположении контрольных точек вблизи ЛУС, УПК должны располагаться в этих структурах. В этом случае для создания сетей связи УПК – УКУС, так же, как и линии связи УКУС – РЦУК, могут быть использованы уже имеющиеся в ЛУС и БУС высокоскоростные выделенные линии сети Интернет. При расположении УПК в сельской местности, в зонах, где отсутствует покрытие высокоскоростной связью GSM технологии 4G и возможность подключения к выделенным линиям сети Интернет, для создания каналов связи УПК – УКУС может быть рекомендовано оборудование спутниковой связи технологии VSAT, стоимость которого, а также стоимость услуг связи в последнее время существенно снизились.

Основная минимизация затрат на создание региональной системы управления и контроля ЛДПС будет определяться составом измерительного оборудования многочисленных УПК и способами обработки представляемой информации.

В настоящее время существует только один сертифицированный вариант контрольно-измерительного оборудования для ККС — аппаратура мобильного мониторинга (АММ) КБ «Навис», которая должна устанавливаться в УКУС. Главным недостатком данной аппаратуры является ее высокая стоимость (около 500 тыс. руб. за комплект), что делает создание на ее базе региональ-

ной сети УПК экономически нецелесообразным. Высокая стоимость АММ объясняется двумя причинами: неспецифичностью оборудования для УПК и способом контроля качества передаваемого сигнала ДП.

Под неспецифичностью здесь понимается наличие широкого спектра функций, которые не используются при контроле параметров поля ДП в УПК, т. е. оборудование АММ не разработано специально под задачи, решаемые УПК и имеет широкий набор функций, в которых нет необходимости. Функциональная схема оборудования АММ приведена на рис. 2.

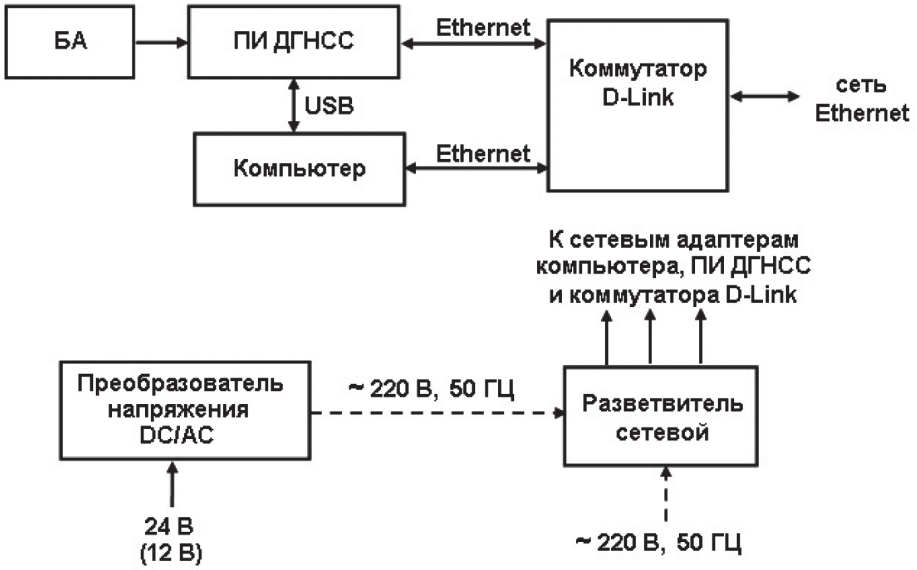


Рис. 2. Функциональная схема АММ ККС

АММ ККС предназначена для контроля работы дифференциальных станций методом оценки качества корректирующей информации, вырабатываемой ККС, обеспечивая:

– прием и обработку сигналов ГНСС ГЛОНАСС и GPS;

– автоматическую непрерывную выработку координат с учетом принятых дифференциальных поправок, времени, курса и скорости движения;

– оценку точности определения координат места потребителя;

– прием, хранение и обновление альманахов ГНСС ГЛОНАСС и GPS;

– автоматический выбор созвездия из видимых НКА ГНСС ГЛОНАСС и GPS с учетом их технического состояния;

– прием и обработку сигналов ДП в соответствии с требованиями стандарта RTCM 10402.3;

– оценку качества принимаемого сигнала ДП (по уровню сигнала и соотношению сигнал / шум);

– автоматический контроль функционирования, индикацию неисправностей и отказов.

Из всех приведенных функций, для работы УПК необходимы только последние три, поэтому создание специализированного комплекта оборудования позволит существенно снизить стоимость аппаратуры УПК. Также значительного снижения стоимости оборудования УПК и его эксплуатации можно добиться изменением способа контроля качества передаваемого сигнала ДП. В аппаратуре АММ качество сигнала ДП контролируется путем измерения уровня сигнала и отношения сигнал / шум, а также посредством приема RTSM-сообщения, декодирования и определения количества ошибок. Основную стоимость при этом составляет аппаратура приема и декодирования RTSM-сообщения, а также стоимость объемного трафика между УПК и УКУС.

Авторами предлагается принципиально иной способ контроля качества сигнала ДП, основанный на вычислении вероятности ошибки поэлементного приема цифрового сообщения ($p_{\text{ерг}}$). Критерием качества принимаемого сигнала ДП в этом случае будут условия:

$$\begin{cases} p_{\text{err}} < p_{\max} \\ E_s > E_{\min} \\ E_s / E_n > M \end{cases}, \quad (1)$$

где $p_{\max}$ — допустимая вероятность ошибки поэлементного приема цифрового сообщения; E_s — напряженность поля сигнала в точке приема; $E_{\min}$ — чувствительность приемника; E_n — напряженность поля помехи в точке приема; E_s/E_n — отношение сигнал / шум; M — пороговое значение отношения сигнал / шум.

Программное обеспечение для вычисления вероятности ошибки устанавливается на ПК в УКУС. Тогда структурная схема оборудования УПК примет вид (рис. 3).

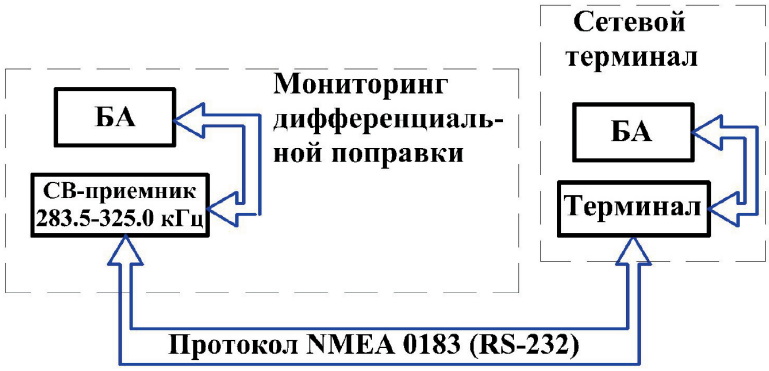


Рис. 3. Структурная схема оборудования УПК

Таким образом, аппаратура УПК будет включать в себя только приемник MF-диапазона с блоком антенным (БА), измеряющий уровень сигнала и отношение сигнал/шум, и терминал связи. При этом объем трафика по линии УПК – УКУС сокращается на несколько порядков, так как RTSM-сообщения обратно не транслируются, а передается только три контролируемых параметра.

Метод математической обработки параметров ДП, снимаемых аппаратурой УПК

Рассмотрим наиболее тяжелый случай — незамирающий сигнал и замирающая по релеевскому закону взаимная помеха. Взаимные помехи, так же как и полезный сигнал, в нашем случае являются цифровыми с фазовой манипуляцией несущей. Кроме того, спектры фазоманипулированных сигналов являются перекрывающимися. Тогда при некогерентном приеме вероятность ошибки поэлементного приема цифрового сообщения будет определяться выражением [13]

$$p_{\text{err}} = -0,5\exp\left[-\frac{h_{\text{eq}}{}^2}{2}\right]\cdot I_0(R_0 h_{\text{eq}}^2) + Q\left[\sqrt{\frac{h_{\text{eq}}^2}{2}\left(1-\sqrt{1-R_0^2}\right)};\sqrt{\frac{h_{\text{eq}}^2}{2}\left(1+\sqrt{1-R_0^2}\right)}\right], \quad (2)$$

где Q — функция Маркума ($Q(y,z) = \int_z^\infty x\exp\left[-\frac{(x^2+y^2)}{2}\right]\cdot I_0(yx)dx$); $I_0(R_0 h_э^2)$, $I_0(yx)$ — модифицированные функции Бесселя первого рода, нулевого порядка; $I_0(z) = \frac{1}{\pi}\int_0^\pi \exp(\pm z\cos\theta)d\theta$); h_{eq}^2 — эквивалентная энергетика сигнала при воздействии взаимных помех; R_0, δ — параметры радиолинии ($R_0 = \delta/(1-\delta)$)).

Для противоположных незамирающих сигналов и взаимных помех:

$$\delta = \sum_{k=1}^{N} \frac{g_{0k}^2 h_{nk}^2}{1 + h_{nk}^2}; \tag{3}$$

$$h_{eq}^2 = h_s^2 \left[1 - \sum_{k=1}^{N} \frac{g_{0k}^2 h_{nk}^2}{1 + h_{nk}^2} \right] = h_s^2 (1 - \delta), \tag{4}$$

где g_{0k}^2 — нормированный коэффициент взаимного различия сигнала и k-й помехи; h_s^2, h_{nk}^2 — энергетика сигнала и k-й помехи соответственно; N — число взаимных помех.

Здесь энергетика сигнала или помехи — безразмерная величина, определяемая выражением

$$h^2 = \frac{PT}{\nu^2}, \tag{5}$$

где P — мощность сигнала или помехи на входе приемника; T — длительность посылки сигнала; ν^2 — спектральная плотность белого флуктуационного шума.

Так как сигнал и взаимные помехи имеют одинаковую структуру, в этом случае для оценки сверху (сдвиг начала манипуляции помехи относительно сигнала равен нулю) нормированный коэффициент взаимного различия будет определяться выражением [14]:

$$g_{0k}^2 = \left\{ \frac{\sin[0,5\Omega_{nk}T]}{0,5\Omega_{nk}T} \right\}^2, \tag{6}$$

где Ω_{nk} — расстройка несущей частоты сигнала и помехи.

Мощность сигнала на входе приемника определяется известным выражением

$$P = \frac{E^2 S_{eff}}{120\pi}, \tag{7}$$

где S_{eff} — эффективная площадь антенны.

Тогда алгоритм обработки параметров поля сигнала будет следующим. Измеренная напряженность поля сигнала и помех передается в УКУС. В процессоре ПК с помощью установленной программы обработки по формуле (7) вычисляется мощность сигнала и помех. Затем по (5) – (6) вычисляются энергетика сигнала и помех и коэффициенты взаимного различия. Далее по (3) – (4) вычисляются параметры радиолинии и эквивалентная энергетика сигнала при наличии помех. По полученным данным из формулы (2) находят вероятность ошибки поэлементного приема цифрового сообщения и оценивают качество принимаемого сигнала по критерию (1).

Обсуждение

На рис. 4 приведена структура перспективной региональной систем контроля и управления дифференциальным полем, формируемым локальными функциональными дополнениями ГНСС ГЛОНАСС/GPS в зоне ответственности ФБУ Администрация Волго-Балтийского бассейна судоходства. Как видно из рисунка, в системе контроля имеется 11 УПК, семь из которых расположены в ЛУС и будут иметь высокоскоростной выход в Интернет. Поэтому в качестве терминала связи в них будут устанавливаться маршрутизаторы сети Интернет, которые предоставляются провайдерами бесплатно.

В остальных УПК в качестве терминала связи будет использоваться комплект спутникового оборудования технологии VSAT (ориентировочная стоимость одного комплекта 30 тыс. руб.). При установке в каждом УПК сертифицированного АММ КБ НАВИС общая стоимость оборудования всех УПК без стоимости установки составит 5 млн 620 тыс. руб. (11·500 + 4·30).

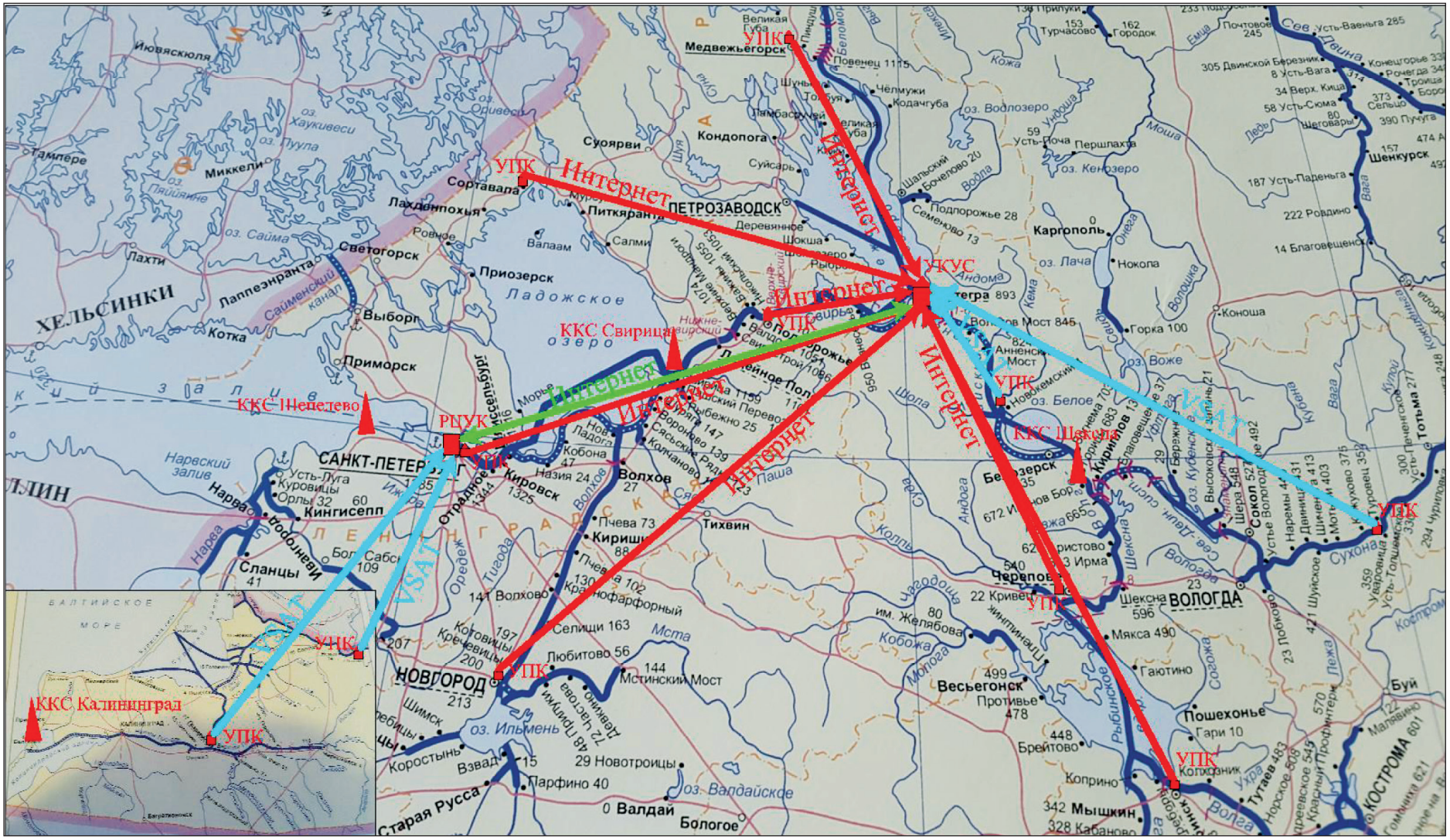


Рис. 4. Структура информационной сети региональной системы контроля и управления дифференциальным полем ФБУ «Администрация Волго-Балт»

Как видно из этого примера, основную стоимость составляет оборудование контроля качества сигнала ДП. При использовании предлагаемого метода математической обработки параметров сигнала в качестве измерительной аппаратуры для УПК может быть предложен приемник ПКИ-Х4 (рис. 5), собранный на одной печатной плате.

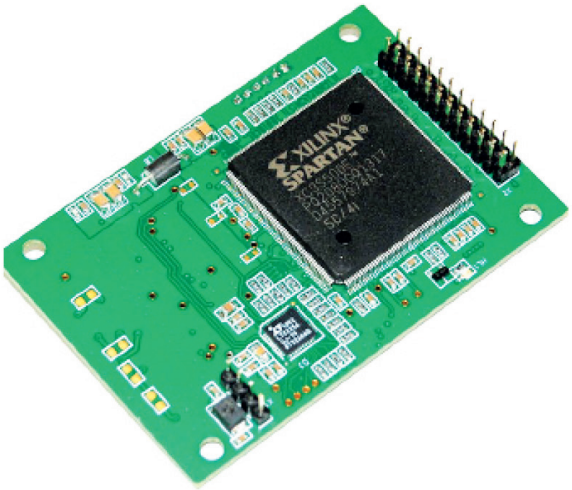


Рис. 5. Внешний вид ПКИ-Х4

Плата может быть установлена как в корпусе ПК, так и в отдельном корпусе. Стоимость данного прибора вместе с антенной составляет около 30 тыс. руб. В этом случае общая стоимость оборудования всех УПК составит 450 тыс. руб. (11·30 + 4·30).

Таким образом, благодаря внедрению предложенного алгоритма математической обработки параметров сигнала, стоимость оборудования УПК в рассмотренном примере может быть снижена на порядок. Кроме того, в связи с крайне незначительным объемом трафика, даже при расположении УПК в сельской местности, где отсутствует покрытие сетью связи стандарта GSM-технологии 4G, в перспективе, по мере охвата этих районов технологиями 3G или 2G, появится возможность даже в них отказаться от спутникового оборудования связи.

Параметры M, N, T, v^2, p_{max}, E_{min}, Ω_{nk} и S_{eff}, входящие в выражения (2) – (7), являются заданными. Порог чувствительности приемника ДП (E_{min}) составляет 23 дБ·мкВ. Минимальное соотношение сигнал/шум (M), обеспечивающее надежный прием сигнала, составляет 10 дБ. Длительность посылки импульса (T), согласно стандарту RTSM SC 104 v. 2.2 (v. 2.3), составляет 10 мс. Также в соответствии с этим стандартом, длина RTSM-сообщения составляет 700 бит, поэтому допустимая вероятность поэлементного приема (p_{max}), обеспечивающая верность принятия сообщения, составляет 10^{-3}. Число взаимных помех (N), определяется количеством ККС, доступных в точке установки УПК. Расстройка частоты сигнала и помехи (Ω_{nk}) определяется разностью несущих частот ККС, доступных в точке установки УПК.

Заключение

1. В работе обоснована необходимость создания системы постоянного контроля за дифференциальной подсистемой ГНСС ГЛОНАСС/GPS.

2. Представлена концепция построения эффективной структуры системы контроля и управления, как составной части инфокоммуникационной триады: КРИС – РИС – АСУ ДС.

3. Обоснована необходимость создания широкой сети УПК, обусловленная существенным влиянием подстилающей поверхности на топологию поля ДП и изменчивостью ее электрических параметров в течение навигационного периода.

4. Предложен новый метод оценки целостности параметров дифференциальной подсистемы по критерию соответствия вероятности ошибки поэлементного приема ее допустимому значению, основанный на математической обработке параметров сигнала ДП.

5. Разработан алгоритм расчета вероятности ошибки в условиях влияния флуктуационных и взаимных помех, достаточно простой в реализации. Для создания программного обеспечения метода может быть использовано любое известное приложение, имеющее готовые подпрограммы расчета функций Маркума и Бесселя (Mathlab, Mathcad и т. д.).

Использование предложенного метода позволяет существенно упростить аппаратуру УПК и, соответственно, снизить расходы по развертыванию системы управления и контроля. Также применение данного метода приводит к существенному снижению трафика и, как следствие, возможности во многих случаях отказаться от аппаратуры спутниковой связи на линиях УПК – УКУС. В качестве направления дальнейших исследований по данной теме может быть предложено рассмотрение возможности учета влияния индустриальных помех при расчете вероятности ошибки поэлементного приема, а также вопросы построения полностью автоматической системы оповещения потребителей о нештатных ситуациях в дифференциальной подсистеме.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Вагущенко Л. Л.* Современные информационные технологии в судовождении / Л. Л. Вагущенко. — Одесса: ОНМА, 2013. — 135 с.

2. *Каретников В. В.* Использование речной дифференциальной подсистемы ГЛОНАСС/GPS на внутренних водных путях Российской Федерации при проведении путевых работ / В. В. Каретников, Р. В. Волков, Г. В. Киселевич // Вестник Государственного университета морского и речного транспорта имени адмирала С. О. Макарова. — 2015. — № 3 (31). — С. 63–68.

3. *Каретников В. В.* Топология дифференциальных полей и дальность действия контрольно-корректирующих станций высокоточного местоопределения на внутренний водных путях / В. В. Каретников, А. А. Сикарев. — СПб.: Изд-во СПГУВК, 2008. — 352 с.

4. RTSM Recommended Standards for Differential GNSS Service, Future Version 2.2, RTSM Paper 88-97 / SC 104-156, July 15, 1977.

5. ГОСТ Р 56055. Глобальная навигационная спутниковая система. Морская дифференциальная подсистема. Проектирование контрольно-корректирующих станций. Общие требования. — М: Стандартинформ, 2015. — 18 с.

6. *Шахнов С. Ф.* Расчет функции ослабления поля контрольно-корректирующих станций с учетом влияния подстилающей поверхности / С. Ф Шахнов // Вестник Государственного университета морского и речного транспорта имени адмирала С. О. Макарова. — 2015. — № 1 (29). — С. 116–123.

7. *Шахнов С. Ф.* Виды индустриальных помех и их влияние на радиолинии дифференциальных подсистем речных АСУ движением судов / С. Ф. Шахнов // Информатизация и связь. — 2015. — № 1. — С. 33–36.

8. *Шахнов С. Ф.* К расчету помехозащищенности радиоканалов речной локальной дифференциальной подсистемы при использовании детерминированных сигналов и взаимных помех / С. Ф. Шахнов // Вестник Государственного университета морского и речного транспорта имени адмирала С. О. Макарова. — 2014. — № 6 (28). — С. 24–30.

9. *Каретников В. В.* Построение системы управления и контроля высокоточным дифференциальным полем ГНСС ГЛОНАСС на Северном морском пути / В. В. Каретников, И. В. Пащенко, А. И. Соколов // Вестник Государственного университета морского и речного транспорта имени адмирала С. О. Макарова. — 2015. — № 6 (34). — С. 166–172.

10. *Квейд Э.* Анализ сложных систем: пер. с англ. / Э. Квейд. — М.: Сов. радио, 1979. — 519 с.

11. *Курносов В. И.* Методология проектных исследований и управления качеством сложных технических систем электросвязи / В. И. Курносов, А. М. Лихачев. — СПб.: Тирекс, 1999. — 496 с.

12. *Месарович М.* Общая теория систем: математические основы / М. Месарович, Я. Такахара; пер. с англ. Э. Л. Наппельбаума; под ред. В. С. Емельянова. — М.: Мир, 1978. — 312 с.

13. *Шахнов С. Ф.* Помехозащищенность и устойчивость радиолиний речных дифференциальных подсистем ГНСС ГЛОНАСС/GPS: монография / С. Ф. Шахнов. — СПб.: ФГАОУ ВО «Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого», 2015. — 170 с.

14. *Сикарев И. А.* Методология расчета помехозащищенности радиоканалов речной локальной дифференциальной подсистемы ГЛОНАСС/GPS / И. А. Сикарев, С. Ф. Шахнов, Г. В. Киселевич // Проблемы информационной безопасности. Компьютерные системы. — 2015. — № 1. — С. 88–93.

REFERENCES

1. Vagushchenko, L. L. *Sovremennye informatsionnye tekhnologii v sudovozhdenii*. Odessa: «ONMA», 2013.

2. Karetnikov, V. V., R. V. Volkov, and G. V. Kiselevich. "To the question of use river differential subsystem GLONASS / GPS on the inland Russian waterways at carrying out of track works." *Vestnik Gosudarstvennogo universiteta morskogo i rechnogo transporta imeni admirala S.O. Makarova* 3(31) (2015): 63–68.

3. Karetnikov, V. V., and A. A. Sikarev. *Topologiya differentsial'nykh polei i dal'nost' deistviya kontrol'no-korrektiruyushchikh stantsii vysokotochnogo mestoopredeleniya na vnutrennii vodnykh putyakh*. SPb.: SPGUVK, 2008.

4. RTSM Recommended Standards for Differential GNSS Service, Future Version 2.2, RTSM Paper 88-97 / SC 104-156, July 15, 1977.

5. Russian Federation. State Standart GOST R 56055. Global navigation satellite system. Maritime differential subsystem. Reference integrity monitoring stations design. General requirements. M: Standartinform , 2015.

6. Shakhnov, S. F. "Calculation of function field weakening of the control and correction stations taking into account the influence of the underlying surface." *Vestnik Gosudarstvennogo universiteta morskogo i rechnogo transporta imeni admirala S.O. Makarova* 1(29) (2015): 116–123.

7. Shakhnov, S. F. "Types of industrial disturbances and its impact on radiolines of the differential subsystems of river AIS vessel traffic." *Informatization and communication* 1 (2015): 33–36.

8. Shakhnov, S. F. "To calculation of the noise-protection of the radio channels of river LDSS with the use of the deterministic signals and mutual disturbances." *Vestnik Gosudarstvennogo universiteta morskogo i rechnogo transporta imeni admirala S.O. Makarova* 6(28) (2014): 24–30.

9. Karetnikov, Vladimir Vladimirovich, Ivan Vladimirovich Pashchenko, and Andrei Igorevich Sokolov. "Bilding a sistem of management and control high-prececision differental field GLONASS on the Northern Sea Route." *Vestnik Gosudarstvennogo universiteta morskogo i rechnogo transporta imeni admirala S.O. Makarova* 6(34) (2015): 166–172.

10. Kveid, E. *Analiz slozhnykh sistem*. M.: Sov.radio, 1979.

11. Kurnosov, V. I., and A. M. Likhachev. *Metodologiya proektnykh issledovanii i upravleniya kachestvom slozhnykh tekhnicheskikh sistem elektrosvyazi*. SPb.: Tireks, 1999.

12. Mesarovich, M., and Ya. Takakhara. *Obshchaya teoriya sistem: matematicheskie osnovy.* Edited by V. S. Emel'yanov. M.: Mir, 1978.

13. Shakhnov, S. F. *Pomekhozashchishchennost' i ustoichivost' radiolinii rechnykh differentsial'nykh podsistem GNSS GLONASS/GPS: monografiya*. SPb.: Federal'noe gosudarstvennoe avtonomnoe obrazovatel'noe uchrezhdenie vysshego obrazovaniya "Sankt-Peterburgskii politekhnicheskii universitet Petra Velikogo", 2015.

14. Sikarev, I. A., S. F. Shakhnov, and G. V. Kiselevich. "Methodology of the calculation of the noise protection of the radio channels of river local differential subsystem GLONASS/GPS." *Information Security Problems. Computer Systems* 1 (2015): 88–93.

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

Шахнов Сергей Федорович —
доктор технических наук, профессор
ФГБОУ ВО «ГУМРФ имени
адмирала С. О. Макарова»
198035, Российская Федерация, Санкт-Петербург,
ул. Двинская, 5/7
e-mail: *sfshah@yandex.ru*, *kaf _svvp@gumrf.ru*
Агеева Александра Анатольевна —
специалист по НТИ
ФГБОУ ВО «ГУМРФ имени
адмирала С. О. Макарова»
198035, Российская Федерация, Санкт-Петербург,
ул. Двинская, 5/7
e-mail: *ageevaalexandra.gumrf@gmail.com*

INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Shakhnov, Sergei 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: *sfshah@yandex.ru*, *kaf _svvp@gumrf.ru*
Ageeva, Aleksandra A. —
Specialist in scientific and technical information
Admiral Makarov State University
of Maritime and Inland Shipping
5/7 Dvinskaya Str., St. Petersburg 198035,
Russian Federation
e-mail: *ageevaalexandra.gumrf@gmail.com*

Статья поступила в редакцию 15 марта 2017 г.
Received: March 15, 2017.

ВЕСТНИК
ГОСУДАРСТВЕННОГО УНИВЕРСИТЕТА
МОРСКОГО И РЕЧНОГО ФЛОТА ИМЕНИ АДМИРАЛА С. О. МАКАРОВА

DOI: 10.21821/2309-5180-2017-9-2-414-421

THE MODERNIZATION OF MANAGEMENT SYSTEM OF ELECTRICAL POWER PLANT OF THE FISHING VESSEL WITH CONTROLLABLE PITCH PROPELLER

A. A. Zhelezniak

Kerch State Marine Technological University, Kerch,
Republic of Crimea, Russian Federation

The article considers an actual problem of ensuring of stability is considered in case of parallel operations two and more diesel and the shaft generator of aggregates as a part of autonomous electrical power system of the fishing vessel with the controllable pitch propeller where use of similar devices is perspective and demanded, but difficult to achieve in connection with high dependence of frequency of the current generated by similar aggregates from a status of a surface of the propeller, a status of a surface of the casing, resistance of a trawl, ice situation, density of water, depth of a waterway, the partial stripping of the propeller and to essential oscillations of rotating speed of the principal engine. The method of increase in stabilizing of processes in aggregates of ship electrical power plant (SEPP) and supports of their rated characteristics in the conditions of existence of destabilizing operational factors is offered. The method is based on compensating of influence of destabilizing operational factors on response characteristics of transient phenomena on the frequency of aggregates of ship electrical power plant. Implementation of the described approach is offered, results of simulation are provided. The skeleton diagram of the adaptive system of automatic control of excitation of the synchronous generator allowing to research processes of oscillations of its frequency and to develop the principles of effective management of it was developed. The mathematical description of the moment on a generator shaft taking into account the provided coefficients of destabilizing factors was developed for its synthesis. It allows not only to ensure stable parallel functioning of the diesel generator with a shaft generator, but also, as a result, to exercise effective management of electric power parameters in independent power industry, to develop means and methods of support of necessary figures of merit of the electric power made principal and auxiliary energetic by installations.

Keywords: modeling, the sliding regulator, the main engine, a shaft generator, the ship electrical power plant, destabilizing factors.

For citation:
Zhelezniak, Aleksandr A. "The modernization of management system of electrical power plant of the fishing vessel with controllable pitch propeller." *Vestnik Gosudarstvennogo universiteta morskogo i rechnogo flota imeni admirala S. O. Makarova* 9.2 (2017): 414–421. DOI: 10.21821/2309-5180-2017-9-2-414-421.

УДК 621.3: 621.43

МОДЕРНИЗАЦИЯ СИСТЕМЫ УПРАВЛЕНИЯ ЭЛЕКТРОЭНЕРГЕТИЧЕСКОЙ УСТАНОВКИ ПРОМЫСЛОВОГО СУДНА С ВИНТОМ РЕГУЛИРУЕМОГО ШАГА

А. А. Железняк

ФГБОУ ВО «Керченский государственный морской технологический университет»,
Керчь, Республика Крым, Россия

Рассматривается актуальная задача обеспечения устойчивости при параллельной работе двух и более дизель- и валогенераторных агрегатов в составе автономной электроэнергетической системы промыслового судна с винтом регулируемого шага, где использование подобных устройств является перспективным и востребованным, но трудноосуществимым в связи с высокой зависимостью частоты тока, генерируемого подобными агрегатами, от состояния поверхности винта, состояния поверхности корпуса, сопротивления трала, ледовой обстановки, плотности воды, глубины фарватера, частичного оголения винта и существенных колебаний частоты вращения главного двигателя. Предложен способ повышения стабилизации процессов в агрегатах судовых электроэнергетических установок и обеспечения их номинальных характеристик в условиях наличия дестабилизирующих эксплуатационных факторов. Способ основан на компенсации влияния дестабилизирующих эксплуатационных факторов на динамические характеристики переходных процессов по частоте агрегатов судовой электроэнергетической установки.

Предложена реализация описанного подхода, представлены результаты моделирования. Разработана структурная схема адаптивной системы автоматического управления возбуждением синхронного генератора, позволяющая исследовать процессы колебания его частоты и разрабатывать принципы эффективного управления ею. Для его синтеза разработано математическое описание момента на валу генератора с учетом значимости дестабилизирующих факторов. Это позволяет не только обеспечить стабильную параллельную работу дизель-генератора с валогенератором, но и, как следствие, осуществлять эффективное управление параметрами электроэнергии в автономной электроэнергетике, разрабатывать средства и методы обеспечения необходимых показателей качества электроэнергии, производимой главной и вспомогательной энергетическими установками.

Ключевые слова: моделирование, скользящий регулятор, главный двигатель, валогенератор, судовая электроэнергетическая установка, дестабилизирующие факторы.

Для цитирования:
Железняк А. А. Модернизация системы управления электроэнергетической установки промыслового судна с винтом регулируемого шага / А. А. Железняк // Вестник Государственного университета морского и речного флота имени адмирала С. О. Макарова. — 2017. — Т. 9. — № 2. — С. 414–421. DOI: 10.21821/2309-5180-2017-9-2-414-421.

Введение

Работа главного двигателя (ГД) при плавании на волнении характеризуется увеличением нагрузки по крутящему моменту из-за роста сопротивления движению судна и естественной переменчивости этой нагрузки. На судах большого тоннажа волнение оказывает малое влияние на крутящий момент ГД, но на судах малого тоннажа, таких как рыбопромысловые суда, волнение может приводить к частичному оголению винта и существенным колебаниям частоты вращения ГД, достаточным, например, для невозможности включения валогенератора на параллельную работу с основным дизель-генератором судна, что снижает энергоэффективность и экономичность судовой энергетической установки (СЭУ). Изменения погружения винта регулируемого шага воспринимаются прежде всего регулятором частоты вращения дизеля, и только при нагрузке ГД за пределами ограничительной характеристики (при положении топливной рейки на упоре) начинает действовать регулятор нагрузки, посылая сигнал на механизм изменения шага винта, и срабатывает устройство редукции шага. В результате в условиях волнения до 7 – 9 баллов колебания частоты вращения вала ГД механизмом изменения шага винта не стабилизируются [1].

Таким образом, в процессе эксплуатации двигателей СЭУ вследствие изменения внешних условий, разрегулировки отдельных его агрегатов и узлов, а также их износа параметры работы валогенератора при одном и том же числе оборотов двигателя не будут соответствовать номинальным характеристикам. Из-за износа деталей регулятора частоты вращения нарушаются его настройки, изменяются динамические характеристики элементов систем автоматического управления ГД. Это может привести к дополнительному увеличению амплитуды и продолжительности колебаний частоты вращения ГД.

Методы и материалы

При решении поставленных задач использовался математический аппарат современной теории автоматического управления, система уравнений Парка–Горева для синхронных генераторов, методы систем с переменной структурой (скользящие режимы) и нечеткой логики.

В современной научной и технической литературе по теории управления освещено два подхода к проблеме анализа и синтеза систем регулирования:

– первый [2] основан на использовании передаточных функций, частотных характеристик либо корневого годографа;

– второй основан на описании динамики объектов системами дифференциальных или разностных уравнений первого порядка с помощью матричных уравнений и схем переменных состояний [3] – [4].

Традиционные методы получили большое распространение, и с их помощью в настоящее время проектируется большинство систем регулирования. Отличительной особенностью этих методов является так называемая *робастность* (или грубость), что означает нечувствительность (относительно малое влияние) замкнутых систем к погрешностям, возникающим при переходе физической системы к ее математическому представлению (математической модели). Это полезное свойство *робастности* систем достигается применением обратных связей, которые, в какой-то степени, линеаризуют нелинейные системы и уменьшают чувствительность систем к вариации параметров. Теория обратных связей в этом методе имеет существенное значение, так как она не только линеаризует систему, не только уменьшает чувствительность, но и компенсирует недостаток сведений об объекте и внешних (возмущающих воздействиях) условиях его работы. В последние годы разрабатываются новые методы синтеза [5], которые в большей степени зависимы от точности задания модели. При проектировании сложных систем современная теория управления успешно конкурирует с традиционными методами проектирования, так как обладает большими возможностями.

Таким образом, для компенсации влияния дестабилизирующих факторов на динамику ГД, от которого зависит работа валогенератора, было предложено использование регулятора скользящего режима. Для его проектирования и эффективной работы необходимы числовые оценки пределов изменения момента главного двигателя от дестабилизирующих факторов.

Результаты

Влияние дестабилизирующих факторов на каждый из двигателей, приводящих во вращение гребной винт, и параллельно работающие генераторы, включая валогенераторы, различны. Вследствие этого вращающие моменты и динамические характеристики двигателей также различны, из чего следует, что параметры переходных процессов изменения частоты вращения и углов нагрузки генераторов также различаются [6]. В результате исследований установлено, что условия плавания судна изменяют момент сопротивления гребного винта до полутора раз. Интегральная оценка изменения момента сопротивления винта, а, следовательно, и ГД приведена в таблице.

С помощью аналитических исследований и численных решений было показано, что обрастание, коррозия гребного винта, погодные условия плавания судна изменяют его момент сопротивления. Изменяется свободная составляющая переходного процесса изменения частоты вращения коленчатого вала ГД. Как следствие, появляется угол между ЭДС валогенератора и ЭДС дизель-генератора, работающих параллельно [7]. Это приводит к возникновению уравнительных токов между ними. В штормовых условиях плавания судна валогенератор выпадает из синхронизма. В случае главной энергетической установки и валогенератора аналогичное дестабилизирующее воздействие оказывает изменение момента сопротивления движителя — винта регулируемого шага. У рыбопромысловых судов появляется новый вид нагрузки на ГД — трал. Увеличение глубины и скорости траления в неблагоприятной ветроволновой обстановке вызывает повышение нагрузки ГД. Существенное влияние на сопротивление трала оказывает длина вытравленных ваеров, ветроволновая обстановка, вооружение трала, площадь траловых досок и угол их атаки, количество и площадь подъемных щитков, величина дополнительных грузов. При изменении скорости траления от 4 до 8 уз увеличение мощности ГД достигает 80 % [7].

Изменение момента винта из-за сопротивления трала составляет

$$K_1 = 0\ \% + 80\ \%.$$

По аналогии в таблице приведена интегральная оценка влияния эксплуатационных факторов на момент ГД.

Влияние эксплуатационных факторов на момент главного двигателя

Эксплуатационные факторы, влияющие на момент сопротивления винта	Максимальное значение коэффициента, %
1. Состояние поверхности винта	+36
2. Состояние поверхности корпуса	+50
3. Глубина фарватера	+45
4. Осадка судна	+6,6
5. Ветроволновая обстановка	+80
6. Сопротивление трала	+80
7. Ледовая обстановка	+70
8. Плотность воды	+30
Среднее значение влияния всех факторов	+50

Для компенсации влияния погодных условий плавания судна, эксплуатационных факторов и крутильных колебаний валопровода на переходный процесс изменения частоты вращения предложено применить адаптивное регулирование с регулятором скользящего режима.

Результаты расчетов математической модели при проектировании регулятора скользящего режима возбуждения генератора

Компьютерное моделирование переходных процессов изменения частоты напряжения валогенератора проводилось с учетом крутильных колебаний валопровода. Крутильные колебания валопровода вызывают высокочастотные колебания в переходных процессах изменения частоты напряжения и угла нагрузки валогенератора на фоне колебаний, вызванных моментом сопротивления на гребном винте (рис. 1).

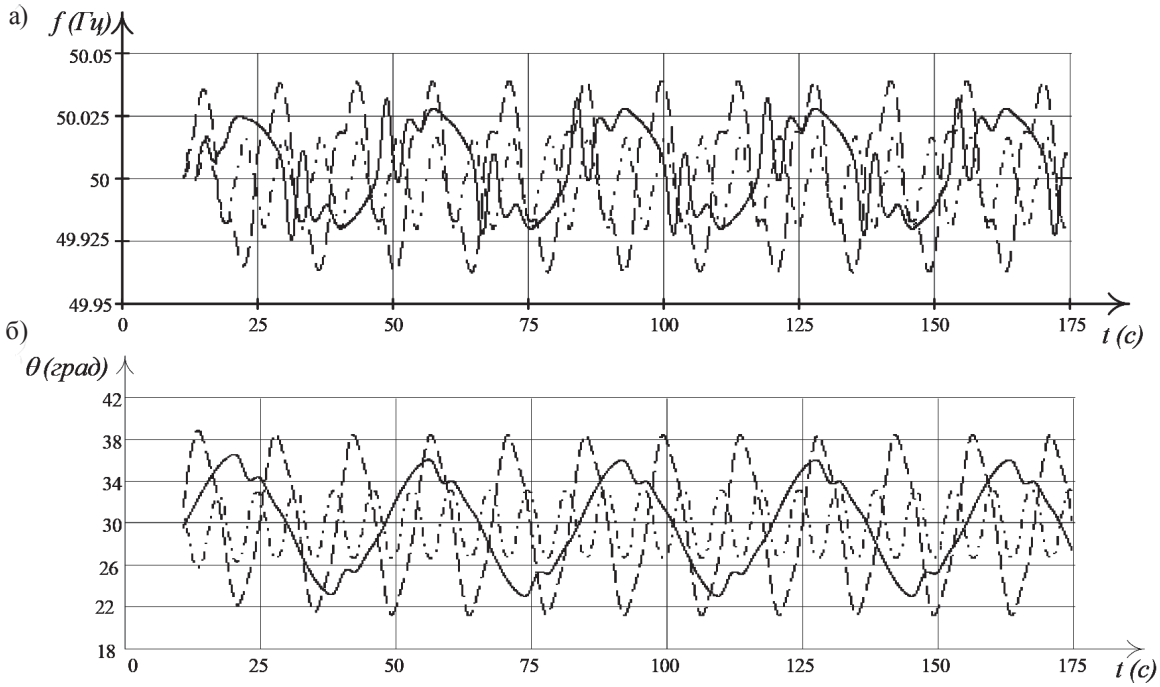


Рис. 1. Переходный процесс изменения частоты напряжения валогенератора (*а*) и угла нагрузки (*б*) с разработанным адаптивным регулятором:
——— при Ω=0,2 с$^{-1}$, m_a=0,8 о.е., γ_a =27,25 о.е., $X_н$=0,6 о.е., $R_н$=1 о.е., I_f=1,043 о.е.;
– – – при Ω=0,5 с$^{-1}$, m_a=0,9 о.е., γ_a =15 о.е., $X_н$=0,234 о.е., $R_н$=0,75 о.е., I_f=0,9 о.е.;
— · — · — при Ω=1 с$^{-1}$, m_a=1,08 о.е., γ_a =7 о.е., $X_н$=0,66 о.е., $R_н$=1,1 о.е., I_f=0,8 о.е.

Моделирование переходного процесса изменения частоты f напряжения валогенератора (рис. 1, *а*), определяемой частотой вращения коленчатого вала главного двигателя, и угла нагрузки Θ (рис. 1, *б*) в САУ главного двигателя с адаптивным регулятором показало, что уменьшилась амплитуда колебаний f, амплитуда колебаний Θ уменьшилась до 8 º по сравнению с 180 º для систем автоматического управления (САУ) главного двигателя с классическим ПИ-регулятором при одинаковых значениях дестабилизирующих факторов: частоте качки судна Ω; электрической нагрузке $R_н$ и $X_н$; токе возбуждения i_f. Структура уравнений Парка–Горева такова, что в них не учитывается влияние токов от других генераторов. Влияние токов подпитки учтём через изменение сопротивлений нагрузки синхронных генераторов (СГ). Для того чтобы учесть токи подпитки, введём коэффициенты K_d, K_q, которые показывают соотношение между векторами токов нагрузки и токов подпитки по осям d и q. В этом случае работу каждого генератора в составе параллельно работающих можно рассматривать как автономную на нагрузку с переменным сопротивлением: $X_н K_q$, $X_н K_d$, $R_н K_q$, $R_н K_d$. Значения сопротивлений $X_н K_q$, $X_н K_d$, $R_н K_q$, $R_н K_d$ зависят от токов подпитки i_d, i_g, i_{yd}, i_{yq}, действующих со стороны других генераторов [8].

Далее, на основе модификации уравнений Парка–Горева предложена математическая модель синхронного генератора, которая учитывает токи подпитки от других генераторов. Модель ориентирована на использование при проектировании регулятора скользящего режима возбуждения генератора [9]. Эти особенности позволяют описать модифицированную систему уравнений Парка–Горева:

$$\begin{cases} p\psi_d = (1+s)\,\psi_q - R_{нd} i_d; \\ p\psi_q = -(1+s)\,\psi_d - R_{нq} i_q; \\ p\psi_f = u_f - K_R R_f i_f; \\ p\psi_{yd} = -K_R R_{yd} i_{yd}; \\ p\psi_{yq} = -K_R R_{yq} i_{yq}, \end{cases} \quad (1)$$

где Ψ_d — потокосцепление генератора по оси d; Ψ_f, — потокосцепление в обмотке возбуждения; Ψ_{yd}, — потокосцепление при переходных процессах по оси d; Ψ_q — потокосцепление генератора по оси q; Ψ_{yq} — потокосцепление при переходных процессах по оси q.

В модифицированную математическую модель синхронного генератора введены коэффициенты дестабилизирующих факторов: $K_μ$ = 0,4 ... 1 — коэффициент, который характеризует намагничивание железа и, следовательно, изменение сопротивлений взаимной индукции X_{ad}, X_{aq}; $K_ω$ = 0,9 ... 1,1 — коэффициент, который характеризует зависимость сопротивлений взаимной индукции X_{ad}, X_{aq} от частоты напряжения генератора; K_R = 0,725 ... 1,165 — коэффициент, который характеризует зависимость активного сопротивления от температуры.

Далее получено выражение для определения момента на валу генератора с учетом приведенных коэффициентов дестабилизирующих факторов

$$M_г = (i_f X_{ad} K_μ K_ω K_R)^2 R_{нd} \frac{X_{qн}^2 \left(\frac{ω}{ω_c}\right)^3 + R_{нq} R_{нd} \left(\frac{ω}{ω_c}\right)}{\left[X_{qн} X_{dн} \left(\frac{ω}{ω_c}\right)^2 + R_{нq} R_{нd}\right]^2} M_{ном}, \quad (2)$$

где $ω_c$ — круговая частота вращения поля статора СГ; i_f — ток генератора; X_{ad}, $X_{qн}$, $X_{dн}$ — изменение сопротивления взаимной индукции; $R_{нq}$, $R_{нd}$ — изменение активного сопротивления; $K_μ$ — коэффициент, который характеризует намагничивание железа; $K_ω$ — коэффициент, который характеризует зависимость сопротивлений взаимной индукции от частоты напряжения генератора; K_R — коэффициент, который характеризует зависимость активного сопротивления от температуры.

В эксплуатационных условиях на каждый генератор из числа параллельно работающих действуют разные по уровню дестабилизирующие факторы, поэтому и переходные процессы изменения токов возбуждения у всех этих генераторов, и переходные процессы ЭДС также разные. Это приводит к появлению уравнительных токов между генераторами в процессе распределения меж-

ду ними реактивной нагрузки, а для каждого генератора — к появлению токов подпитки. В данной работе за критерий управления возбуждением генераторов принят критерий формирования для каждого из параллельно работающих генераторов одинакового по форме графика переходного процесса тока возбуждения i_f. Правомерность такого критерия проверялась путем математического и физического моделирования системы. При реализации этого критерия наблюдалось уменьшение амплитуд колебаний реактивных токов каждого генератора и напряжения сети.

Для формирования эталонных графиков переходного процесса токов i_f генераторов применены регуляторы скользящего режима. При проектировании регулятора учтена та его особенность, что при большой частоте переключений в нем и медленных изменениях K_d, K_q нет необходимости знать действительные значения K_d, K_q в любой момент времени, а достаточно знать только пределы их изменения.

Обсуждение

Анализ результатов выполненных расчетов позволил сделать следующие выводы:

– моделирование переходного процесса изменения частоты f напряжения валогенератора (рис. 1, *а*), определяемой частотой вращения коленчатого вала ГД и угла нагрузки Θ (рис. 1, *б*) в САУ главного двигателя с адаптивным регулятором показало, что уменьшилась амплитуда колебаний f;

– амплитуда колебаний Θ уменьшилась до 8º по сравнению с 180º для САУ главного двигателя с классическим ПИ-регулятором при одинаковых значениях дестабилизирующих факторов: частоте качки судна Ω; электрической нагрузке $R_н$ и $X_н$; токе возбуждения i_f.

Сам же адаптивный регулятор, который состоит из регулятора скользящего режима и нечёткого регулятора, формирует эталонную передаточную функцию второго порядка САУ частотой напряжения генератора с настройкой на технический оптимум. У всех вспомогательных дизелей и валогенератора судна одинаковые динамические характеристики переходных процессов частоты вращения, благодаря этому компенсируются перетоки активной мощности между приводимыми ими во вращение параллельно работающими генераторами [10].

На рис. 2 приведена полная структурная схема разработанной адаптивной САУ возбуждением синхронного генератора [11]. Входными сигналами САУ являются: заданное напряжение на статоре U_{zad}, заданная реактивная мощность генератора Q_{zad}. Разработанный в работе адаптивный регулятор возбуждения состоит из двух регуляторов:

– РСР1 стабилизирует динамические характеристики переходного процесса изменения тока возбуждения генератора;

– РСР2 стабилизирует динамические характеристики переходного процесса изменения напряжения статора.

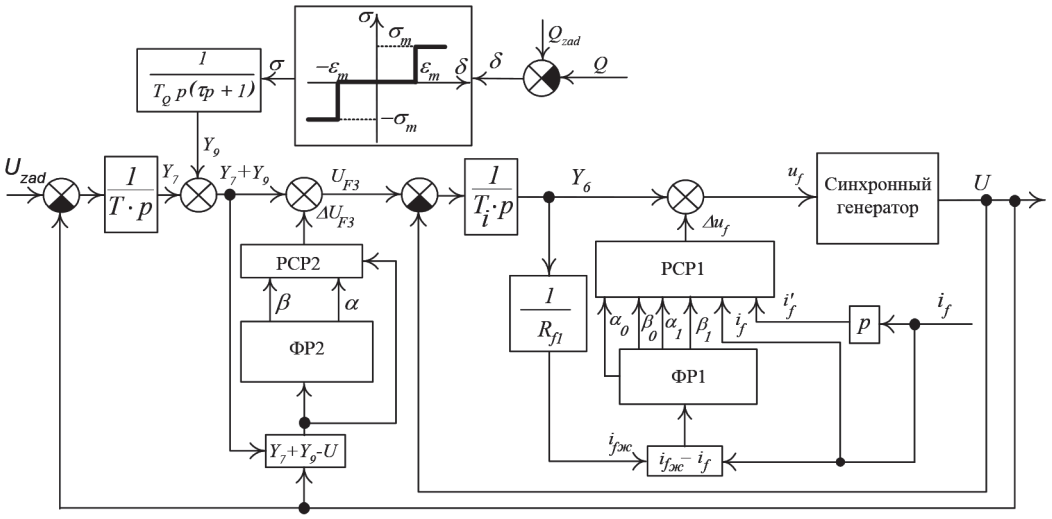


Рис. 2. Полная структурная схема адаптивной САУ возбуждением синхронного генератора

С помощью фаззи-регуляторов ФР1 и ФР2 гасятся высокочастотные колебания малой амплитуды вблизи установившихся значений регулируемых, соответственно, РСР1 и РСР2 сигналов.

В САУ предусмотрено также регулирование реактивной мощности *Q*. С помощью адаптивного регулятора формируются одинаковые динамические характеристики переходных процессов тока возбуждения и ЭДС. Благодаря этому уменьшилась амплитуда колебаний реактивных токов генераторов, следовательно, и уравнительных токов. Подавление уравнительных токов позволяет описать генераторные блоки дифференциальными уравнениями без уравнений связи между блоками.

Заключение

Ветроволновая обстановка, сопротивление трала, ледовая обстановка и другие эксплуатационные факторы судна изменяют момент сопротивления главного двигателя. Меняется свободная составляющая частоты напряжения валогенератора в переходных процессах. Появляется угол между ЭДС валогенератора и ЭДС дизель-генератора судовой электростанции, работающих параллельно. Это приводит к возникновению уравнительных токов между ними. В штормовых условиях плавания судна валогенератор выпадает из синхронизма в связи с колебаниями частоты вращения коленчатого вала главной энергетической установки. Для компенсации влияния эксплуатационных факторов на переходный процесс изменения частоты вращения валогенератора рассмотрено применение адаптивного регулирования с использованием регулятора скользящего режима. Получены числовые оценки влияния эксплуатационных дестабилизирующих факторов и условий плавания судна на момент главного двигателя. Разработана структурная схема адаптивной САУ возбуждением синхронного генератора, которая в ходе дальнейших исследований может позволить получить стабильные динамические характеристики изменения тока возбуждения генератора и напряжения статора при действии дестабилизирующих эксплуатационных факторов.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Жиленков А. А.* Исследование автоколебательных процессов в комбинированных автономных электроэнергетических системах / А. А. Жиленков, С. Г. Черный // Контроль. Диагностика. — 2016. — № 5. — С. 61–67. DOI: 10.14489/td.2016.05.pp.061-067.

2. *Черный С. Г.* Анализ надежности энергетических систем морских буровых платформ в акватории Черного моря / С. Г. Черный // Нефтяное хозяйство. — 2016. — № 2. — С. 106–110.

3. *Черный С. Г.* Повышение производительности микропроцессорной сети управления на платформе ethernet для системы буровых комплексов / С. Г. Черный // Приборы и системы. Управление, контроль, диагностика. — 2016. — № 1. — С. 2–10.

4. *Сахаров В. В.* Алгоритмизация и синтез систем управления судовыми динамическими объектами средствами математического программирования / В. В. Сахаров, А. А. Чертков, С. В. Сабуров // Вестник Государственного университета морского и речного флота имени адмирала С. О. Макарова. — 2016. — № 3 (37). — С. 201–211. DOI: 10.21821/2309-5180-2016-7-3-201-211.

5. *Черный С. Г.* Моделирование управления процессами в сложных системах при недетерминированных возмущающих воздействиях / С. Г. Черный, А. А. Жиленков // Автоматизация процессов управления. — 2016. — № 1 (43). — С. 37–46.

6. *Веретенников Л. П.* Исследование процессов в судовых электроэнергетических системах. Теория и методы / Л. П. Веретенников. — Л.: Судостроение, 1975. — 376 с.

7. *Веретенников Л. П.* Переходные процессы в электроэнергетических системах кораблей / Л. П. Веретенников. — Л.: Ленинград, 1982. — 626 с.

8. *Болотин Б. И.* Исследование устойчивости параллельной работы дизель-генераторов ДГР 150/750 совместно с устройствами автоматики на математической модели / Б. И. Болотин, В. Л. Вайнер // Труды ЦНИДИ. — 1998. — № 56. — С. 245–258.

9. Thermo- and Fluid Dynamic Processes in Diesel Engines 2: Selected papers from the THIESEL 2002 Conference, Valencia, Spain, 11-13 September 2002 / J. H. Whitelaw, F. Payri, C. Arcoumanis, J. M. Desantes (Eds.). — Springer Berlin Heidelberg, 2004. — 501 p. DOI: 10.1007/978-3-662-10502-3.

10. Dynamic Modelling of Gas Turbines: Identification, Simulation, Condition Monitoring and Optimal Control / G. G. Kulikov, H. A. Thompson (Eds.). — Springer-Verlag London, 2004. — 310 p. DOI: 10.1007/978-1-4471-3796-2.

11. *Железняк А. А.* Повышение устойчивости к дестабилизирующим факторам энергетической установки промыслового судна / А. А. Железняк / Вестник Астраханского государственного технического университета. Серия: Морская техника и технология. — 2017. — № 1. — С. 21–28.

REFERENCES

1. Zhilenkov, A. A., and S. G. Chernyi. "The Investigation of the self-sustained oscillations in a Combined Autonomous Electric Energy Systems." *Testing. Diagnostics* 5 (2016): 61–67. DOI: 10.14489/td.2016.05.pp.061-067.

2. Chernyi, S. G. "Analysis of the energy reliability component for offshore drilling platforms within the Black Sea." *Oil Industry* 2 (2016): 106–110.

3. Chernyi, S. G. "Improving performance of microprocessor network management platform for Ethernet systems drilling rigs." *Instruments and Systems: Monitoring, Control, and Diagnostics* 1 (2016): 2–10.

4. Saharov, Vladimir Vasilevich, Alexandr Alexandrovich Chertkov, and Sergey Valerevich Saburov. "Algorithmic and synthesis of control systems of ship dynamic objects by means of mathematical programming." *Vestnik Gosudarstvennogo universiteta morskogo i rechnogo flota imeni admirala S. O. Makarova* 3(37) (2016): 201–211. DOI: 10.21821/2309-5180-2016-7-3-201-211.

5. Chernyi, Sergei Grigorievich, and Anton Aleksandrovich Zhilenkov. "Processes control modeling in complex systems in case of indeterminate perturbation actions." *Automation of Control Processes* 1(43) (2016): 37–46.

6. Veretennikov, L. P. *Issledovanie protsessov v sudovykh elektroenergeticheskikh sistemakh. Teoriya i metody*. L.: Sudostroenie, 1975.

7. Veretennikov, L. P. *Perekhodnye protsessy v elektroenergeticheskikh sistemakh korablei*. L.: Leningrad, 1982.

8. Bolotin, B. I., and V. L. Vainer. "Issledovanie ustoichivosti parallel'noi raboty dizel'-generatorov DGR 150/750 sovmestno s ustroistvami avtomatiki na matematicheskoi modeli." *Trudy TsNIDI* 56 (1998): 245–258.

9. Whitelaw, J. H., F. Payri, C. Arcoumanis, and J. M. Desantes, eds. *Thermo- and Fluid Dynamic Processes in Diesel Engines 2: Selected papers from the THIESEL 2002 Conference, Valencia, Spain, 11-13 September 2002*. Springer Berlin Heidelberg, 2004. DOI: 10.1007/978-3-662-10502-3.

10. Kulikov, G. G., and H. A. Thompson, eds. *Dynamic Modelling of Gas Turbines: Identification, Simulation, Condition Monitoring and Optimal Control*. Springer-Verlag London, 2004. — 310 p. DOI: 10.1007/978-1-4471-3796-2.

11. Zheleznyak, A. A. "Povyshenie ustoichivosti k destabiliziruyushchim faktoram energeticheskoi ustanovki promyslovogo sudna." *Vestnik of Astrakhan State Technical University. Series: Marine Engineering and Technologies* 1 (2017): 21–28.

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРЕ

Железняк Александр Александрович —
ассистент
ФГБОУ ВО «Керченский государственный морской технологический университет»
298309, Российская Федерация, Республика Крым, г. Керчь, ул. Орджоникидзе, 82
e-mail: *Zheleznyak13@mail.ru*

INFORMATION ABOUT THE AUTHOR

Zhelezniak, Aleksandr A. —
Assistant
Kerch State Marine Technological University
82 Ordzhonikidze Str., Kerch, 298309,
Republic of Crimea, Russian Federation
e-mail: *Zheleznyak13@mail.ru*

Статья поступила в редакцию 15 марта 2017 г.
Received: March 15, 2017.

ВЕСТНИК
ГОСУДАРСТВЕННОГО УНИВЕРСИТЕТА
МОРСКОГО И РЕЧНОГО ФЛОТА ИМЕНИ АДМИРАЛА С. О. МАКАРОВА

ИНФОРМАЦИОННЫЕ ТЕХНОЛОГИИ И АВТОМАТИЗАЦИЯ НА ТРАНСПОРТЕ

DOI: 10.21821/2309-5180-2017-9-2-422-431

THE ALGORITHM OF A FORMANCE GAIN OF ELECTROENERGY SYSTEMS FOR WATER TRANSPORT USING FUZZY LOGIC

D. V. Dmitrienko, A. A. Chertkov, S. V. Saburov

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

The problem of increasing the efficiency of diesel-generator units (DGA) for various purposes and energy systems of water transport, running on fuel of various sorts, as well as with alternative and renewable sources of electricity, is determined by the untapped reserves and opportunities for new energy-efficient solutions for institutional and technical levels using computer technology and numerical methods of energy conservation. Since energy facilities to a greater or lesser extent, have a negative impact on the environment Wednesday, their work required to optimize in view of the operation of each power grid in different operating conditions. The complexity of the optimization problem is that its decision should be implemented when significant differences in technical, economic and sensitive characteristics of individual elements of the system, and an analytical description of the difficult in cases of high dimension power grid with regulators for various purposes and extent.

The algorithm is cost-effective modes of the grid by the distribution of active power between generating sources of electricity using the incremental characteristics of the object class with the expenditure characteristics of the approximated quadratic polynomials. In contrast to existing methods of defining and measuring the minimum consumption of conventional fuel per unit of electricity generated, the proposed algorithm for optimal power allocation in terms of technological limitations is determined by constructing incremental characteristics, based on which work out solutions for each generator as a function of the power consumed by the network. The solutions are piecewise linear functions that allows to embed the algorithm, the elements of fuzzy logic and, in particular, the trapezoidal membership function, which contributes to simplification of computation. Examples, confirming the correctness and efficiency of algorithm.

Keywords: power generators, parallel operation, network, fuel consumption, optimization, incremental functions, elements of fuzzy logic.

For citation:
Dmitrienko, Dmitry. V., Alexandr A. Chertkov, and Sergei V. Saburov. "The algorithm of a formance gain of electroenergy systems for water transport using fuzzy logic." *Vestnik Gosudarstvennogo universiteta morskogo i rechnogo flota imeni admirala S. O. Makarova* 9.2 (2017): 422–431. DOI: 10.21821/2309-5180-2017-9-2-422-431.

УДК 621.394.02

АЛГОРИТМ ПОВЫШЕНИЯ ЭКОНОМИЧНОСТИ ЭЛЕКТРОЭНЕРГЕТИЧЕСКИХ СИСТЕМ НА ВОДНОМ ТРАНСПОРТЕ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ФУНКЦИЙ НЕЧЕТКОЙ ЛОГИКИ

Д. В. Дмитриенко, А. А. Чертков, С. В. Сабуров
ФГБОУ ВО «ГУМРФ имени адмирала С. О. Макарова»,
Санкт-Петербург, Российская Федерация

Проблема повышения экономичности дизель-генераторных агрегатов различного назначения и систем энергообеспечения водного транспорта, работающих на топливах различных сортов, а также с альтернативными и возобновляемыми источниками электроэнергии, определяется неиспользованными резервами и возможностями получения новых энергоэффективных решений на организационном и техническом уровнях с применением компьютерных технологий и численных методов энергосбережения. Поскольку энергетические объекты в той или иной мере оказывают негативное влияние на окружающую

среду, их работу требуется оптимизировать с учетом функционирования каждой энергосистемы в различных условиях эксплуатации. Сложность задачи оптимизации состоит в том, что ее решение должно выполняться при существенных различиях технических, экономических и режимных характеристик отдельных элементов системы, а аналитическое описание затруднено в случаях высокой размерности энергосистемы с регуляторами различного назначения и степени сложности.

Рассмотрен алгоритм обеспечения экономичных режимов энергосети путем распределения активной мощности между генерирующими источниками электроэнергии с использованием метода инкрементальных характеристик для класса объектов с расходными характеристиками, аппроксимируемыми квадратичными полиномами. В отличие от существующих способов определения и оценки минимального расхода условного топлива, приходящегося на единицу генерируемой электроэнергии, в предлагаемом алгоритме оптимальное распределение мощности в условиях технологических ограничений определяется путем построения инкрементальных характеристик, на основе которых получаются решения для каждого генератора как функции мощности, потребляемой сетью. Решения являются кусочно-линейными функциями, что позволяет встроить в алгоритм элементы нечеткой логики и, в частности, трапецеидальную функцию принадлежности, что способствует упрощению вычислений. Приводятся примеры, подтверждающие корректность и эффективность алгоритма.

Ключевые слова: генераторы электроэнергии, параллельная работа, сеть, расход топлива, оптимизация, инкрементальные функции, элементы нечеткой логики.

Для цитирования:
Дмитриенко Д. В. Алгоритм повышения экономичности электроэнергетических систем на водном транспорте с использованием функций нечеткой логики / Д. В. Дмитриенко, А. А. Чертков, С. В. Сабуров // Вестник Государственного университета морского и речного флота имени адмирала С. О. Макарова. — 2017. — Т. 9. — № 2. — С. 422–431. DOI: 10.21821/2309-5180-2017-9-2-422-431.

Введение

В настоящее время проблеме повышения экономичности дизель-генераторных агрегатов (ДГА) различного назначения и электроэнергетических систем (ЭЭС) на предприятиях водного транспорта уделяется большое внимание. Стремление уменьшить расход топлива, приходящийся на единицу генерируемой энергии в сеть при параллельной работе ДГА, определяется неиспользованными резервами и возможностями получения новых энергоэффективных решений на организационном и техническом уровнях с применением компьютерных технологий и численных методов энергосбережения [1]. Повышение требований к качеству электроэнергии определяет новые задачи по обеспечению параллельной работы ДГА и тепловых электростанций, агрегатов автономных систем энергообеспечения и др. на топливах различных сортов в единой энергосети, в том числе с альтернативными и возобновляемыми источниками электроэнергии [2]. Решение этих задач направлено на обеспечение минимальных затрат материальных ресурсов и денежных средств при эксплуатации основных фондов на водном транспорте путем экономии топлива и энергии; поиск новых форм и методов технико-экономического нормирования расходов топлива на речных транспортных, грузовых и пассажирских судах, а также судах технического флота; снижение объемов выбросов в атмосферу составляющих CO_x и NO_x продуктов сгорания на тепловых электростанциях и береговых объектах с автономными источниками электроэнергии и выполнение требований к сохранению экологически чистой окружающей среды согласно международным стандартам IMO Tier III [3] – [6].

Поскольку энергетические объекты в той или иной мере оказывают негативное влияние на окружающую среду, их работу требуется оптимизировать с учетом функционирования каждой энергосистемы в различных условиях эксплуатации [7]. Сложность задачи оптимизации состоит в том, что ее решение должно выполняться при существенных различиях технических, экономических и режимных характеристик отдельных элементов системы, а аналитическое описание затруднено в случаях высокой размерности энергосистемы с регуляторами различного назначения и степени сложности.

В работе представлен алгоритм оптимизации режимов энергосети при централизованном управлении путем оперативной диспетчеризации распределения активной нагрузки между гене-

рирующими источниками, которая обеспечивает минимальный расход условного топлива с учетом параметрических и технологических ограничений. Решение основано на методе инкрементальных характеристик, изложенном в работе [1]. В отличие от известных способов оптимизации, предлагаемый алгоритм применим к классу объектов с расходными характеристиками, аппроксимируемыми квадратичными полиномами с технологическими ограничениями по генерируемой мощности ДГА. К данному классу объектов можно отнести практически все тепловые электростанции ЭЭС, судовые и корабельные электроэнергетические системы, генераторные агрегаты морских платформ для освоения шельфовых месторождений нефти и газа, буровые суда, ледоколы и другие морские подвижные объекты специального назначения.

Серийный выпуск многотопливных стационарных ДГА на ведущих дизелестроительных заводах, способных работать параллельно с сетью и другими электростанциями соизмеримой мощности, частые изменения технологических параметров топлив, а также их стоимостных показателей свидетельствуют о необходимости введения коррекции коэффициентов полиномов расходных характеристик отдельных ДГА и, следовательно, учета влияния различных составов топлива на экономичность работы системы в целом. При большом числе параллельно работающих ДГА в системе решение задач диспетчеризации энергоэффективного распределения нагрузки между агрегатами становится затруднительным. В подобных ситуациях требуется базироваться на простых алгоритмах принятия оптимальных решений, а также структурных инструментах, обладающих прозрачностью и доступностью для пользователей. Такие свойства присущи предлагаемому алгоритму.

Основная часть

В вычислительном алгоритме применена процедура равенства инкрементов полиномов второго порядка, что соответствует оптимизации технологии распределения нагрузки ДГА с использованием множителей Лагранжа в активной области их работы. При этом переход к инкрементальным характеристикам в условиях ограничений выполняется с использованием трапецеидальных функций принадлежности инструментария нечеткой логики FuzzyLogicToolbox вычислительной среды MatLAB. Оптимизация параметров для каждого ДГА производится с помощью типовых блоков, что значительно упрощает решение задачи диспетчеризации распределения мощности в сети и обеспечивает максимальную «топливную гибкость» при переходе на наиболее экономичное или доступное топливо в режиме online [5]. Способность электростанций и ДГА работать на мазуте, дизельном топливе, нефти, эмульгированном топливе, сжиженном газе (пропан, ГОСТ 20448 и ГОСТ Р52087), жидком биогазе, а также на разных сортах бензина имеет немаловажное значение в условиях меняющихся цен, поскольку определяет многовариантность в выборе альтернативных решений с наиболее приемлемыми показателями энергоэффективности [8] – [10].

Рассмотрим группу судовых ДГА, допускающих аппроксимацию расходных характеристик квадратичными полиномами вида

$$F_i = a_i P_i^2 + b_i P_i + c_i, \quad i = 1, 2, \ldots, n, \tag{1}$$

где a_i, b_i, c_i — коэффициенты полинома, полученные экспериментальным или расчетным путем; P_i — активная мощность, генерируемая i-м ДГА (технологическим объектом); F_i — расход топлива i-м объектом на режиме, соответствующем нагрузке P_i; n — число технологических объектов в группе.

При параллельной работе ДГА должно выполняться условие равенства потребляемой сетью мощности P суммарной генерируемой в сеть мощности генераторов

$$P = \sum_{i=1}^{k} P_i, \quad i = 1, 2, \ldots, k, \tag{2}$$

где $k \le n$ — число параллельно работающих генераторов в текущий момент времени.

Поскольку в составе группы ДГА находятся объекты с различными расходными характеристиками, задача управления состоит в следующем: минимизировать суммарный расход топлива ДГА

$$F = \sum_{i=1}^{k} F_i(P_i) \tag{3}$$

путем вариации P_i при соблюдении условия (2) с учетом максимально и минимально допустимой мощности ДГА по технологическим нормам

$$P_{i\min} \le P_i \le P_{i\max}, \quad i = 1, 2, \ldots, k, \tag{4}$$

где $P_{i\min}$, $P_{i\max}$ — минимальное и максимальное предельные значения мощности i-го генератора электроэнергии.

Для решения задачи, представленной зависимостями (1) – (4), могут использоваться различные методы и алгоритмы [11] – [13]. В частности, применимы алгоритмы, базирующиеся на квадратичном программировании, динамическом программировании, сплайн-методах и др. [14], [15]. Для генераторных агрегатов тепловых электростанций с расходными характеристиками, аппроксимированными квадратичными полиномами вида (1), предлагается простой способ оптимизации, основанный на построении инкрементальных функций. Инкрементальные функции вычисляются с помощью зависимостей следующего вида:

$$\frac{\partial F_i}{\partial P_i} = 2a_i P_i + b_i, \quad i = 1, 2, \ldots, n. \tag{5}$$

Согласно теории оптимального управления, для решения задачи в активной области (без учета граничных условий) можно использовать технический прием, основанный на применении множителей Лагранжа. В результате оптимальный режим при параллельной работе тепловых генераторов электроэнергии обеспечивается при поддержании равных значений инкрементальных функций, т. е. если выполняется условие

$$S = \frac{\partial F_1}{\partial P_1} = \frac{\partial F_2}{\partial P_2} = \ldots = \frac{\partial F_n}{\partial P_n}. \tag{6}$$

При соблюдении ограничений (4) условие (6) для ряда генераторных агрегатов во всем рабочем диапазоне вариации S не выполняется, что вынуждает их работать за пределами активной области на максимальной либо минимальной мощности.

Для построения S-функций коэффициенты полиномов (1) и ограничения (4) запишем в виде матриц A и $P_{\text{огр}}$:

$$A = \begin{bmatrix} a_1 & b_1 & c_1 \\ \ldots & \ldots & \ldots \\ a_k & b_k & c_k \\ \ldots & \ldots & \ldots \\ a_n & b_n & c_n \end{bmatrix}; \qquad P_{\text{огр}} = \begin{bmatrix} P_{1\min} & P_{1\max} \\ \ldots & \ldots \\ P_{k\min} & P_{k\max} \\ \ldots & \ldots \\ P_{n\min} & P_{n\max} \end{bmatrix}.$$

Если элементы левого столбца матрицы $P_{\text{огр}}$ равны нулю, то минимальные значения инкрементов расходных характеристик определяются вектором

$$b^T = [b_1\ b_2\ \ldots\ b_n]. \tag{7}$$

В других случаях матрицу $P_{\text{огр}}$ используем для формирования матрицы граничных значений инкрементов:

$$S_{\text{гр}}^T = \begin{bmatrix} S_{1\min} & S_{2\min} & \ldots & S_{n\min} \\ S_{1\max} & S_{2\max} & \ldots & S_{n\max} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 2a_1P_{1\min} + b_1 & 2a_2P_{2\min} + b_2 & \ldots & 2a_nP_{n\min} + b_n \\ 2a_1P_{1\max} + b_1 & 2a_2P_{2\max} + b_2 & \ldots & 2a_nP_{n\max} + b_n \end{bmatrix}. \tag{8}$$

Построение инкрементальных характеристик генераторов электроэнергии может осуществляться в любой последовательности, но при условии вариации S в рабочем диапазоне

$$S_{\min} \le S \le S_{\max}, \tag{9}$$

где $S_{\min} = \min(S^T_{\text{гр}})$ и $S_{\max} = \max(S^T_{\text{гр}})$.

Экономичные режимы с учетом ограничений можно получить, используя при построении S-функций трапецеидальные характеристики пакета FuzzyLogicToolbox.

Трапецеидальная характеристика в пакете нечеткой логики инструментария MatLAB, согласно синтаксису, зависит от настроечных коэффициентов a, b, c, d и является функцией S, где a и d определяют нижнее основание трапеции, а коэффициенты b и c — верхнее основание с единичной амплитудой:

$$y(S,a,b,c,d) = \begin{cases} 0, & S \le a; \\ \dfrac{S-a}{b-a}, & a \le S \le b; \\ 1, & b \le S \le c; \\ \dfrac{d-S}{d-c}, & c \le S \le d; \\ 0, & d \le S. \end{cases} \tag{10}$$

Для использования трапецеидальной характеристики в качестве механизма построения S-функции k-го генераторного агрегата требуется ввести следующие обозначения настроечных коэффициентов:

$$a = b_k;\ b = S_{k\max};\ c = S_{\max};\ d = S_{\max} + \delta,$$

где для определенности можно принять $\delta = 0{,}1$.

Согласно (10), расстояние от верхнего основания трапеции до нижнего в границах $S_{k\max} \le S \le S_{\max}$ с использованием введенных обозначений можно задать с помощью соотношения

$$P_k = \left(\left(S_{k\max} - b_k\right)/\left(2a_k\right)\right) \cdot y\left(b_k, S_{k\max}, S_{\max}, S_{\max} + \delta\right). \tag{11}$$

Введенные S-функции с учетом логических условий (10) представляют собой зависимости $P_i^* = f_i(S)$, где символ (*) применен для обозначения оптимального решения. Их сумма является нагрузкой сети, соответствующей экономичному режиму распределения мощности между генераторами электроэнергии:

$$P = \sum_{i=1}^{n} P_i^*. \tag{12}$$

В алгоритме используется модульная структура вычислений. В каждом модуле, в соответствии с изложенной теорией, формируются решения при соблюдении (9). Приведенный далее фрагмент алгоритма в кодах MatLAB, содержащий модуль k-го генератора с расходной характеристикой

$$P_k = a_k \cdot P_k^2 + b_k \cdot P_k + c_k,$$

позволяет убедиться в простоте выполнения вычислительных операций и получении решения $P_k^* = f_k(S)$ при параллельной работе в составе ЭЭС:

```
if S<=bk;
pk=Pkmin;
elseif(S>bk)&(S<=skmin)
pk=Pkmin;
else (S>skmin)&(S<=skm);
pk=trapmf(S,[bkskmSmax Smax+0.1]);
```

```
pk=pk*(skm-bk)/(2*ak);
end
Pk=[Pkpk]*Gk;
Pk;% Pk=P_k^* - оптимальное решение для k-го генератора.
```

Основной функцией модуля является функция trapmf, введенная в модуль с соблюдением синтаксиса для выполнения вычислений, определенных соотношением (11). В процессе реализации цикла происходит «наполнение» вектора $P_k = P_k^*$ с учетом логических операций, предусмотренных технологическими требованиями (4). Видно, что вход в активную область инкрементальной характеристики происходит с момента достижения границы $S > S_{k\min}$ при значении $P_k = P_{k\min}$. В случае нулевых начальных условий судовых ДГА, операции, содержащиеся в третьей и четвертой строках программы модуля, могут быть отменены.

Вычислительный алгоритм поиска экономичных режимов генераторов электроэнергии, работающих в параллель, можно представить выполнением последовательности операций:

1) подготовить исходные данные по расходным характеристикам параллельно работающих генераторов электроэнергии (1) и представить их в виде элементов матриц A и $P_{\text{огр}}$;

2) согласно (8), с помощью алгоритма выполнить расчеты элементов $S_{\text{гр}}^T$;

3) определить левую и правую границы вариации инкремента S в соотношении (9);

4) используя вектор $G = [G_1\ G_2\ G_3\ \ldots\ G_n]$, обозначить работающие генераторы единицами, а неработающие — нулями и определить максимально допустимую нагрузку на сеть;

5) произвести расчеты инкрементальных характеристик по блокам генераторов электроэнергии, согласно (11), и по данным вычислений выполнить оптимальное (по расходу топлива) распределение мощности генераторов по формуле (12);

6) рассчитать минимальные расходы топлива (1), используя режимы работы, полученные при выполнении пп. 5 алгоритма. Оптимизировать процесс диспетчеризации распределения активной мощности генераторов при изменении текущего значения нагрузки P электроэнергетической сети.

Эффективность реализации алгоритма зависит от адекватности технологического процесса и модели инкрементального управления, ошибок аппроксимации расходных характеристик, своевременности коррекции исходных данных при изменениях, вызванных переходами на новые сорта топлива, температурными режимами, различными внешними и внутренними возмущениями.

В реальных условиях необходимо обеспечить устойчивость системы, требуемые качественные показатели группы функционирующих генераторов электроэнергии в динамике и другие показатели. Поэтому кратковременные изменения потребляемой мощности, а также незначительные изменения, вызванные перетоками мощности между узлами энергетической сети, могут быть сглажены за счет фильтрации сигналов в определенной частотной области, повышения качества информационного обеспечения, реализации методов и средств предиктивного управления технологическими процессами.

Рассмотрим применение алгоритма на примере ЭЭС с тремя генераторами электроэнергии [13]. Действия алгоритма поясним на примере параллельной работы трех генераторных агрегатов электроэнергии. Расходные характеристики генераторов заданы полиномами [3]:

$F_1 = 0.004 \cdot P_1^2 + 5.3 \cdot P_1 + 500$ [т условного топлива/ч];

$F_2 = 0.006 \cdot P_2^2 + 5.5 \cdot P_2 + 400$ [т условного топлива/ч];

$F_3 = 0.009 \cdot P_3^2 + 5.8 \cdot P_3 + 200$ [т условного топлива/ч].

Технологические ограничения (4) имеют вид

$$P_{\text{огр}} = \begin{bmatrix} P_{1\min} & P_{1\max} \\ P_{2\min} & P_{2\max} \\ P_{3\min} & P_{3\max} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 200 & 450 \\ 150 & 350 \\ 100 & 225 \end{bmatrix} \text{ МВт.}$$

Уравнения баланса мощностей на экономичном режиме определяются соотношением (12).

1. Выбор работающих генераторов

$$G = [G_1\ G_2\ G_3] = [1\ 1\ 1].$$

Матрица граничных инкрементов

$$S_{\text{гр}}^T = \begin{bmatrix} S_{1\min} & S_{2\min} & S_{3\min} \\ S_{1\max} & S_{2\max} & S_{3\max} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 2a_1P_{1\min}+b_1 & 2a_2P_{2\min}+b_2 & 2a_3P_{3\min}+b_3 \\ 2a_1P_{1\max}+b_1 & 2a_2P_{2\max}+b_1 & 2a_3P_{3\max}+b_3 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 6.90 & 7.30 & 7.60 \\ 8.90 & 9.70 & 9.85 \end{bmatrix}.$$

Границы вариации S

$$S_{\min} = \min(S_{\text{гр}}^T) = 6.9 \quad \text{и} \quad S_{\max} = \max(S_{\text{гр}}^T) = 9.85.$$

Расчет инкрементальных характеристик выполнен для вектора

$$S = S_{\min} : delt : S_{\max}$$

с шагом дискретности $delt$=0.01 и представлен на рис. 1 в виде соотношений

$$P_1^* = f_1(S);\ P_2^* = f_2(S) \text{ и } P_3^* = f_3(S)$$

и критерия качества $J(P)$.

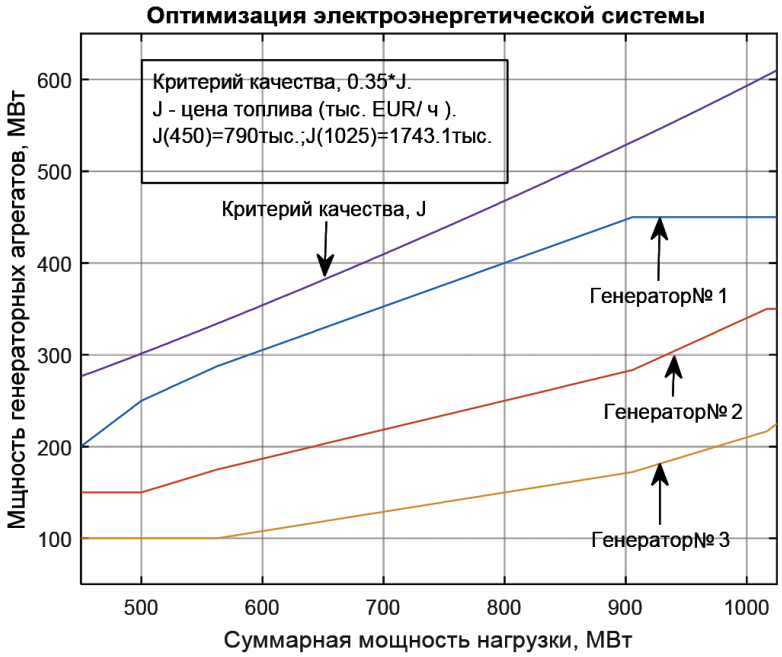


Рис. 1. Распределение мощности трех генераторов при минимальной стоимости электроэнергии

Приведем фрагмент решения из расчетных данных в виде таблицы

P_1^*	200	205	250	332.5	440	450	450	450
P_2^*	150	150	150	205	280	325	340	350
P_3^*	100	100	100	120	170	200	210	225
P	450	455	500	657.5	895	975	1000	1025

2. Выбор работающих генераторов

$$G = [G_1\ G_2\ G_3] = [1\ 0\ 1].$$

При неработающем втором генераторе максимальная мощность, потребляемая сетью, не должна быть больше 675 МВт. Результаты расчетов экономичных режимов при параллельной работе первого и второго генераторов, выполненных по алгоритму, представлены на рис. 2.

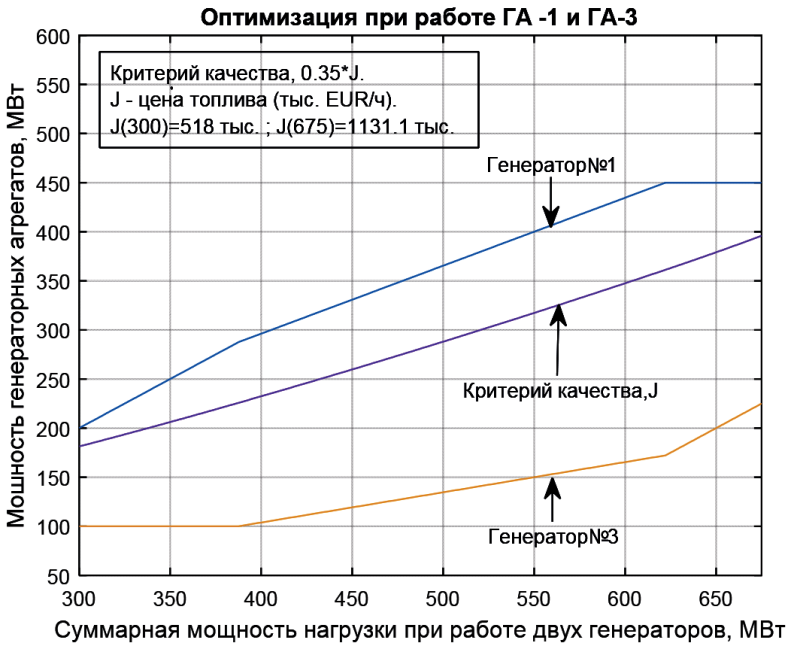


Рис. 2. Распределение мощности двух генераторов при минимальной стоимости электроэнергии

Приведенный далее фрагмент решения содержит распределения мощности двух генераторов, критерий качества F, а также его составляющие F_1 и F_3 для нагрузки сети 300, 420, 598.75 и 675 МВт.

P_1^*	200	310	433.75	450
P_2^*	0	0	0	0
P_3^*	100	110	165	225
P	300	420	598.75	3.6950e 03
F_1	1.72e 03	2.5274e 03	3.5514e 03	3.6950e 03
F_2	0.27e 03	0.9469e 03	1.4020e 03	1.9606e 03
F	2.59e 03	3.4743e 03	4.5935e 03	5.6555e 03

Выводы

Применение алгоритма инкрементального управления для экономии топлива на тепловых электростанциях и судовых ДГА с использованием функций инструментария нечеткой логики позволяет моделировать поведение сложных систем с помощью простых логических правил, а также реализовать эти правила в блочной структуре алгоритмизации комплексной модели всей динамической системы на практике. Применение интеллектуальных технологий, к которым следует отнести технические решения на базе инструментария FuzzyLogicToolbox, в сфере электроэнергетики ставит новые важные задачи развития систем электроснабжения объектов водного транспорта [8]. Их реализация на основе научно обоснованных решений позволит существенно повысить эффективность функционирования объектов водного транспорта в сфере энергосбережения и эксплуатации основных фондов.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Барышников С. О.* Автоматизация и повышение эффективности использования топлива на судах / С. О. Барышников, А. А. Кузьмин, В. В. Сахаров, С. Н. Тарануха. — СПб.: Изд-во Политехнического ун-та, 2016. — 390 с.

2. *Безюков О. К.* Использование хладопотенциала сжиженного природного газа для снижения выбросов диоксида углерода теплоэнергетическими установками, работающими на сжиженном природном газе / О. К. Безюков, В. Л. Ерофеев, А. С. Пряхин // Вестник Государственного университета морского и речного флота имени адмирала С. О. Макарова. — 2016. — № 3 (37). — С. 143–155. DOI: 10.21821/2309-5180-2016-7-3-143-155.

3. *Гаврилов А.* Анализ воздействия режимов работы тепловых электростанций на окружающую среду / А. Гаврилов, А. Махнитко // Elektroenergetika Journal. — 2008. — Vol. 1. — No. 2. — Pp. 27–32.

4. *Гришкин В. В.* О деятельности в области сокращения выбросов парниковых газов с судов / В. В. Гришкин // Научно-технический сборник Российского морского регистра судоходства. — 2011. — № 34. — С. 153–166.

5. *Жуков В. А.* Контроль качества теплоносителей жидкостных систем охлаждения / В. А. Жуков // Контроль. Диагностика. — 2011. — № 9. — С. 66–72.

6. Международная конвенция по предотвращению загрязнения с судов (MARPOL 1973/78). [Электронный ресурс]. — Режим доступа: http://dic.academic.ru/dic.nsf/ruwiki/1828544 (дата обращения: 24.03.2014).

7. *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.

8. *Пантина Т. А.* К вопросу формирования системы мониторинга подпрограммы «Внутренний водный транспорт» ФЦП «Развитие транспортной системы России (2010 – 2020 годы)» / Т. А. Пантина, С. А. Бородулина // Вестник Государственного университета морского и речного флота имени адмирала С. О. Макарова. — 2015. — № 3 (31). — С. 124–132. DOI: 10.21821/2309-5180-2015-7-3-124-132.

9. *Хасанов И. И.* Развитие средств и технологий морского транспорта сжиженных газов: дис. … канд. техн. наук: 07.00.10 / И. И. Хасанов. — Уфа, 2015. — 160 с.

10. *Cho B. B.* A distributed control approach to optimal economic dispatch of power generators. Master thesis. — The University of Iowa, 2010. — 32 p.

11. Energy Efficiency related Rules and Regulations — EEDI and Ship Design [Электронный ресурс]. — Режим доступа: http://laradi.fi/images/files/syyspaivat_2014/Deltamarin_Elg_EE_Rules_and_Regulations_-_EEDI.pdf (дата обращения – 10.11.2014).

12. *Ramesh G.* Optimal Dispatch of Real Power Generation Using Classical Methods / G. Ramesh, T. K. Sunil Kumar // International Journal of Electronics and Electrical Engineering. — 2015. — Vol. 3. — No. 2. — Pp. 115–120. DOI: 10.12720/ijeee.3.2.115-120.

13. *Saadat H.* Power System Analysis / H. Saadat. — USA: McGraw-Hill Higher Education, 1999. — 720 p.

14. *Saadat H.* Power System Analysis / H. Saadat. — 2nd edition. — McGraw-Hill Primis Custom Publishing, 2002. — 712 p.

15. *Shrivastava A.* A Simulation Analysis of Optimal Power Flow using Differential Evolution Algorithm for IEEE-30 Bus System / A. Shrivastava, H. M. Siddiqui // International Journal of Recent Development in Engineering and Technology. — 2014. — Vol. 2. — Is. 3. — Pp. 50–57.

REFERENCES

1. Baryshnikov, S. O., A. A. Kuzmin, V. V. Saharov, and S. N. Taranuha. *Avtomatizacia i povyshenie effektivnosti ispolzovaniia topliva na sudah*. SPb.: Izd-vo Politeh. Un-ta, 2016 .

2. Bezyukov, Oleg Konstantinovich, Valentin Leonidovich Erofeyev, and Alexander Sergeyevich Pryakhin. "Uses of a hladopotentsial of the liquefied natural gas for decrease in emissions of carbon dioxide heat power installations." *Vestnik Gosudarstvennogo universiteta morskogo i rechnogo flota imeni admirala S. O. Makarova* 3(37) (2016): 143–155. DOI: 10.21821/2309-5180-2016-7-3-143-155.

3. Gavrilov, A., and A. Mahnitko. "Analiz vozdeistviya rezhimov raboty teplovykh elektrostantsii na okruzhayushchuyu sredu." *Elektroenergetika Journal* 1.2 (2008): 27–32.

4. Grishkin, V. V. "O dejatelnosti v oblasti sokraschenija vybrosov parnikovyh gazov s sudov." *Nauchno-tehnicheskij sbornik Rossijskogo morskogo registra sudohodstva* 34 (2011): 153–166.

5. Zhukov, V. A. "Quality Control of Heat Transfer for Cooling Liquid System." *Testing. Diagnostics* 9 (2011): 66–72.

6. International Convention for the prevention of pollution from ships. (MARPOL 1973/78). Web. 24 March 2014 <http://dic.academic.ru/dic.nsf/ruwiki/1828544>.

7. Ivanchenko, A. A., A. P. Petrov, and G. E. Zhivlyuk. "Energy efficiency of ships and regulation of greenhouse gas emissions." *Vestnik Gosudarstvennogo universiteta morskogo i rechnogo flota imeni admirala S. O. Makarova* 3(31) (2015): 103–112.

8. Pantina, T. A., and S. A. Borodulina. "Formation of monitoring system for federal program «Development of transport system in Russia (2010 - 2020)» (Direction «Inland Water Transport»)." *Vestnik Gosudarstvennogo universiteta morskogo i rechnogo flota imeni admirala S.O. Makarova* 3(31) (2015): 124–132. DOI: 10.21821/2309-5180-2015-7-3-124-1329.

9. Hasanov, I. I. Razvitie sredstv i tehnologij morskogo transporta szhizhennyh gazov. PhD diss. Ufa, 2015.

10. Cho, B. B. A distributed control approach to optimal economic dispatch of power generators. The University of Iowa, 2010.

11. Energy Efficiency related Rules and Regulations — EEDI and Ship Design. Web. 10 Nov. 2014 <http://laradi.fi/images/files/syyspaivat_2014/Deltamarin_Elg_EE_Rules_and_Regulations_-_EEDI.pdf>.

12. Ramesh, Guguloth, and T. K. Sunil Kumar. "Optimal Dispatch of Real Power Generation Using Classical Methods." *International Journal of Electronics and Electrical Engineering* 3.2 (2015): 115–120. DOI: 10.12720/ijeee.3.2.115-120.

13. Saadat H. *Power System Analysis*. USA: McGraw-Hill Higher Education, 1999.

14. Saadat H. *Power System Analysis*. 2nd edition. McGraw-Hill Primis Custom Publishing, 2002.

15. Shrivastava, Amit, and Hasan Mustafa Siddiqui. "A Simulation Analysis of Optimal Power Flow using Differential Evolution Algorithm for IEEE-30 Bus System." *International Journal of Recent Development in Engineering and Technology* 2.3 (2014): 50–57.

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

Дмитриенко Дмитрий Владимирович —
кандидат экономических наук
ФГБОУ ВО «ГУМРФ имени
адмирала С. О. Макарова»
198035, Российская Федерация, Санкт-Петербург,
ул. Двинская, 5/7
e-mail: *kaf_electricautomatic@gumrf.ru*

Чертков Александр Александрович —
кандидат технических наук, доцент
ФГБОУ ВО «ГУМРФ имени
адмирала С. О. Макарова»
198035, Российская Федерация, Санкт-Петербург,
ул. Двинская, 5/7
e-mail: *chertkov51@mail.ru,*
kaf_electricautomatic@gumrf.ru

Сабуров Сергей Валерьевич — аспирант
Научный руководитель:
Сахаров Владимир Васильевич —
доктор технических наук, профессор
ФГБОУ ВО «ГУМРФ имени
адмирала С. О. Макарова»
198035, Российская Федерация, Санкт-Петербург,
ул. Двинская, 5/7
e-mail: *kaf_osnipr@gumrf.ru*

INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

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_electricautomatic@gumrf.ru*

Chertkov, Alexandr A. —
PhD, associate professor
Admiral Makarov State University
of Maritime and Inland Shipping
5/7 Dvinskaya Str., St. Petersburg 198035,
Russian Federation
e-mail: *chertkov51@mail.ru*

Saburov, Sergei V. — Postgraduate
Supervisor:
Saharov, Vladimir V. —
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_osnipr@gumrf.ru*

Статья поступила в редакцию 9 февраля 2017 г.
Received: February 9, 2017.

ВЕСТНИК
ГОСУДАРСТВЕННОГО УНИВЕРСИТЕТА
МОРСКОГО И РЕЧНОГО ФЛОТА ИМЕНИ АДМИРАЛА С. О. МАКАРОВА

DOI: 10.21821/2309-5180-2017-9-2-432-439

CALCULATION OF TIME SPENT ON THE CONVERSION INFORMATION IN THE SHIP SYSTEMS

K. P. Goloskokov[1], M. Y. Chirkova[2]

[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 article aims to develop methods of increasing the reliability of data transformation in marine information systems at the design stage with different structural control schemes. The developed method is based on models costing time when processing large amounts of information for a given quality and reliability of the information transformation. Models for calculating time information conversion characteristics are built for different structural schemes of control and adjustment information. Consider the following special cases: 1) conversion of information to the control and correction by re-conversion and control; 2) Consistent implementation of Group transformation stages, control and correction without re-control (under the control and correction only within its stages); 3) consistent implementation of the group stages of the conversion, control and correction is monitored again (under the control and correction only within its stage). 4) consistent implementation of the group stages of the conversion and control with a common goal of return and compensation. Thus, the result of this work is the formula to calculate the average time conversion batch of pieces of information (eg, an array of posts) with the cycles of correction to make up the party pieces of information (eg, messages), and obtained the evaluation of information units return probability at each stage of control in any cycle. The practical significance of the work lies in the fact that the formulas obtained in this study allow to stage data conversion system design in marine information systems to assess the amount of time to improve the reliability of the information transformation and with this in mind, make a choice the most efficient options to ensure reliability of data in the process of transformation.

Keywords: information system, information, control, conversion information, time costs, ship system.

For citation:
Goloskokov, Konstantin P., and Marina Y. Chirkova. "Calculation of time spent on the conversion information in the ship systems." *Vestnik Gosudarstvennogo universiteta morskogo i rechnogo flota imeni admirala S.O. Makarova* 9.2 (2017): 432–439. DOI: 10.21821/2309-5180-2017-9-2-432-439.

УДК 681.518:656.2-027.45

РАСЧЕТ ЗАТРАТ ВРЕМЕНИ НА ПРЕОБРАЗОВАНИЕ ИНФОРМАЦИИ В СУДОВЫХ СИСТЕМАХ

К. П. Голоскоков[1], М. Ю. Чиркова[2]

[1] ФГБОУ ВО «ГУМРФ имени адмирала С. О. Макарова», Санкт-Петербург, Российская Федерация
[2] Санкт-Петербургский государственный экономический университет, Санкт-Петербург, Российская Федерация

Цель статьи — разработка методики повышения достоверности преобразования информации в судовых информационных системах на стадии их проектирования при различных структурных схемах контроля. Разработанная методика построена на моделях расчета затрат времени при обработке большого объема информации для обеспечения заданного качества и достоверности преобразования информации. Модели расчета временных характеристик преобразования информации построены для различных структурных схем контроля и корректировки информации. Рассмотрены следующие частные случаи: 1) преобразование информации с контролем и коррекцией путем повторного преобразования и контроля; 2) последовательное выполнение группы этапов преобразования, контроля и коррекции без повторного контроля (при выполнении контроля и коррекции только в пределах своего этапа); 3) последовательное выполнение группы этапов преобразования, контроля и коррекции с повторным контролем (при выполнении контроля и коррекции только в пределах своего этапа); 4) последовательное выполнение группы этапов преобразова-

ния и контроля с общей целью возврата и коррекции. Таким образом, результатом данной работы являются формулы для расчета среднего времени преобразования партии единиц информации (например, массива сообщений) с циклами коррекции для составляющих партию единиц информации (например, сообщений); также получены оценки вероятности возврата единицы информации на каждом этапе контроля в любом цикле. Практическая значимость работы заключается в том, что полученные расчетные формулы позволяют на этапе проектирования системы преобразования информации в судовых информационных системах проводить оценку затрат времени на повышение достоверности преобразования информации и с учетом этого осуществлять выбор наиболее рациональных вариантов обеспечения достоверности данных в процессе их преобразования.

Ключевые слова: информационная система, информация, контроль, преобразование информации, затраты времени, судовые системы.

Для цитирования:
Голоскоков К. П. Расчет затрат времени на преобразование информации в судовых системах / К. П. Голоскоков, М. Ю. Чиркова // Вестник Государственного университета морского и речного флота имени адмирала С. О. Макарова. — 2017. — Т. 9. — № 2. — С. 432–439. DOI: 10.21821/2309-5180-2017-9-2-432-439.

Введение

В последнее время большое внимание уделяется вопросам преобразования информации в судовых информационных системах. Преобразования информации тесно связаны с временными характеристиками. Не секрет, что от производительности вычислительных средств и объемов информации зависит скорость преобразования информации на всех стадиях обработки. В работах [1] – [4] рассматриваются различные методы преобразования информации, но не предлагаются методики расчета временных затрат преобразования информации, учитывающие многократный контроль и коррекцию. Основное внимание уделяется расчетам надежности и достоверности преобразования информации в работах [5] – [9], а вопросы временных затрат на преобразование информации затрагиваются вскользь. В работах [10] – [20] описаны методы обеспечения надежности программного обеспечения с позиций теории вероятностей, но не предложены методики оценки временных затрат. В работах [11] – [16], [20] предлагаются методы оценки надежности цифровых релейных устройств без расчетов временных характеристик. В серии работ [19], [21] – [23] рассматривается программное обеспечение и оценка надежности, затрагивающая вопросы, связанные с проблемами расчета затрат времени на преобразование информации, но не приводится методика, позволяющая на практике производить расчеты затрат времени. В работах [24] – [26] предлагаются методы повышения достоверности информации для антивирусного программного обеспечения, но не обсуждаются вопросы, связанные с контролем и коррекцией информации. Таким образом, проблема расчета затрат времени на преобразование информации является актуальной и требующей решения.

Разработанная авторами методика строится на моделях расчета затрат времени при обработке большого объема информации для обеспечения заданного качества и достоверности преобразования информации. Практическая значимость работы заключается в том, что полученные расчетные формулы позволяют на этапе проектирования системы преобразования информации в судовых информационных системах проводить оценку затрат времени на повышение достоверности преобразования информации и с учетом этого осуществлять выбор наиболее рациональных вариантов обеспечения достоверности данных в процессе их преобразования. Результаты исследования могут быть применены в глобальных морских система связи для безопасности мореплавания ГМССБ (GMDSS) типа Sailor 2000/4000 и JRC, а также в навигационно-информационных системах различного типа.

Методика расчета затрат времени на преобразование информации с учетом контроля и коррекции

Схема преобразования информации (ПрИ) с последующим контролем (К) и коррекцией представлена на рис. 1.

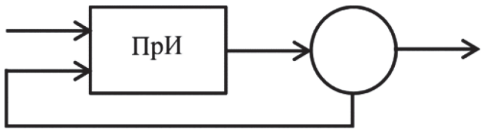


Рис. 1. Преобразование информации с контролем и коррекцией

Время преобразования, контроля и коррекции единицы информации при d циклах коррекции (поскольку возможно многократное, т. е. циклическое, возвращение единицы информации на преобразование и контроль) для i-го этапа $T^*ei(d)$ равно

$$T^*_{ei(d)} = T_{ei} + t_{ei} + t_{kei} + d\left(T'_{ei} + t'_{ei} + t'_{kei}\right), \tag{1}$$

а среднее время завершения i-го преобразования с учетом процедуры коррекции составит

$$[T^*_{ei}]_{\text{ср}} = T_{ei} + t_{ei} + t_{kei} + \frac{\sigma_{ei}}{1-\sigma_{ei}}\left(T'_{ei} + t'_{ei} + t'_{kei}\right), \tag{2}$$

где t'_{kei} — время выполнения контроля в режиме коррекции; T_{ei}, t_{ei} — соответственно время ожидания начала выполнения и время выполнения i-го преобразования единицы информации; σ_{ei} — параметры в режиме выполнения коррекции; d — коэффициент, учитывающий относительную частоту (вероятность) возврата единиц информации контролем.

При $T'_{ei} = T_{ei}$, $t'_{ei} = t_{ei}$, $t'_{kei} = t_{kei}$ и с учетом (1) получим

$$T^*_{ei(d)} = (d+1)\left(T_{ei} + t_{ei} + t_{kei}\right) = (d+1)T'_{ei} \quad [T^*_{ei}]_{\text{ср}} = \frac{1}{1-\sigma_{ei}}T'_{ei}. \tag{3}$$

Для группы из m_e последовательных этапов преобразования единицы информации, охваченных одним контролем, получим:

$$T^*_{e(d)} = t_{ke} + \sum_{i=1}^{m_e}\left(\tau_{ei} + t_{ei}\right) + d\left[t'_{ke} + \sum_{i=1}^{m_e}\left(\tau'_{ei} + t'_{ei}\right)\right];$$

$$\left[T^*_5\right]_{\text{ср}} = t_{ke} + \sum_{i=1}^{m_e}\left(\tau_{ei} + t_{ei}\right) + \frac{\sigma_{ei}}{1-\sigma_{ei}}\left[t'_{ke} + \sum_{i=1}^{m_e}\left(\tau'_{ei} + t'_{ei}\right)\right]. \tag{4}$$

При $T'_{ei} = T_{ei}$; $t'_{ei} = t_{ei}$; $t'_{ke} = t_{ke}$ справедливы соотношения:

$$T^*_{e(d)} = (d+1)\left[t_{ke} + \sum_{i=1}^{m_e}\left(\tau_{ei} + t_{ei}\right)\right] = (d+1)T'_e;$$

$$\left[T^*_e\right]_{\text{ср}} = \frac{1}{1-\sigma_e}\left[t_{ke} + \sum_{i=1}^{m_e}\left(\tau_{ei} + t_{ei}\right)\right] = \frac{1}{1-\sigma_e}T'_e. \tag{5}$$

Если некоторый объем собираемой информации может делиться при коррекции на части (так как представляет собой партию из $n_{\text{парт}}$ единиц информации более низкого ранга), то будут справедливы следующие соотношения:

$$\left[T^*_{n(d)}\right]_{\text{ср}} = \left\{T'_e + \frac{1-\sigma_e^d}{1-\sigma_e}\left[t'_{ke} + \sum_{i=1}^{m_e}\left(\tau'_{ei} + t'_{ei}\right)\right]\right\}n_{\text{парт}};$$

$$\left[T^*_n\right]_{\text{ср}} = \left[T^*_e\right]_{\text{ср}}\, n_{\text{парт}}, \tag{6}$$

где $\left[T^*_{n(d)}\right]_{\text{ср}}$ — среднее время преобразования партии единиц информации (например, массива сообщений) с d циклами коррекции для составляющих партию единиц информации (например, сообщений); $\left[T^*_n\right]_{\text{ср}}$ — среднее время завершения преобразования и коррекции для партии; T'_e — трактуется как (2).

Увеличение времени преобразования единицы первичной информации на i-м этапе для группы из m_e этапов преобразования и среднее увеличение для партии из $n_{\text{парт}}$ единиц первичной информации при d циклах коррекции может быть оценено по формулам:

$$\Delta T_{ei(d)} = d\left(T'_{ei} + t'_{ei} + t_{kei}\right);$$

$$\Delta T_{e(d)} = d\left[t'_{ke} + \sum_{i=1}^{m_e}\left(\tau'_{ei} + t'_{ei}\right)\right];$$

$$\left[\Delta T^*_{n(d)}\right]_{\text{ср}} = \frac{1-\sigma_e^d}{1-\sigma_e}\left[t'_{ke} + \sum_{i=1}^{m_e}\left(\tau'_{ei} + t'_{ei}\right)\right] n_{\text{парт}}.$$

Среднее увеличение времени завершения i-го преобразования единиц первичной информации, завершение группы из m_e преобразования для единицы информации и для партии из $n_{\text{парт}}$ единиц первичной информации может быть оценено:

$$\left[\Delta T_{ei}\right]_{\text{ср}} = \frac{\sigma_{ei}}{1-\sigma_{ei}}\left(T'_{ei} + t'_{ei} + t_{kei}\right); \tag{7}$$

$$\left[\Delta T_{e}\right]_{\text{ср}} = \frac{\sigma_{e}}{1-\sigma_{e}}\left[t_{ke} + \sum_{i=1}^{m_e}\left(\tau'_{ei} + t'_{ei}\right)\right]; \tag{8}$$

$$\left[\Delta T_{n}\right]_{\text{ср}} = \left[\Delta T_{e}\right]_{\text{ср}} n_{\text{парт}}. \tag{9}$$

Во всех случаях (3) – (9) предполагается, что преобразование завершается при положительном результате контроля для всех единиц первичной информации. В остальных случаях значение T^*_e ограничивается практически необходимым для получения требуемого уровня достоверности $[P^*_e]_{\text{зад}}$ числом циклов $d = d_{\text{зад}}$.

Последовательное выполнение группы этапов преобразования, контроля и коррекции информации при действии контроля и коррекции только в пределах своего этапа представлено на рис. 2.

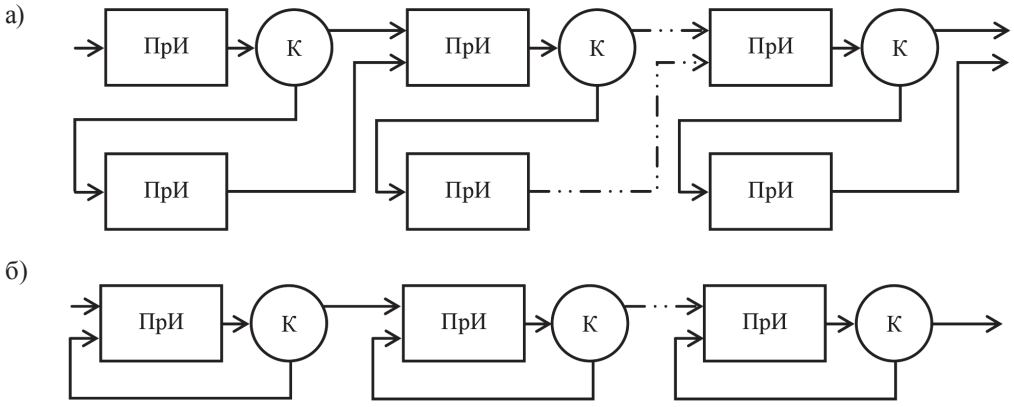


Рис. 2. Последовательное выполнение группы этапов преобразования, контроля и коррекции:
а — без повторного контроля (при выполнении контроля и коррекции только в пределах своего этапа);
б — с повторным контролем (при выполнении контроля и коррекции только в пределах своего этапа)

Общая оценка $[T^*_e]_{\text{ср экв}}$ и $[\Delta T_e]_{\text{ср экв}}$ для подобных структур находится суммированием соответствующих оценок для i-х этапов $[T^*_{ei}]_{\text{ср}}$ и $[\Delta T_{ei}]_{\text{ср}}$, вычисляемых по формулам предыдущих вариантов (см. рис. 2):

$$\left[T^*_e\right]_{\text{ср экв}} = \sum_{i=1}^{m_e}\left[T^*_{ei}\right]_{\text{ср}} \text{ и } \left[\Delta T_e\right]_{\text{ср экв}} = \sum_{i=1}^{m_e}\left[\Delta T_{ei}\right]_{\text{ср}}. \tag{10}$$

Последовательное выполнение группы этапов преобразования и контроля информации с общей целью возврата и коррекции показано на рис. 3.

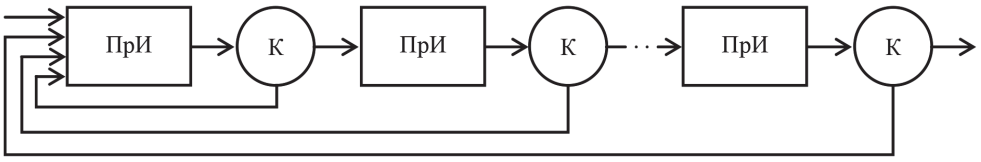


Рис. 3. Последовательное выполнение группы этапов преобразования и контроля с общей целью возврата и коррекции

Оценка этого случая может быть выведена путем последовательного рассмотрения цепочек из 2-, 3-, …, m_e-этапов преобразования первичной информации при 1-, 2-, 3-… d-м циклах (под циклом в данном случае будем понимать каждый запуск единицы информации на преобразование (см. рис. 3), вне зависимости от происхождения по всей цепочке или только по ее части). Опуская несложные, но громоздкие выкладки, приведем окончательные результаты.

Вероятность возврата единицы информации на i-м этапе контроля d-м цикле $P^B_{e(d)i}$ может быть оценена по формуле

$$P^B_{e(d)i} = \left(A_m\right)^{\alpha} A_i,$$

где A_m *и* A_i — параметры, зависящие от числа этапов m_e и места i-го этапа в общей цепочке преобразований соответственно.

Эти параметры определяются соотношениями:

$$A_m = \sum_{i=1}^{m_e} R_i - \sum_{j<i}^{m_e} R_i R_j + \sum_{\xi<j<i}^{m_e} R_i R_j R_\xi - \ldots + \left(-1\right)^{m_e-1} R_1 R_2 \ldots R_{m_e}; \tag{11}$$

$$A_i = R_i - \sum_{j<i}^{i-1} R_i R_j + \sum_{\xi<j<i}^{i-1} R_i R_j R_\xi - \ldots + \left(-1\right)^{i-1} R_1 R_2 \ldots R_i, \tag{12}$$

где $R_i \le \left[P_{e(1,i)} \left(1 - K_{R(1,i)} + P_{koi}\left[1 - P_{e(1,i)}\right]\right)\right]$.

Здесь $P_{e(1,i)}$ — эквивалентная вероятность искажения единицы информации в результате ее прохождения через этапы преобразования с 1-го по i-й включительно; $K_{R(1,i)}$ — коэффициент редукции, характеризующий способность реализуемого на i-м этапе метода повышения достоверности выявить ошибки, вносимые на этапе с 1-го по i-й включительно [3].

Для упрощения оценок (11) и (12), учитывая, что $R_i < 1$, $R_j < 1$, $R_\xi < 1$, можно использовать верхние границы A'_m и A'_i:

$$A'_m = \sum_{i=1}^{m_e} R_i \ge A_m;\ A'_i = R_i \ge A_i. \tag{13}$$

Суммарное среднее время, затрачиваемое на i-е преобразование единицы первичной информации за m_e циклов $[T^*_{e(d)i}]_{\text{ср}}$, может быть оценено

$$\left[T^*_{e(d)i}\right]_{\text{ср}} \le T'_{ei} + \left(\tau'_{ei} + t'_{ei} + t'_{kei}\right)\frac{1 - \left[A'_m\right]^{\alpha}}{1 - A'_m} A'_i.$$

Общие средние затраты времени за d циклов по всем этапам определяются соотношением

$$\left[T^*_{e(d)i}\right]_{\text{ср}} \le T'_{ei} + \sum_{i=1}^{m_e}\left(\tau'_{ei} + t'_{ei} + t'_{kei}\right)\frac{1 - \left[A'_m\right]^{\alpha}}{1 - A'_m} A'_i. \tag{14}$$

При малом числе m_e и d могут использоваться в (13) и (14) точные значения A_m и A_i. Значение среднего увеличения времени сбора $[\Delta T_{e(d)}]_{\text{ср}}$ определяется соотношением

$$\left[\Delta T_{e(d)}\right]_{\text{ср}} \le \sum_{i=1}^{m_e}\left(\tau'_{ei} + t'_{ei} + t'_{kei}\right)\frac{1 - \left[A'_m\right]^{\alpha}}{1 - A'_m} A'_i.$$

Выполнение последовательности независимых этапов преобразования, контроля и коррекции с дополнительным общим контролем и коррекцией можно рассматривать как вариант сочета-

ния случаев, представленных на рис. 2 и 3, и все расчеты для него вести по формулам, предложенным ранее, при этом в качестве T'_{ei}, T'_{e} использовать значение $[T^{*}_{e}]_{\text{ср экв}}$.

Заключение

Рассмотренные в данной работе расчетные формулы позволяют на этапе проектирования системы преобразования информации в судовых информационных системах проводить расчет затрат времени на повышение достоверности преобразования информации и с учетом этого осуществлять выбор наиболее рациональных вариантов обеспечения достоверности данных в процессе их преобразования. Методика расчета временных затрат на преобразование информации в судовых системах может быть применима для различных схем преобразования информации с контролем и последующей коррекцией. Кроме того, в методике учитывается вероятность искажения единицы информации при прохождении ее через все этапы преобразований и коэффициент редукции, характеризующий способность реализуемого на каждом этапе метода повышения достоверности выявления ошибок.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Simson M. K.* Digital Communication over Fading Channels / M. K. Simson, M.-S. Alouini. — A John Wiley & Sons, 2005. — 900 p.

2. *Борисов В. И.* Помехозащищенность систем радиосвязи с расширением спектра сигналов методом псевдослучайной перестройки рабочей частоты / В. И. Борисов, В. М. Зинчук, А. Е. Лимарев [и др.]. — М.: Радио и связь, 2000. — 384 с.

3. *Борисов В. И.* Помехозащищенность систем радиосвязи с расширением спектра сигналов модуляцией несущей псевдослучайной последовательностью / В. И. Борисов, В. М. Зинчук, А. Е. Лимарев [и др.]. — М.: Радио и связь, 2003. — 640 с.

4. *Брусакова И. А.* Математическая модель функциональной надежности автоматизированных систем управления / И. А. Брусакова, К. П. Голоскоков // Вестник ИНЖЭКОНа. Серия: Технические науки. — 2010. — № 8. — С. 48–51.

5. *Голоскоков К. П.* Автоматизированная система испытаний в структуре системы управления качеством / К. П. Голоскоков // Научно-технические ведомости Санкт-Петербургского государственного политехнического университета. Информатика. Телекоммуникации. Управление. — 2008. — Т. 6. — № 69. — С. 116–120.

6. *Голоскоков К. П.* Прогнозирование и оценка технического состояния сложных систем / К. П. Голоскоков // Научно-технические ведомости Санкт-Петербургского государственного политехнического университета. — 2008. — № 53. — С. 164–168.

7. *Голоскоков К. П.* Формирование информационной базы для прогнозирования качества продукции / К. П. Голоскоков // Инновации. — 2009. — № S1. — С. 91–94.

8. *Голоскоков К. П.* Прогнозирование с применением теории распознавания образов / К. П. Голоскоков, М. В. Железняк // Вестник ИНЖЭКОНа. Серия: Технические науки. — 2011. — № 8. — С. 114–118.

9. *Григорьев В. А.* Сети и системы радиодоступа / В. А. Григорьев, О. И. Лагутенко, Ю. А. Распаев. — М.: Эко-Трендз, 2005. — 384 с.

10. *Типикина А. П.* Оценка программной надежности микропроцессорных релейных защит / А. П. Типикина, Л. С. Певцова // Интернет-журнал Науковедение. — 2015. — Т. 7. — № 2 (27). — С. 121. DOI: 10.15862/74TVN215.

11. *Трофимов А. С.* Метод оценки надежности цифровой релейной защиты энергосистем / А. С. Трофимов // Релейщик. — 2016. — № 3. — С. 29.

12. *Захаров О. Г.* О показателях надежности, связанных с «требованием на срабатывание» / О. Г. Захаров // Релейная защита и автоматизация. — 2013. — № 4. — С. 44–47.

13. *Захаров О. Г.* Контрольные испытания блоков питания на надежность / О. Г. Захаров // Релейная защита и автоматизация. — 2015. — № 1 (18). — С. 56–61.

14. *Захаров О. Г.* Надежность цифровых устройств релейной защиты. Показатели. Требования. Оценки / О. Г. Захаров. — М.: Инфра-Инженерия, 2014. — 128 с.

15. *Захаров О. Г.* О надёжности комбинированных блоков питания БПК-3(4) / О. Г. Захаров // Энергетик. — 2015. — № 9. — С. 47–50.

16. *Захаров О. Г.* Аппаратная надёжность устройств релейной защиты / О. Г. Захаров // Библиотечка электротехника. — 2016. — № 7 (217). — С. 1–88.

17. *Борисов В. И.* Вероятностные аналитические модели сетевой атаки с внедрением вредоносного программного обеспечения / В. И. Борисов, Н. М. Радько, А. А. Голозубов [и др.] // Информация и безопасность. — 2013. — Т. 16. — № 1. — С. 5–30.

18. *Лаврищева Е. М.* Сборочное программирование. Основы индустрии программных продуктов / Е. М. Лаврищева, В. Н. Грищенко. — Киев: Наукова Думка, 2009. — 372 с.

19. *Дроботун Е. Б.* Вероятностные характеристики процессов обеспечения безопасности функционирования автоматизированных систем в условиях компьютерных атак / Е. Б. Дроботун, Д. В. Козлов // Перспективы развития информационных технологий. — 2016. — № 29. — С. 185–193.

20. *Бойченко О. В.* Способы защиты операционных систем / О. В. Бойченко, А. С. Трофимов // Проблемы информационной безопасности: сб. тр. II Междунар. науч.-практ. конф. — Симферополь-Гурзуф, 2016. — С. 135–136.

21. *Дроботун Е. Б.* Программный комплекс расследования инцидентов информационной безопасности / Е. Б. Дроботун, Д. В. Козлов, А. С. Марковский // Программные продукты, системы и алгоритмы. — 2016. — № 2. — С. 8. DOI: 10.15827/2311-6749.16.2.8.

22. *Шабуров А. С.* Разработка модели защиты информации корпоративной сети на основе внедрения SIEM-системы. / А. С. Шабуров, В. И. Борисов // Вестник Пермского национального исследовательского политехнического университета. Электротехника, информационные технологии, системы управления. — 2016. — № 19. — С. 111–124.

23. *Дроботун Е. Б.* Построение модели угроз безопасности информации в автоматизированной системе управления критически важными объектами на основе сценариев действий нарушителя / Е. Б. Дроботун, О. В. Цветков // Программные продукты и системы. — 2016. — № 3–1. — С. 42–50. DOI: 10.15827/0236-235X.115.042-050.

24. *Дроботун Е. Б.* Синтез систем защиты автоматизированных систем управления от разрушающих программных воздействий / Е. Б. Дроботун // Программные продукты и системы. — 2016. — № 3–1. — С. 51–59. DOI: 10.15827/0236-235X.115.051-059.

25. *Дроботун Е. Б.* Оценка степени влияния антивирусных программных средств на качество функционирования информационно-вычислительных систем / Е. Б. Дроботун, Д. В. Козлов // Программные продукты и системы. — 2016. — № 3–2. — С. 129–134.

26. *Дроботун Е. Б.* Анализ активности и тенденций развития вредоносных программ типа «блокиратор-шифровальщик файлов» / Е. Б. Дроботун // Программные продукты и системы. — 2016. — № 2. — С. 77–82.

REFERENCES

1. Simson, Marvin K., and Mohamed-Slim Alouini. *Digital Communication over Fading Channels*. A John Wiley &Sons, 2005.

2. Borisov, V. I., V. M. Zinchuk, A. E. Limarev, et al. *Pomekhozashchishchennost' sistem radiosvyazi s rasshireniem spektra signalov metodom psevdosluchainoi perestroiki rabochei chastoty*. M.: Radio i svyaz', 2000.

3. Borisov, V. I., V. M. Zinchuk, A. E. Limarev, et al. *Pomekhozashchishchennost' sistem radiosvyazi s rasshireniem spektra signalov modulyatsiei nesushchei psevdosluchainoi posledovatel'nost'yu*. M.: Radio i svyaz', 2003.

4. Brusakova, Irina A., and Konstantin P. Goloskokov. "Mathematical model of functional reliability of the automated control systems." *Vestnik INZhEKONa. Seriya: Tekhnicheskie nauki* 8 (2010): 48–51.

5. Goloskokov, K. P. "Avtomatizirovannaya sistema ispytanii v strukture sistemy upravleniya kachestvom." *Nauchno-tekhnicheskie vedomosti Sankt-Peterburgskogo gosudarstvennogo politekhnicheskogo universiteta. Informatika. Telekommunikatsii. Upravlenie* 6.69 (2008): 116–120.

6. Goloskokov, K. P. "Prognozirovanie i otsenka tekhnicheskogo sostoyaniya slozhnykh system." *Nauchno-tekhnicheskie vedomosti Sankt-Peterburgskogo gosudarstvennogo politekhnicheskogo universiteta* 53 (2008): 164–168.

7. Goloskokov, Konstantin Petrovich. "Formation the information base for predicting product quality." *Innovations* S1 (2009): 91–94.

8. Goloskokov, Konstantin, and Maksim Zheleznyak. "Forecasting using the theory of pattern recognition." *Vestnik INZhEKONa. Seriya: Tekhnicheskie nauki* 8 (2011): 114–118.

9. Grigor'ev, V. A., O. I. Lagutenko, and Yu. A. Raspaev. *Seti i sistemy radiodostupa*. M.: Eko-Trendz, 2005.

10. Tipikina, Anna Petrovna, and Ludmila Sergeevna Pevtsova. "Evaluating software reliability of digital relays." *Naukovedenie* 7.2(27) (2015): 121. DOI: 10.15862/74TVN215.

11. Trofimov, A. S. "Metod otsenki nadezhnosti tsifrovoi releinoi zashchity energosistem." *Releishchik* 3 (2016): 29.

12. Zakharov, O. G. "O pokazatelyakh nadezhnosti, svyazannykh s «trebovaniem na srabatyvanie»." *Releinaya zashchita i avtomatizatsiya* 4 (2013): 44–47.

13. Zakharov, O. G. *Nadezhnost' tsifrovykh ustroistv releinoi zashchity. Pokazateli. Trebovaniya. Otsenki*. M.: Infra-Inzheneriya, 2014.

14. Zakharov, O. G. *Nadezhnost' tsifrovykh ustroistv releinoi zashchity. Pokazateli. Trebovaniya. Otsenki*. M.: Infra-Inzheneriya, 2014.

15. Zakharov, O. G. "O nadezhnosti kombinirovannykh blokov pitaniya BPK-3(4)." *Energetik* 9 (2015): 47–50.

16. Zakharov, O. G. "Apparatnaya nadezhnost' ustroistv releinoi zashchity." *Bibliotechka elektrotekhnika* 7(217) (2016): 1–88.

17. Borisov, V. I., N. M. Radko, A. A. Golozubov, I. L. Bataronov, and E. V. Ermilov. "Probability analytical models with the introduction of network attacks vredonostnogo software." *Informatsiya i bezopasnost'* 16.1 (2013): 5–30.

18. Lavrishheva, E. M. *Sborochnoe programmirovanie. Osnovy industrii programmnyx produktov.* K.: Naukova dumka, 2009.

19. Drobotun, E. B., and D. V. Kozlov. "Veroyatnostnye kharakteristiki protsessov obespecheniya bezopasnosti funktsionirovaniya avtomatizirovannykh sistem v usloviyakh komp'yuternykh atak." *Perspektivy razvitiya informatsionnykh tekhnologii* 29 (2016): 185–193.

20. Boichenko, O. V., and A. S. Trofimov. "Sposoby zashchity operatsionnykh system." *Problemy informatsionnoi bezopasnosti Sbornik trudov II Mezhdunarodnoi nauchno-prakticheskoi konferentsii*. Simferopol'-Gurzuf, 2016. 135–136.

21. Drobotun, E. B., D. V. Kozlov, and A. S. Markovskii. "Programmnyi kompleks rassledovaniya intsidentov informatsionnoi bezopasnosti." *Programmnye produkty, sistemy i algoritmy* 2 (2016): 8. DOI: 10.15827/2311-6749.16.2.8.

22. Shaburov, A. S., and V. I. Borisov. "Developing model information protection corporate network based on the implementation of SIEM-system." *PNRPU Bulletin. Electrotechnics, Informational Technologies, Control Systems* 19 (2016): 111–124.

23. Drobotun, E. B., and O. V. Tsvetkov. "Modeling information security threats in the automated control system for crucial objects on the basis of attack scenarios." *Software & Systems* 3-1 (2016): 42–50. DOI: 10.15827/0236-235X.115.042-050.

24. Drobotun, E. B. "Synthesis of protection systems of automated control systems against destroying program influence." *Software & Systems* 3-1 (2016): 51–59. DOI: 10.15827/0236-235X.115.051-059.

25. Drobotun, E. B., and D. V. Kozlov. "Otsenka stepeni vliyaniya antivirusnykh programmnykh sredstv na kachestvo funktsionirovaniya informatsionno-vychislitel'nykh system." *Software & Systems* 3-2 (2016): 129–134.

26. Drobotun, E. B. "Analiz aktivnosti i tendentsii razvitiya vredonosnykh programm tipa «blokirator-shifroval'shchik failov»." *Software & Systems* 2 (2016): 77–82.

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: *goloskokovkp@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

Goloskokov, 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: *goloskokovkp@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 21 февраля 2017 г.
Received: February 21, 2017.

Научное периодическое издание

Вестник Государственного университета морского и речного флота имени адмирала С. О. Макарова

Том 9. № 2

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 25.04.17. Формат 60×90/8
Гарнитура Times New Roman. Усл. печ. л. 27,25. Тираж 500 экз. Заказ № 248/17

Государственный университет морского и речного флота имени адмирала С. О. Макарова
198035, Санкт-Петербург, ул. Двинская, 5/7