

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**

Выпуск 5 (33)

**САНКТ-ПЕТЕРБУРГ
2015**

Вестник Государственного университета морского и речного флота имени адмирала С. О. Макарова. — СПб.: ГУМРФ имени адмирала С. О. Макарова, 2015. — Вып. 5 (33). — 228 с.

ISSN 2309-5180

«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 средства массовой информации от 17 июля 2013 г. ПИ № ФС 77-54734).

В Вестнике публикуются материалы научных исследований, а также статьи для опубликования 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»; **08.00.00 «Экономические науки»** в разделе «Экономика и управление на транспорте»; **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 публикуются на русском и английском языках.

Статьи тщательно отбираются по критериям новизны, актуальности, научно-практической значимости, возможности реального использования описанных в них новых технологий на водном транспорте. По содержанию статьи должны соответствовать тематике журнала, его целям и задачам.

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.

Вестнику присвоен международный стандартный номер сериального периодического издания ISSN 2309-5180.

С 2009 г. журнал включен в базу данных «Российский индекс научного цитирования» (РИНЦ).

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



Главный редактор

С. О. Барышников,

д.т.н., профессор

rector@gumrf.ru

Зам. гл. редактора

Т. А. Пантина, д.э.н., проф.

PantinaTA@gumrf.ru

Ю. Н. Горбачев —

ген. конструктор ОАО
«Инженерный центр
судостроения», д.т.н., проф.

С. Гуцма —

ректор Морской 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 —

ген. директор 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., член-
корреспондент РАН

Р. М. Юсупов —

директор Санкт-Петербургского
института информатики и
автоматизации РАН, д.т.н.,
проф., член-корреспондент РАН

РЕДАКЦИЯ:

E-mail: journal@gumrf.ru

http://journal.gumrf.ru

ЭКСПЛУАТАЦИЯ ВОДНОГО ТРАНСПОРТА, СУДОВОЖДЕНИЕ 7

Дерябин В. В. Нейросетевые системы прогноза скорости дрейфа судна 7

Агарков С. А. Влияние ветра при движении лагом на управление по отклонениям 14

Ершов А. А., Теренчук А. В. Практический способ определения параметрического
резонанса по бортовой качке судна 18Майоров Н. Н., Кириченко А. В., Фетисов В. А. Моделирование контейнерооборота
морской транспортной системы на основе математического аппарата
гравитационной модели 26Кузнецов А. Л., Павленко С. С., Щербакова-Слюсаренко В. Н. Моделирование сетей
контейнерного грузораспределения 33Чебан А. Ю. Комплекс для перегрузки насыпных строительных материалов
в средства водного транспорта 43Мойсеев С. С., Мейлер Л. Е. Методика оценки рисков аварийности
рыболовных судов 47Акмайкин Д. А., Ключева С. Ф., Салюк П. А. Эвристический поиск оптимального
маршрута судна по северному морскому пути 55

ВОДНЫЕ ПУТИ СООБЩЕНИЯ И ГИДРОГРАФИЯ 63

Фирсов Ю. Г. Геодезические аспекты разграничения морских пространств
с США и пересмотренное представление России по границам континентального
шельфа в Арктике 63Ермаков С. В. Особенности определения фактической дальности видимости огней
маяков по указанной на карте величине 73Нычик Т. Ю. Управление риском аварий и транспортных происшествий
в судоходных шлюзах 80

СУДОСТРОЕНИЕ И СУДОРЕМОНТ 86

Красюк А. Б., Чистов В. Б. Дефектация и ремонт листов ледового пояса ледоколов
речного флота 86Лебедева М. П., Васильева А. Б., [Инютина Т. Н.] Гидродинамические характеристики
взаимодействия корпуса судна с плоской вертикальной стенкой 92Метелица С. С. Экспериментальное исследование влияния расхода газа
для создания воздушной каверны на днище катамаранов 102Куликов В. А. Моделирование программными средствами случайных погрешностей
измерения в судостроении 110СУДОВЫЕ ЭНЕРГЕТИЧЕСКИЕ УСТАНОВКИ,
СИСТЕМЫ И УСТРОЙСТВА 119Безюков О. К., Денисова А. А. Методы оценки научно-технического уровня судов,
энергетических установок и контрольно-измерительных приборов 119Цветков Ю. Н., Волков А. С. Особенности относительного положения
кривых Герси – Штрибека, построенных для масел разной вязкости,
в области гидродинамической смазки 130Чернышов Е. А., Романова Е. А., Романов А. Д. Развитие воздухонезависимых
энергетических установок подводных лодок 140

**Члены
редколлегии:**

О. К. Безюков,
д.т.н., проф.
В. В. Веселков,
д.т.н., проф.
П. А. Гарибин,
д.т.н., проф.
Д. П. Голоскоков,
д.т.н., проф.
Б. П. Ивченко,
д.т.н., проф.
Ю. М. Искандеров,
д.т.н., проф.
О. Г. Каратаев,
д.т.н., проф.
А. В. Кириченко,
д.т.н., проф.
М. А. Колосов,
д.т.н., проф.
Е. А. Королева,
д.э.н., проф.
И. И. Костылев,
д.т.н., проф.
Е. А. Лаврентьева,
д.э.н., проф.
А. Ю. Ластовцев,
к.т.н., проф.
С. Б. Лебедев,
д.э.н., проф.
В. А. Логиновский,
д.т.н., проф.
Г. В. Макаров,
д.т.н., проф.
В. Е. Марлей,
д.т.н., проф.
А. М. Никитин,
д.т.н., проф.
А. П. Нырков,
д.т.н., проф.
Л. И. Погодаев,
д.т.н., проф.
Н. В. Растрьгин,
к.т.н., доц.
В. И. Решняк,
д.т.н., проф.
В. В. Романовский,
д.т.н., проф.
А. А. Сикарев,
д.т.н., проф.
И. П. Скобелева,
д.э.н., проф.
С. В. Смоленцев,
д.т.н., проф.
А. Л. Степанов,
д.т.н., проф.
М. В. Сухотерин,
д.т.н., проф.
Е. Г. Трунин,
к.э.н., директор РРР
Г. В. Ушакова,
к.и.н., проф.
В. И. Черненко,
д.т.н., проф.
В. Б. Чистов,
д.т.н., проф.

Петров А. П., Живлюк Г. Е. Развитие электронных систем управления судовыми двигателями внутреннего сгорания 152
Саушев А. В., Троян Д. И. Идентификация электроприводов портовых перегрузочных машин 169

**ИНФОРМАЦИОННЫЕ ТЕХНОЛОГИИ И АВТОМАТИЗАЦИЯ
НА ТРАНСПОРТЕ 184**

Люсьченко А. Н., Нырков А. П., Швед В. Г. Модель системы обеспечения информационной безопасности на транспорте 184
Чертков А. А., Вардомская А. А., Дмитриев А. А. Автоматизация определения критического пути в логистической системе 194
Кирсанов М. Н. Модификация и анализ фильтров выделения контуров изображений 201
Голоскоков Д. П. Моделирование конформных отображений вариационным методом в системе символьных вычислений Maple 207
Семенов Е. С., Галич С. В., Тюхтяев Д. А. Анализ и классификация задержек, возникающих при работе протокола ARP в программно-конфигурируемых сетях 217

Международная выставка и конференция по гражданскому судостроению, судоходству, деятельности портов и освоению океана и шельфа «НЕВА-2015» 225
Памяти Горбачева Юрия Николаевича 227

OPERATION OF WATER TRANSPORT, NAVIGATION	7
<i>Deryabin V. V.</i> Neural network based vessel's speed of drift prediction systems	7
<i>Agarkov S. A.</i> Wind effect on operation by deviations during broadside motion	14
<i>Ershov A. A., Terenchuk A. V.</i> Practical method for determining the parametric resonance of rolling of the vessel	18
<i>Majorov N. N., Kirichenko A. V., Fetisov V. A.</i> Modeling of marine container transport system on the basis of the mathematical apparatus of the gravity model	26
<i>Kuznetsov A. L., Pavlenko S. S., Scherbackova-Slysarenko V. N.</i> Container distribution networks modeling	33
<i>Cheban A. Yu.</i> Complex for handling of dry bulk construction materials in water transport	43
<i>Moiseenko S. S., Meyler L. E.</i> A method of risks assessment for the fishing vessels accident	47
<i>Akmaykin D. A., Klyueva S. F., Salyuk P. A.</i> Heuristic search for the optimal route ship Northern Sea Route	55
WATERWAYS AND HYDROGRAPHY	63
<i>Firsov Yu. G.</i> Geodetic aspects of the maritime delimitation with the USA and the partial revised submission of Russia in respect of the continental shelf in the Arctic Ocean	63
<i>Ermakov S. V.</i> Features of determine the actual range of lights visibility by shown on the map value	73
<i>Nychik T. Yu.</i> Risk management of accidents and traffic events in navigation lock	80
SHIPBUILDING AND SHIP REPAIR	86
<i>Krasyuk A. B., Tchistov V. B.</i> Defect detection and repair of ice belt sheets for inland water icebreakers	86
<i>Lebedeva M. P., Vasileva A. B., Injutina T. N.</i> The ship flat wall interaction hydrodynamical characteristic	92
<i>Metelitsa S. S.</i> Experimental research of the influence of the gas flow for creation of the air cavity on the bottom of catamarans	102
<i>Kulikov V. A.</i> Simulacion of random measurement errors in shipbuilding programmatically	110
SHIP POWER PLANTS, SYSTEMS AND DEVICES	119
<i>Bezyukov O. K., Denisova A. A.</i> Methods for assessment of scientific and technical level of ship power plants and control instrumentation	119
<i>Tsvetkov Yu. N., Volkov A. S.</i> Peculiarities of the relative position of the Hersey-Stribeck curves for oils of different viscosity in hydrodynamic area	130
<i>Chernyshov E. A., Romanova E. A., Romanov A. D.</i> Development of airindependent power stations of submarines	140
<i>Petrov A. P., Zhivlyuk G. E.</i> Development of electronic control systems of internal combustion engines	152
<i>Saushev A. V., Trojan D. I.</i> Identification of electric drives of port reloading cars	169

edition **5(33)**
2015

EDITOR-IN-CHIEF

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

Deputy Editor-in-Chief

T. A. Pantina
doctor of economic Sciences, Prof.
PantinaTA@gumrf.ru

Yu. N. Gorbachev —
general Designer of JSC
“Engineering center of
shipbuilding”, doctor of technical
Sciences, Prof.

S. Gutsma —
Rector of the 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 —
General Director “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

R. 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, Prof.
V. V. Veselkov,
doctor of technical Sciences, Prof.
P. A. Garibin,
doctor of technical Sciences, Prof.
D. P. Goloskokov,
doctor of technical Sciences, Prof.
B. P. Ivchenko,
doctor of technical Sciences, Prof.
Y. M. Iskanderov,
doctor of technical Sciences, Prof.
O. G. Karatayev,
doctor of technical Sciences, Prof.
A. V. Kirichenko,
doctor of technical Sciences, Prof.
M. A. Kolosov,
doctor of technical Sciences, Prof.
Ye. A. Koroleva,
doctor of economic Sciences, Prof.
I. I. Kostylev,
doctor of technical Sciences, Prof.
Ye. A. Lavrentyeva,
doctor of economic Sciences, Prof.
A. Yu. Lastovtsev,
candidate of technical Sciences, Prof.
S. B. Lebedev,
doctor of economic Sciences, Prof.
V. A. Loginovskiy,
doctor of technical Sciences, Prof.
G. V. Makarov,
doctor of technical Sciences, Prof.
V. Ye. Marley,
doctor of technical Sciences, Prof.
A. M. Nikitin,
doctor of technical Sciences, Prof.
A. P. Nyrkov,
doctor of technical Sciences, Prof.
L. I. Pogodayev,
doctor of technical Sciences, Prof.
N. V. Rastrygin,
candidate of technical Sciences,
Associate Prof.
V. I. Reshnyak,
doctor of technical Sciences, Prof.
V. V. Romanovskiy,
doctor of technical Sciences, Prof.
A. A. Sikarev,
doctor of technical Sciences, Prof.
I. P. Skobeleva,
doctor of economic Sciences, Prof.
S. V. Smolentsev,
doctor of technical Sciences, Prof.
A. L. Stepanov,
doctor of technical Sciences, Prof.
M. V. Sukhoterin,
doctor of technical Sciences, Prof.
Ye. G. Trunin,
candidate of economic Sciences,
General Director
of FSI Russian River Register
G. V. Ushakova,
doctor of History, Prof.
V. I. Chernenko,
doctor of technical Sciences, Prof.
V. B. Chistov,
doctor of technical Sciences, Prof.
A. A. Yershov,
doctor of technical Sciences,
Associate Prof.
A. P. Gorobtsov,
candidate of technical Sciences,
Associate Prof.
B. A. Smyslov,
Candidate of Law, Prof.
A. Yu. Sharonov,
candidate of Geography, Associate Prof.
A. Ye. Sazonov,
doctor of technical Sciences, Prof.

INFORMATION TECHNOLOGY AND AUTOMATION IN TRANSPORT

.....	184
<i>Lyulchenko A. N., Nyrkov A. P., Shved V. G.</i> Model of the system providing information security on transport	184
<i>Chertkov A. A., Vardomskeya A. A., Dmitriev A. A.</i> Automation to define critical way in logistical system	194
<i>Kirsanov M. N.</i> Modification and analysis of edge detection filters	201
<i>Goloskokov D. P.</i> Modelling of conformal mappings by a variation method in system of symbolical evaluations Maple	207
<i>Semenov E. S., Galich S. V., Tyukhtyaev D. A.</i> Analysis and classification of delays of ARP protocol in software-defined networks	217

ЭКСПЛУАТАЦИЯ ВОДНОГО ТРАНСПОРТА, СУДОВОЖДЕНИЕ

УДК. 656.61.052

В. В. Дерябин

НЕЙРОСЕТЕВЫЕ СИСТЕМЫ ПРОГНОЗА СКОРОСТИ ДРЕЙФА СУДНА

Рассматривается построение нейросетевых систем прогноза скорости дрейфа судна для ведения счисления его пути. Синтезированы системы трёх типов. В каждом случае нейронная сеть принимает на вход величины, характеризующие параметры движения судна, силы со стороны движительно-рулевого комплекса, ветра и волнения, а также силы сопротивления. Выходным сигналом является скорость дрейфа судна. Формирование образцов для обучения сетей выполняется при помощи компьютерного моделирования условий проведения натурного эксперимента для сухогрузного судна среднего тоннажа. Технология тестирования нейронных сетей предполагает рассмотрение модельных ситуаций с различным уровнем и характером изменения действующих на судно управляющих и возмущающих воздействий. Проверка работоспособности синтезированных систем позволяет сделать вывод об их приемлемой для навигационных целей средней точности.

Ключевые слова: нейронная сеть, скорость дрейфа судна, счисление, компьютерное моделирование, тестирование.

БОЛЬШОЕ количество современных судов морского флота оборудовано относительным лагом, измеряющим только продольную составляющую его скорости, и гирокомпасом. При ведении счисления с использованием указанных приборов возникает задача учёта скорости дрейфа судна. Существующие традиционные методы её решения имеют не всегда приемлемую точность, так как не учитывают многие закономерности движения судна, чувствительны к погрешностям исходных данных, часто представляют собой слишком упрощённые линейные алгоритмы. Поиски путей повышения точности прогноза скорости дрейфа судна, а, следовательно, и счислимых координат его места, должны учитывать свойства нелинейности процесса счисления и неопределённости исходных данных. Как известно, в условиях нелинейности системы, неопределённости и неполноты исходных данных хорошо работают алгоритмы, основанные на применении искусственных нейронных сетей [1], [2].

Идеи использования нейронных сетей для прогноза параметров движения судна содержатся, например, в работах [3] — [5]. В данных исследованиях нейронная сеть выполняет функцию идентификации модели движения судна. Несколько иной подход к применению нейросетевых технологий для оценки навигационных параметров судна предлагается в статьях [6] — [8], где нейронные сети используются для прогноза траектории, а коррекция их свободных параметров выполняется в режиме реального времени по мере движения судна. Как правило, в большинстве исследований не учитываются внешние факторы: ветер и волнение при построении нейросетевых систем. Кроме того, тестирование сетей выполняется в основном лишь для узких классов стандартных манёвров наподобие «циркуляция» и «зигзаг», а поведение их в других навигационных ситуациях не рассматривается. Использование нейронной сети для прогноза счислимых параметров движения судна предполагает проверку её работоспособности на множестве различных входных сигналов.

В статье рассматривается три варианта построения нейронных сетей, прогнозирующих скорость дрейфа судна в условиях внешних возмущающих факторов. Настройка их свободных параметров выполняется на основе образцов, которые могут быть получены в ходе натурных наблюдений по специальной методике. Синтезированные системы проходят тестирование в различных навигационных ситуациях, характеризующихся определёнными гидрометеорологическими условиями и режимом работы движительно-рулевого комплекса. Излагаемое в данной статье ис-

следование во многом базируется на положениях работы [9], являясь, в то же время, развитием изложенных в ней идей.

Вначале определим вид входных и выходных сигналов сетей. Входной сигнал X нейронных сетей имеет различный вид для систем разных типов (табл. 1).

Таблица 1

Вид входных сигналов нейронных сетей

Тип нейросетевой системы	Силовой подход	Непосредственный подход	Непосредственный подход (статический вариант)
Вид входного сигнала	$\begin{pmatrix} \omega V_{x1} \\ F_{Py1} \\ F_{Ry1} \\ F_{vy1} \\ F_{Ay1} \\ F_{Wy1} \end{pmatrix}$	$\begin{pmatrix} \omega V_{x1} \\ V_{x1} \\ \delta \\ n \\ V_R^2 \sin \alpha \\ \rho g (h^2 / \lambda) \sin \gamma \end{pmatrix}$	$\begin{pmatrix} \int_0^{\Delta t} V_{x1} dt, \int_0^{\Delta t} V_{y1} dt, \\ \int_0^{\Delta t} (V_{x1} \omega) dt, \int_0^{\Delta t} \delta dt, \\ \int_0^{\Delta t} n dt, \int_0^{\Delta t} V_R^2 \sin \alpha dt, \\ \int_0^{\Delta t} \rho g (h^2 / \lambda) \sin \gamma dt \end{pmatrix}^T$

Примечание. В табл. 1 использована следующая система обозначений: V_{x1} — продольная составляющая относительной скорости судна; V_{y1} — скорость дрейфа; ω — угловая скорость поворота; δ — угол перекадки руля; n — число оборотов винта; V_R, α — соответственно скорость и курсовой угол относительного ветра; h, λ, γ — соответственно высота, длина и курсовой угол регулярного волнения; F_{y1} — проекция сил на поперечную ось, а их индексы относятся: v — к силам и моментам вязкостного трения, P — к поперечной силе гребного винта, R — к влиянию руля, A, W — характеризуют воздействие ветра и волнения. Символы g, ρ обозначают, соответственно, ускорение свободного падения и плотность морской воды, символ Δt — интервал интегрирования по времени.

Вид входного сигнала нейронных сетей позволяет дать условные названия каждому из вариантов их построения. В случае «силового» подхода пять из шести компонент входного вектора образуют силы, действующие на корпус судна. Их расчёт выполняется на основе известных из теории корабля соотношений, используемых в [10] при создании модели движения судна в горизонтальной плоскости. Перед обучением входные и выходные сигналы масштабируются, для чего необходимо знать их экстремальные значения. При *силовом подходе* определение границ возможных значений сил, действующих на корпус судна, возможно либо на основе теоретических соображений, либо с использованием результатов имитационного моделирования, как это было проделано в [9]. При *непосредственном подходе* компоненты входного сигнала составляют величины, характеризующие действие соответствующих сил на корпус судна. В данном случае предполагается, что закон преобразования таких величин в силовые воздействия заложен в структуре и коэффициентах нейронной сети. Вычисление границ возможных значений компонент входного сигнала при непосредственном подходе выполняется на основе данных о маневренных характеристиках судна, ограничениях его движительно-рулевого комплекса, сведениях о предельных значениях характеристик ветра и волнения. При непосредственном подходе (*статический вариант* нейронной сети) предполагается учёт времени непосредственно во входных сигналах за счёт интегрирования по времени величин, характеризующих силовые воздействия на интервале Δt , равном 5 мин. Следует отметить, что при формировании набора учебных данных при малой дискретности измерений компоненты входного сигнала статической сети будут мало отличаться в смежные моменты времени. Поэтому необходимо также выбрать интервал $\Delta t'$, через который записываются образцы. В настоящем исследовании значение величины $\Delta t'$ выбрано равным 2,5 мин — половине Δt .

Каждый из трёх указанных ранее подходов имеет свои отличительные особенности. Так, особенностью нейронной сети, реализующей «силовой» подход, является то, что такую сеть можно использовать и для прогноза скорости дрейфа других судов, имеющих близкие по отношению к эталонному судну инерционно-массовые характеристики. Однако вычисление отдельных сил выполняется, так или иначе, на основе определённых соотношений, которые могут быть неадекватны реальной динамике судна и его движительно-рулевого комплекса. Иными словами, в случае «силового» подхода потеря точности возможна уже на этапе вычисления компонент входного сигнала. «Непосредственный» вариант использования нейронной сети лишён указанного недостатка, но основная проблема при его реализации заключается в определении набора входных величин, однозначно определяющих динамику судна в текущих условиях плавания. Особую сложность представляет определение вида величин, характеризующих влияние волнения.

Преимуществом «статического» подхода по отношению к динамическим вариантам нейронных сетей является относительно невысокое количество свободных параметров (весов и порогов), что ускоряет процесс обучения. Тем не менее, учёт времени непосредственно в компонентах входного сигнала требует ответа на вопрос о выборе, в частности, длины промежутка времени интегрирования Δt .

Рассмотрим теперь архитектуру нейронных сетей. В случае «статического» варианта используется двухслойная нейронная сеть прямого распространения (FFNN — Feed Forward Neural Network), первый слой которой содержит 20 нейронов с сигмоидальными функциями активации в виде гиперболического тангенса, а второй — один нейрон с тождественной функцией активации. Общий вид нейронной сети представлен на рис. 1.

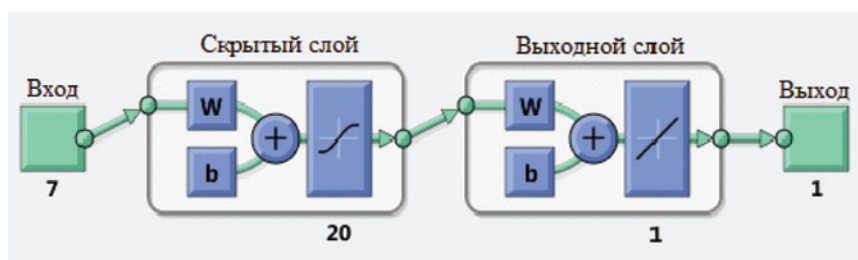


Рис. 1. Общий вид нейронной сети («статический» вариант): 7 — размерность входного сигнала; 20 — число нейронов в скрытом слое; 1 — количество нейронов в выходном слое; 1 — размерность выходного сигнала

В остальных случаях («силовой» и «непосредственный» подход) в структуру нейронной сети добавляются линии единичных задержек как по входному, так и выходному сигналу. Их число составляет пять. Таким образом, используются динамические нейронные сети. Общий их вид изображён на рис. 2.

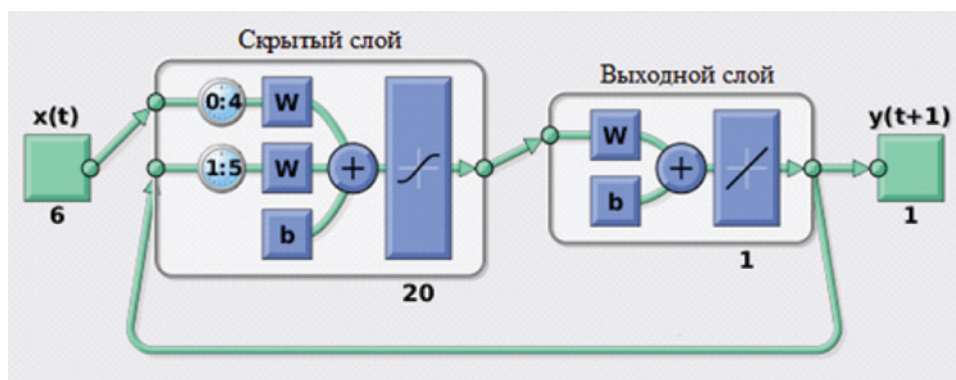


Рис. 2. Общий вид нейронной сети («силовой» и «непосредственный» подход): 6 — размерность вектора входного сигнала; 20 — число нейронов в скрытом слое; 1 — число нейронов в выходном слое; 1 — размерность вектора выходного сигнала

Общим для структуры нейронных сетей, используемых для решения задачи прогноза скорости дрейфа судна, является наличие в их структуре нейронов с нелинейными функциями активации в виде гиперболического тангенса. Выбор нелинейной функции активации обусловлен тем, что преобразование внешних возмущений «через судно» в скорость дрейфа носит качественно нелинейный характер. Тем не менее, в качестве функции активации нейронов могут использоваться и другие нелинейные функции, например, логистическая. В фундаментальном труде по нейронным сетям [2] содержатся эвристические рекомендации по проектированию нейросетевых систем, обучение которых выполняется с использованием алгоритма обратного распространения ошибки. В соответствии с данными рекомендациями использование нечётных сигмоидальных функций, к которым и относится гиперболический тангенс, является более предпочтительным по сравнению с другими вариантами. Так, логистическая функция не удовлетворяет условию нечётности. Выбор нелинейных функций в классе сигмоидальных объясняется их способностью поддерживать баланс между нелинейным и линейным поведением моделируемой системы [2], что характерно для прогноза скорости дрейфа судна в условиях внешних возмущений.

Формирование образцов для обучения нейронных сетей выполнялось на основе имитационного моделирования условий проведения натурального эксперимента для т/х «Инженер Плавинский», имеющего массовое водоизмещение 14300 т при осадке 7 м. Методика проведения эксперимента подробно описана в [9]. Она заключается в создании набора модельных ситуаций, каждая из которых представляет собой плавание судна в течение 3 ч с удерживаемыми в ходе него постоянными значениями угла перекладки руля и числа оборотов винта. Рассматриваются всевозможные комбинации дискретных значений указанных величин. В процессе обучения используется два множества образцов: *учебное*, на основе которого выполняется настройка сети, и *тестовое*, образцы которого используются для контроля обобщающих свойств сети по мере обучения. Характеристикой адекватности нейронной сети выбирается наибольшее значение модуля ошибки скорости дрейфа на тестовой выборке $e_{\max}$.

При обучении динамических нейронных сетей следует учитывать тот факт, что образцы модельных ситуаций представляют собой независимые друг от друга наборы данных, поэтому при объединении их в одну общую выборку будет нарушена хронологическая последовательность движения судна. Для обхода данного затруднения была использована схема обучения, когда объединение образцов модельных ситуаций в одну общую выборку не происходит, а учебные выборки каждой модельной ситуации подаются последовательно для обучения сети, которое, в свою очередь, происходит в пакетном режиме с одной итерацией. Такой метод обучения может быть назван *последовательно-пакетным*. Таким образом, эпоха обучения в данном случае есть однократное рассмотрение учебных выборок всех модельных ситуаций с коррекцией коэффициентов для каждой выборки. Для настройки параметров нейронной сети, реализующей «силовой» подход, выбирается метод Левенберга — Марквардта. По мере обучения значение величины $e_{\max}$ достигло минимального значения 0,3486 м/с. При обучении нейронной сети, представляющей «непосредственный» подход, в качестве алгоритма обучения использовался метод градиентного спуска с инерционным членом и адаптивным параметром скорости обучения. Следует отметить, что методы обучения второго порядка (Левенберга — Марквардта, сопряжённых градиентов и др.) обнаружили свою неработоспособность: процесс обучения расходился уже на первом цикле. Лучшее состояние сети соответствует величине $e_{\max}$, равной 2,0706 м/с.

Для статической нейронной сети порядок следования образцов на стадии обучения не имеет такого значения, как при обучении динамических сетей, т. е. образцы в обучающем множестве могут быть сгруппированы в произвольном порядке, что существенно облегчает процесс формирования обучающей выборки. Алгоритмом коррекции коэффициентов сети выбран способ Левенберга — Марквардта. В ходе обучения наименьшее значение величины $e_{\max}$ составило 1,0609 м/с.

После обучения нейросетевые системы проходят тестирование по технологии, изложенной в [9], заключающейся в формировании модельных ситуаций по принципу постоянства действующих на судно управляющих и возмущающих воздействий. В программу тестирования входят и

удержание судна на заданном курсе, и движение с фиксированным углом перекладки руля и постоянным числом оборотов винта, и плавание с изменением управляющих воздействий по определённому закону. В ходе тестирования гидрометеорологические условия могут как сохраняться неизменными в течение плавания, так и носить переменный характер. Величины, их характеризующие, принимают значения из возможных диапазонов. Так, например, скорость истинного ветра варьируется от 0 до 30 м/с, высота волнения принимает значения от 0 до 10 м. Было рассмотрено 10000 модельных ситуаций, каждая из которых представляет собой плавание судна в течение четырёх часов.

Из всех вариантов работы нейронных сетей можно выделить два основных. Первый из них наблюдается, когда на временном промежутке плавания все компоненты входного сигнала лежат в пределах, достигнутых в ходе обучения сети, т. е. можно сказать, что сеть работает в режиме «интерполяции». Так как сеть обучалась с использованием образцов, полученных в гидрометеорологических условиях средней интенсивности, в рабочем режиме будут наблюдаться ситуации, когда хотя бы одна компонента входного вектора системы выходит во время плавания за границы значений, установленных на стадии обучения (второй вариант работы нейронных сетей). В таком случае нейронная сеть уже работает в другом режиме — режиме «экстраполяции». В ходе тестирования указанные два режима различались и для каждого из них определялись свои характеристики точности счисления. Результаты тестирования приводятся в табл. 2, где в круглых скобках указаны значения соответствующих величин для режима «интерполяции». Как видно из таблицы, нейронные сети позволяют прогнозировать скорость дрейфа и определять координаты места судна лишь с удовлетворительной для навигационных целей средней точностью. Наибольшие же значения их ошибок достигают существенных величин на временном промежутке плавания. Данный факт можно объяснить несовершенством этапов построения нейросетевых систем, к которым относятся определение вида входного сигнала, выбор архитектуры, а также формирование образцов и обучение сетей. Так, например, на стадии выбора вида компонент входного сигнала не проводилось исследование влияния удельного веса каждой компоненты на погрешность счисления места судна. Ситуация осложняется также тем, что влияние каждого фактора на скорость дрейфа судна, в общем случае, будет зависеть и от значений других компонент входного сигнала, т. е. от конкретных условий плавания. На этапе выбора архитектуры не исследовались вопросы выбора оптимального количества слоёв сети, нейронов, единичных задержек, времени интегрирования компонент для статического варианта и др.

Таблица 2

Результаты тестирования нейронных сетей

10000 модельных ситуаций, из них	«Силовой» подход	«Непосредственный» подход	«Непосредственный» подход (статический вариант)
Количество ситуаций режима «интерполяции»	2032	857	3547
Наибольший модуль ошибки скорости дрейфа, м/с	10.97 (0.90)	19.90 (4.15)	10.10 (8.2)
Средний модуль ошибки скорости дрейфа, м/с	0.24 (0.10)	0.57 (0.33)	0.45 (0.33)
Наибольший максимум модуля невязки за четыре часа, мили	14.35 (2.76)	23.93 (5.82)	18.36 (8.72)
Средний максимум модуля невязки за четыре часа, мили	0.87 (0.44)	1.81 (0.83)	1.28 (0.84)

Наибольшая точность определения траектории достигается с использованием нейронной сети, реализующей «силовой» подход. Данное обстоятельство можно объяснить тем, что силы есть величины, однозначно определяющие динамику судна в конкретных условиях плавания,

в то время как вид отдельных компонент входного сигнала для нейронных сетей, реализующих «непосредственный» подход, может вызывать сомнения в плане однозначности их вклада в движение судна. В особенности это относится к составляющей, которая характеризует влияние волнения.

Использование сети в режиме «интерполяции» позволяет получать навигационные параметры судна с большей точностью, чем в режиме «экстраполяции». В случае, когда входные сигналы не превосходят по абсолютной величине наблюдаемые на стадии обучения значения, для нейронной сети, реализующей «силовой» подход, можно даже говорить о приемлемой навигационной точности определения счислимых координат с позиции «максимального» критерия. Вывод о существовании данной закономерности сделан лишь для рассмотренных модельных ситуаций. Количество навигационных ситуаций в режиме «интерполяции» значительно меньше, чем для режима «экстраполяции», что существенно снижает степень уверенности в большей точности «интерполяционных» сигналов при каких бы то ни было условиях плавания. Тем не менее, сформулированный вывод может иметь некоторое эвристическое толкование. Действительно, в рамках известных для сети границ компонент входного сигнала основные закономерности движения судна, в том числе и нелинейности, запоминаются в структуре системы. При выходе входных сигналов за указанные пределы (особенно верхние) характер динамики судна может существенно изменяться, и это изменение уже не может быть учтено нейронной сетью с достаточной точностью.

Результаты тестирования нейронных сетей в рассмотренных модельных ситуациях позволяют сделать ещё один важный вывод, который заключается в том, что прогноз нейронной сетью скорости дрейфа судна и определение на его основе траектории движения представляют собой хоть и близкие по цели, но всё же различные задачи. Действительно, как следует из табл. 2, наиболее точной по определению скорости дрейфа судна является нейронная сеть, реализующая «непосредственный» подход в статическом исполнении. Однако наиболее точной в отношении определения именно счислимых координат является сеть, реализующая «силовой» подход. Указанное обстоятельство может быть объяснено тем, что на пути от скорости дрейфа к координатам лежит алгоритм, в определённых условиях устойчивый к значительным случайным колебаниям ошибки скорости дрейфа судна.

Для контроля обобщающих свойств нейронной сети на стадии обучения в качестве меры её адекватности было выбрано наибольшее значение модуля ошибки скорости дрейфа на тестирующей выборке $e_{\max}$. Рейтинг синтезированных систем по точности определения скорости дрейфа в ходе тестирования не соответствует значениям $e_{\max}$, которые были достигнуты в результате их обучения. В то же время, по точности траектории рейтинг сетей находится в полном соответствии с их распределением по величине $e_{\max}$. Таким образом, по результатам тестирования можно сделать вывод о целесообразности использования наибольшего модуля ошибки скорости дрейфа в качестве меры адекватности нейросетевых систем на стадии обучения.

На основе нейронных сетей синтезированы три системы прогноза скорости дрейфа судна. Каждая из них характеризуется определённым видом входного сигнала, а также типом её архитектуры. Были рассмотрены динамический и статический варианты нейронных сетей. Свободные параметры сетей зависят от характеристик конкретного судна, а сами сети выполняют функцию идентификации модели его движения. Для судна среднего водоизмещения выполнено моделирование условий проведения натурного эксперимента, в ходе которого формируются образцы для обучения указанных сетей. Методика формирования набора учебных данных основана на рассмотрении модельных ситуаций, каждая из которых соответствует определённой комбинации величин, характеризующих управляющие и возмущающие воздействия. Результаты тестирования в 10000 модельных ситуаций, характеризующихся различными условиями плавания, позволяют говорить о приемлемой средней навигационной точности синтезированных систем. Нейросетевые системы имеют различную точность в отношении как прогноза скорости дрейфа, так и определения траектории движения судна. Лучшую точность определения счислимых координат имеет нейронная сеть, которая реализует «силовой» подход к моделированию динамики судна.

Дальнейшие исследования в области использования нейросетевых технологий для повышения точности счисления пути судна могут вестись в направлении совершенствования методик определения оптимальной структуры нейронных сетей, а также обучения и тестирования синтезированных систем. Технология тестирования должна предусматривать рассмотрение по возможности большего количества разнообразных навигационных ситуаций и, в конечном итоге, быть ориентированной на применение в реальных условиях плавания. В связи с этим возникает проблема исключения из рассмотрения практически эквивалентных модельных ситуаций, которая может быть решена, в частности, на основе классификации вектора входного сигнала. Важное место занимает также разработка методики определения уровня вероятности, с которым синтезированная система прогнозирует счисляемые координаты судна в конкретных условиях плавания. Кроме того, перспективным направлением дальнейших исследований является разработка методики построения универсальных нейросетевых систем счисления, которые могут быть использованы для судов различных типов с различными движительно-рулевыми комплексами.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Каллан Р. Основные концепции нейронных сетей / Р. Каллан; пер. с англ. А. Г. Сивак. — М.: Издат. дом «Вильямс», 2003. — 288 с.
2. Хайкин С. Нейронные сети: полный курс / С. Хайкин; пер. с англ. Н. Н. Куссуль, А. Ю. Шелестова. — М.: Издат. дом «Вильямс», 2006. — 1104 с.
3. Ведякова А. О. Идентификация в условиях внешнего возмущения с использованием нейронных сетей / А. О. Ведякова // International Journal of Open Information Technologies. — 2014. — Т. 2. — № 3. — С. 18–22.
4. Ebada A. Intelligent techniques-based approach for ship maneuvering simulations and analysis (Artificial Neural Networks Application): Doktor-Ing. genehmigte Dissertation; Institute of Ship Technology und Transport Systems / A. Ebada. — Germany. — 2007. — 156 с.
5. Moreira L. Dynamic model of maneuverability using recursive neural networks / L. Moreira, C. G. Soares // Ocean Engineering. — 2003. — № 30. — С. 1669–1697.
6. Сазонов А. Е. Прогнозирование траектории движения судна при помощи нейронной сети / А. Е. Сазонов, В. В. Дерябин // Вестник Государственного университета морского и речного флота имени адмирала С. О. Макарова. — 2013. — № 3 (22). — С. 6–13.
7. Nguyen. H. M. Improving GPS/INS Integration through Neural Networks / H. M. Nguyen, Z. Chi // Journal of Telecommunications. — 2010. — № 2 (2). — С. 1–6.
8. Xu T. A Novel Approach for Ship Trajectory Online Prediction Using BP Neural Network Algorithm / T. Xu, X. Liu, X. Yang // Advances in information Sciences and Service Sciences (AISS). — 2012. — № 4 (11). — С. 271–277.
9. Дерябин В. В. Прогнозирование скорости дрейфа судна на основе нейронной сети / В. В. Дерябин // Транспортное дело России. — 2014. — № 5. — С. 3–7.
10. Дерябин В. В. Модель движения судна в горизонтальной плоскости / В. В. Дерябин // Транспортное дело России. — 2013. — № 6. — С. 60–67.

NEURAL NETWORK BASED VESSEL'S SPEED OF DRIFT PREDICTION SYSTEMS

In the paper the construction of neural network based vessel's speed of drift prediction systems for dead reckoning purpose is considered. Three types of these systems have been constructed. In each case a neural network takes as input signals variables which characterize vessel motion parameters, forces acting the ship from steering-propulsion complex, wind and waves, and resistance forces so on. Speed of drift of vessel is output signal. Forming neural network training sets is performed with computer modeling of natural experiment conditions for a medium tonnage dry cargo vessel. Testing technology supposes consideration of modeling situations with different level and character changing of disturbances and control actions influencing on vessel. Testing of the constructed systems let us to resume that they have mean accuracy sufficient for navigation.

Key words: network, vessel's speed of drift, dead reckoning, computer modeling, testing

REFERENCES

1. Callan, Robert. *Essence of neural networks*. Prentice Hall PTR, 1998.
2. Haykin, Simon. "A comprehensive foundation." *Neural Networks* 2.2004 (2004).
3. Vedyakova, A.O. "Neural network approach for identification under external disturbance." *International Journal of Open Information Technologies* 2.3 (2014): 18-22.
4. Ebada, Adel. Intelligent techniques-based approach for ship maneuvering simulations and analysis (Artificial Neural Networks Application): Doktor-Ing. genehmigte Dissertation. Institute of Ship Technology und Transport Systems. 2007.
5. Moreira, L., and C.G. Soares. "Dynamic model of maneuverability using recursive neural networks." *Ocean Engineering* 30 (2003): 1669-1697.
6. Sazonov, A.E., and Deryabin V.V. "Forecasting to paths of the motion ship with the help of neyronnoy network." *Vestnik gosudarstvennogo universiteta morskogo i rechnogo flota imeni admirala S.O. Makarova* 3(22) (2013): 6-13.
7. Nguyen, H.M., and Z. Chi. "Improving GPS/INS Integration through Neural Networks." *Journal of Telecommunications* 2(2) (2010): 1-6.
8. Xu, T., X. Liu, and X. Yang. "A Novel Approach for Ship Trajectory Online Prediction Using BP Neural Network Algorithm." *Advances in information Sciences and Service Sciences (AISS)* 4(11) (2012): 271-277.
9. Deryabin, V.V. "Vessel's drift speed prediction on basis of neural network." *Transport business of Russia* 5 (2014): 3-7.
10. Deryabin, V.V. "Model ship traffic above the horizontal plane." *Transport business of Russia* 6 (2013): 60-67.

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРЕ

Дерябин Виктор Владимирович –
кандидат технических наук.
Арктический морской институт
имени В.И. Воронина –
филиал ФГБОУ ВО «Государственный
университет морского и речного флота
имени адмирала С.О. Макарова»
gmavitder@mail.ru

INFORMATION ABOUT THE AUTHOR

Deryabin Victor Vladimirovich –
Candidate of Engineering.
Vladimir Voronin Arctic Maritime Institute –
Arkhangelsk brunch
of the Admiral Makarov State University
of Maritime and Inland Shipping
gmavitder@mail.ru

УДК [656.052.55+629.5.035]:629.5.018.71:004.4.942

С. А. Агарков

ВЛИЯНИЕ ВЕТРА ПРИ ДВИЖЕНИИ ЛАГОМ НА УПРАВЛЕНИЕ ПО ОТКЛОНЕНИЯМ

Учеными всего мира разрабатываются инновационные способы управления судном с использованием современных средств судовождения для повышения безопасности судовождения и оптимизации затрат времени на проведение судовых ключевых операций. Один из таких способов использован в настоящей работе — это управление судном по отклонениям от линии, называемой прицельной. В данной работе рассмотрено влияние ветра на управление танкером по отклонениям. При этом танкер выполняет третий этап швартовной операции, т.е. движется лагом под действием системы управления по отклонениям. Рассмотрена оценка возможности выполнения такого маневрирования в случае действия траверсного ветра при управлении танкером с помощью носового и кормового подруливающих устройств. На рисунках представлены траектории танкера при различной скорости ветра и различных импульсах тяги.

Ключевые слова: компьютерное моделирование, моделирование движения судна, влияние ветра, моделирование подруливающего устройства, математическая модель.

ОПИСАННЫЕ в статье [1] испытания проводились в условиях движения лагом и ветрового воздействия, но без управления танкером с помощью изменения тяг подруливающих устройств. В данной статье рассматривается поведение управляемого по отклонениям танкера в условиях действия ветра. Модельные испытания проводились при условии, когда ветер действует с траверсного направления. Это вызвано тем, что мы рассматриваем следование за прицельной линией (ПЛ) [2] — [7], не вводя понятия *прицельной точки на ней*. В данном случае речь идет об управлении с выходом на перекрестье, что не является темой текущих исследований, но является темой исследований коллектива кафедры судовождения Мурманского государственного технического университета [8], [9]. При следовании к перекрестью невозможно обойтись одними подруливающими устройствами, необходима работа главного движителя танкера, обеспечивающего его продольное перемещение. В настоящей статье рассматривается только работа подруливающих устройств.

Представим результаты модельных испытаний маневров танкера, когда на него действует ветер с направления 150° со скоростью $v_a = 10$ м/с. Начальный курс танкера 60° , максимальная тяга ПУ 20 кН, импульс тяги 0,5 кН. В статье [1] была представлена траектория движения танкера при тех же условиях, но в отсутствии ветра (линия 1 на рис. 1). Напомним, что петля траектории связана с достижением ПЛ. В случае действия ветра со скоростью $v_a = 10$ м/с траектория существенно меняется (линия 2 на рис. 1). Управление не справляется с задачей — ветер такой силы относит танкер от ПЛ (прямая 3 на рис. 1). Но в пользу управляющей системы отметим, что танкер не развернулся под действием ветра, а дрейфует лагом к ветру, что удостоверяет положение танкера на правом поле. Следовательно, систему управления по отклонениям можно использовать также при организации дрейфа танкера в определенном положении к ветру. Результат вполне ожидаем, так как общее поперечное усилие (ПУ) составляет 40 кН, поперечное ветровое усилие — 79 кН.

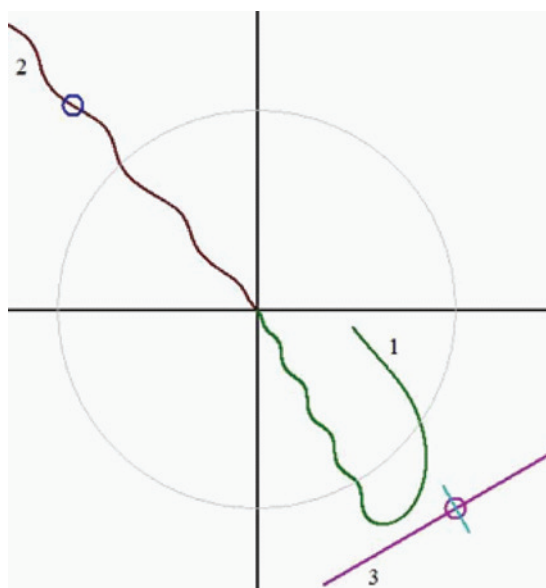


Рис. 1. Две траектории танкера в отсутствии ветра (1) и при действии ветра с направления 150° силой 10 м/с (линии 2 и 3) (радиус масштабной окружности 300 м)

Проведем ряд испытаний, изменив следующие параметры системы управления: предельную тягу подруливающих устройств на 110 кН и импульс изменения тяги. Результаты испытаний приведены на рис. 2. Во всех случаях при такой максимальной тяге система управления выполняет поставленную задачу, подходу к ПЛ. Качество управления при этом зависит от величины импульса изменения тяги, хотя это видно зрительно по рысканию танкера на приведенных траекториях. Зрительное впечатление подтверждается и при подсчете критериев качества Q_1 и Q_2 , значения которых приведены в следующей таблице.

**Критерии качества управления для пяти значений импульсов тяг ПУ
($T = 110$ кН, число точек 1700)**

dT , кН	2	5	10	15	20
Q_1	0,3645	0,2624	0,2267	0,2166	0,2081
Q_2	0,0096	0,0097	0,0095	0,0094	0,0094

Они были введены ранее в целях исследования эффективности управления. Оба критерия уменьшаются с ростом величины импульса, что подтверждает рост качества управления.

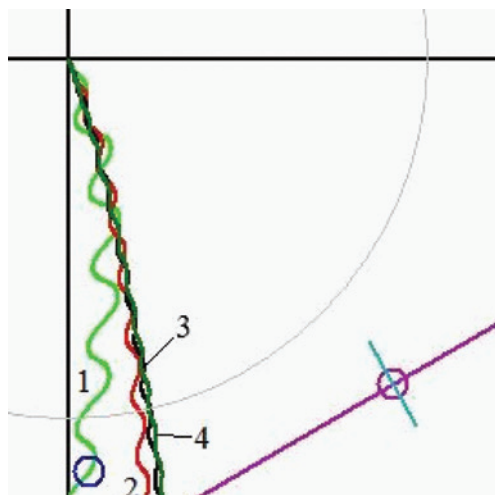


Рис. 2. Четыре траектории танкера при максимальной тяге ПУ 110 кН и различных импульсах управления тягой:
 $dT = 2$ кН (линия 1), $dT = 5$ кН (линия 2), $dT = 10$ кН (линия 3),
 $dT = 15$ кН (линия 4) — радиус масштабной окружности 300 м

Этим доказывается, что для ветра, произвольно действующего с траверзного направления, со стороны прицельной линии можно подобрать максимальную тягу подруливающих устройств танкера и импульс тяги так, чтобы система управления по отклонениям работала эффективно. Подтвердим это не только данными рис. 2, но и результатами испытаний с переменной силой ветра. В этих испытаниях задавался ветер со скоростью $v_a = 7 - 9$ м/с и последовательно находилась величина максимальной тяги, при которой система управления по отклонениям решала задачу выхода на ПЛ. Эти результаты приведены на рис. 3, где обозначены три траектории движения управляемого танкера при различной скорости ветра и максимальной тяге ПУ. Линия 1 траектория при скорости ветра $v_a = 7$ м/с и $T = 50$ кН, линия 2 при скорости ветра $v_a = 8$ м/с и $T = 70$ кН, линия 3 при скорости ветра $v_a = 9$ м/с и $T = 80$ кН. ПЛ — линия 4. Она приведена для третьей траектории на 1533 с движения на рис. 3, а вместе с положением танкера на рис. 3, б. Хорошо видно правильное расположение танкера по отношению к ПЛ при подходе к ней, т.е. задача управления решена.

Таким образом, рассмотрена проблемы управляемости танкера при встречном траверсном ветре. Дело в том, что попутный ветер способствует управлению по отклонениям, уменьшая рыскания танкера и увеличивая качество управления. Так, при ветре со скоростью $v_a = 10$ м/с с направления 330° критерии качества управления $Q_1 = 0,0883$, $Q_2 = 0,0090$, в то время как при встречном ветре с направления 150° эти критерии в лучшем варианте равны $Q_1 = 0,2081$, $Q_2 = 0,0094$ (в таблице правый крайний столбец). Именно поэтому здесь не приводятся подробные результаты подобных экспериментов с попутным ветром, поскольку он не порождает особых проблем в управлении.

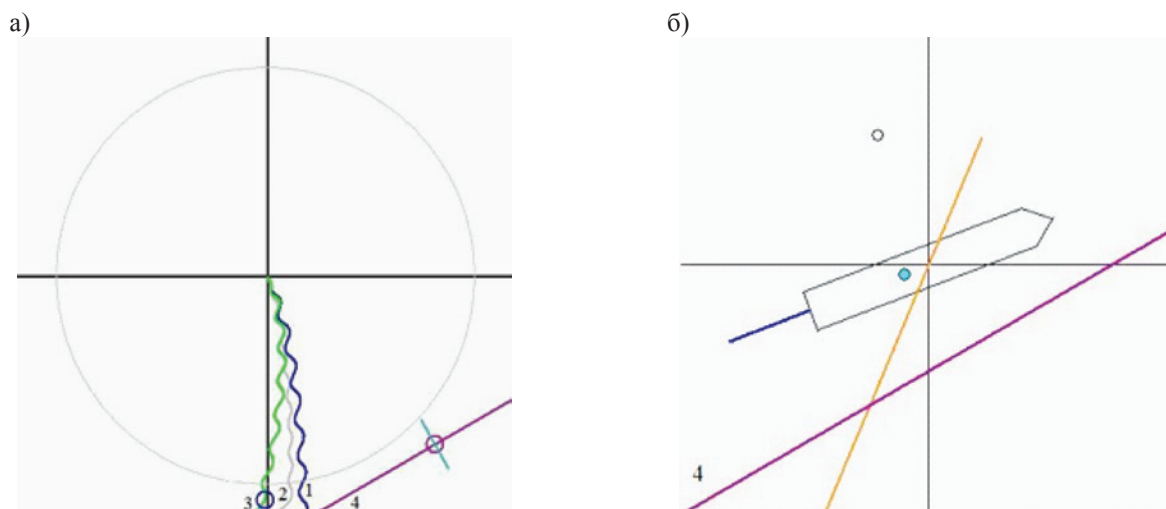


Рис. 3. Траектории управляемого танкера при различной скорости ветра v_a и максимальной тяге ПУ: $v_a = 7$ м/с, $T = 50$ кН (линия 1); $v_a = 8$ м/с, $T = 70$ кН (линия 2); $v_a = 9$ м/с, $T = 80$ кН (линия 3); прицельная линия (линия 4)

Вывод

Показана работоспособность системы управления танкером по отклонениям от ПЛ, при условии, что танкер движется лагом при действии траверсного ветра, а управление по отклонениям реализуется импульсным изменением тяг носового и кормового подруливающих устройств.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Агарков С. А. Анализ результатов моделирования движения танкера в условиях ветровых нагрузок / С. А. Агарков // Вестник Государственного университета морского и речного флота имени адмирала С. О. Макарова. — 2015. — № 4 (32). — С. 16–22.
2. Пат. 2509031 РФ, МПК В 63 Н 25/52. Способ управления судном при выполнении им швартовочной операции к борту судна партнера, стоящего на якорю / Ю. И. Юдин, В. В. Иванов, С. Н. Холичев [и др.]; заявитель и патентообладатель Мурман. госуд. техн. ун-т. № 2012143196/11; Заявлено 09.10.2012; опубл. 10.03.2014. Бюл. № 7. — 9 с.
3. Юдин Ю. И. Способ управления судном при выполнении им швартовочной операции к борту судна, стоящего на якорю. / Ю. И. Юдин, С. Н. Холичев, С. О. Петров // Вестник МГТУ: тр. Мурман. гос. техн. ун-та. — 2013. — Т. 16. — № 1. — С. 187–192.
4. Холичев С. Н. Моделирование процесса швартовки к борту судна-партнера на финальном этапе сближения судов «борт к борту» с использованием инновационного способа управления судном / С. Н. Холичев, С. А. Агарков // Вестник МГТУ: тр. Мурман. гос. техн. ун-та. — 2015. — Т. 18. — № 1. — С. 88–93.
5. Холичев С. Н. Моделирование процесса швартовки к борту судна-партнера с использованием инновационного способа управления судном / С. Н. Холичев, Ю. И. Юдин, С. О. Петров // Вестник МГТУ: тр. Мурман. гос. техн. ун-та. — 2015. — Т. 18. — № 1. — С. 81–87.
6. Юдин Ю. И. Моделирование процесса управляемого движения судна вдоль линии положения. / Ю. И. Юдин, С. В. Пашенцев // Вестник МГТУ: тр. Мурман. гос. техн. ун-та. — 2013. — Т. 16. — № 1. — С. 141–147.
7. Юдин Ю. И. Моделирование управляемого движения судна по произвольной траектории. / Ю. И. Юдин, С. В. Пашенцев // Эксплуатация водного транспорта. — 2012. — № 3 (69). — С. 32–36.
8. Петров С. О. Стратегия управления движением танкера на перекрестии / С. О. Петров, С. А. Агарков // Вестник МГТУ: тр. Мурман. гос. техн. ун-та. — 2015. — Т. 18. — № 1. — С. 55–59.
9. Петров С. О. Моделирование движения танкера на нефтяном терминале в открытом море при управлении на перекрестии / С. О. Петров, Ю. И. Юдин, С. Н. Холичев // Вестник МГТУ: тр. Мурман. гос. техн. ун-та. — 2015. — Т. 18. — № 3. — С. 60–67.

WIND EFFECT ON OPERATION BY DEVIATIONS DURING BROADSIDE MOTION

Scientists all around the world develop innovative ways of vessel operation with the use of modern means of navigation to improve the safety of navigation and optimize the time spent on carrying out the key shipboard operations. One such method the authors used in the present work is the management of the vessel on deviations from the line called the sighting. This article shows the influence of wind on tanker operation by the deviations. The third stage performs tanker mooring operation, i.e. moves broadside under action of operation system by the deviations. Ability to perform such maneuver under the action of wind on the side of the tanker appreciated. The figures show the trajectory of the tanker at different wind speeds and thrust impulse.

Key words: computer modeling, vessel motion modeling, wind effect, thruster modeling, mathematical model.

REFERENCES

1. Agarkov, Sergei Anatolevich. "Tanker motion modeling results analysis under the wind." *Vestnik gosudarstvennogo universiteta morskogo i rechnogo flota imeni admirala S. O. Makarova* 4(32) (2015): 16–22.
2. Yudin, Yurii Ivanovich. Sposob upravleniya sudnom pri vypolnenii im shvartovnoi operacii k bortu sudna partnera, stojashego na jakore. Rossiiskaja Federacija, assignee. Patent 2509031. 9 Oct. 2010. Print. — 9 p.
3. Yudin, Yurii Ivanovich, S. N. Holichev, and S. O. Petrov. "Sposob upravleniya sudnom pri vypolnenii im shvartovnoi operacii k bortu sudna, stojashego na jakore." *Vestnik of MSTU* 16.1 (2013): 187–192.
4. Holichev, Sergei Nikolaevich, and S. A. Agarkov. "Modeling of mooring to the partner vessel at the final stage of "side to side" approach using innovative vessel's steering methods." *Vestnik of MSTU* 18.1 (2015): 88–93.
5. Holichev, Sergei Nikolaevich, Yu. I. Yudin, and S. O. Petrov. "Modeling of the mooring to the partner vessel using innovative vessel's steering methods." *Vestnik of MSTU* 18.1 (2015): 81–87.
6. Yudin, Yurii Ivanovich, and Sergej Vladimirovich Pashencev. "Modelirovanie processa upravljajemogo dvizheniya sudna vdol linii polozheniya." *Vestnik of MSTU* 16.1 (2013): 141–147.
7. Yudin, Yurii Ivanovich, and S. V. Pashentsev. "Modeling of controlled ship moving along wild trajectory." *Yekspluatacija morskogo transporta* 3 (2012): 32–36.
8. Petrov, Sergei Olegovich et al. "Strategy of management of tanker movement in the crosshair." *Vestnik of MSTU* 18.1 (2015): 55–59.
9. Petrov, Sergei Olegovich, Ju. I. Yudin, and S. N. Holichev. "Modelirovanie upravljajemogo dvizheniya sudna po proizvolnoi traektorii." *Vestnik of MSTU* 18.3 (2015): 60–67.

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРЕ

Агарков Сергей Анатольевич —
доктор экономических наук, профессор, ректор.
ФГБОУ ВПО «Мурманский государственный
технический университет»
AgarkovSA@mstu.edu.ru

INFORMATION ABOUT THE AUTHOR

Agarkov Sergey Anatolievich —
Doctor of Economy, professor, Rector.
MSTU Murmansk State Technical University
AgarkovSA@mstu.edu.ru

УДК 655.62.052.4

А. А. Ершов,
А. В. Теренчук

ПРАКТИЧЕСКИЙ СПОСОБ ОПРЕДЕЛЕНИЯ ПАРАМЕТРИЧЕСКОГО РЕЗОНАНСА ПО БОРТОВОЙ КАЧКЕ СУДНА

Параметрический резонанс — одно из наиболее опасных явлений, возникающих при качке судна в условиях шторма. При определенных условиях параметрического резонанса неповрежденное и правильно загруженное судно может опрокинуться в течение нескольких секунд. В современных условиях прогнозирование параметрического резонанса представляет собой достаточно сложную задачу. Судоводителю

необходимо знать, при каких условиях для его судна возникает возможность появления параметрического резонанса в условиях шторма с целью более тщательного контроля поведения судна и своевременного изменения курса и скорости во избежание опасности опрокидывания. Для эффективного решения данной задачи судоводителю необходимо использовать привычные для него навигационные приборы, графики и номограммы, применяемые для решения других задач обеспечения безопасности судна. Одним из наиболее часто используемых российскими судоводителями инструментов является диаграмма штормового плавания, предложенная Ю. В. Ремезом. В данной статье предлагается способ отображения на диаграмме Ю. В. Ремеза возможности возникновения параметрического резонанса судна при определенных курсовых углах волны и заданной скорости движения судна. Подтверждена целесообразность использования для определения опасных зон параметрического резонанса по бортовой качке диаграммы Ю. В. Ремеза, применение которой может повысить безопасность при плавании судна в шторм.

Ключевые слова: штормовое плавание, параметрический резонанс, практический способ определения, повышение безопасности штормового плавания.



АНАЛИЗ мировой и отечественной статистики аварийности показывает, что первое место среди основных причин гибели судов занимает потеря мореходных качеств судна в условиях шторма [1], [2]. Одной из возможных причин гибели судна в этих условиях может быть попадание его в зону параметрического резонанса по бортовой качке. Данное обстоятельство приводит к возникновению усиленных бортовых колебаний, зачерпыванию воды на верхнюю палубу при значительных углах крена на бортовой качке, к потере остойчивости и, как следствие, к возможному опрокидыванию судна. В связи с этим судоводителю необходимо уметь выбирать курс и скорость движения судна во избежание потери его остойчивости и опрокидывания в условиях штормовой погоды. Дополнительные факторы, которые необходимо учитывать при плавании судна в узкостях, связаны с необходимостью удерживать судно в условиях ограниченной акватории и тем самым предотвращать столкновения с другими судами, а также предупреждать навалы на другие объекты (эти вопросы рассмотрены в работах [3] — [11]). Все это обуславливает дополнительные требования к повышенной точности решения задач, связанных с обеспечением безопасности судна, во избежание попадания в параметрический резонанс в штормовых условиях.

Суть параметрического резонанса может быть сведена к следующему: при исследовании основных видов качки на тихой воде рассматриваются собственные колебания судна. Анализ качки на регулярном и нерегулярном волнении предполагает рассмотрение вынужденных колебаний. При рассмотрении собственных колебаний судно выводится из положения равновесия внешним возмущением, а затем как бы «изолируется» от внешних воздействий и далее анализируется его колебательный процесс. Вынужденные колебания судна происходят под непрерывным воздействием внешних сил и моментов, изменяющихся по величине и направлению.

Однако возможен и еще один вид колебаний судна, возникающий вследствие того, что под воздействием внешних сил в процессе движения изменяются параметры судна как колебательной системы. В этом случае коэффициенты дифференциальных уравнений, зависящие от параметров системы, становятся функциями от времени. Такие колебания называют *параметрическими*. Они могут быть затухающими или возрастающими во времени. Первые соответствуют устойчивой системе, вторые свидетельствуют о том, что система неустойчива. Параметрические колебания наблюдаются при определенном соотношении между частотой внешнего воздействия и частотой собственных колебаний системы и в данном случае, по своей теории и последствиям для качки судна оно сходно с резонансом. По этой причине возникающие опасные соотношения между частотой вынужденных и собственных колебаний судна называют *параметрическим резонансом*. Параметрический резонанс по бортовой качке может приводить к резкому увеличению амплитуды бортовых колебаний судна, к попаданию забортной воды на палубу при увеличении углов крена на качке, к попаданию воды внутрь корпуса судна, а также к возможному опрокидыванию судна.

Ю. В. Ремезом был рассмотрен параметрический резонанс по бортовой качке судна, расположенного лагом к волне. Задача сводилась к рассмотрению двух видов качки: *вертикальной* и *бортовой*. При этом за счет вертикальной качки восстанавливающий момент при бортовых колебаниях становится периодической функцией времени, что может явиться причиной возникновения параметрического резонанса по бортовой качке. В результате было установлено, что опасность возникновения параметрического резонанса является наибольшей при следующем соотношении:

$$\sigma_k = 2\omega, \omega, \frac{2}{3}\omega, \quad (1)$$

где σ — частота волны или равная ей частота вынужденной вертикальной качки, с^{-1} ; ω — собственная частота бортовой качки судна, с^{-1} .

Опыт показывает, что для возникновения параметрического резонанса какого-либо вида качки не требуется для того, чтобы был сильный шторм. Например, если на тихой воде модель судна будет совершать гармоническую вертикальную качку, частота которой связана с собственной частотой бортовой качки соотношениями (1), то при сколь угодно малом отклонении модели судна вокруг продольной оси возникнут бортовые колебания с нарастающей амплитудой, что впоследствии повлечет за собой возможное опрокидывание модели судна. Это положение нашло подтверждение в результате проведения многочисленных модельных экспериментов (рис. 1).

а)



б)



в)



г)

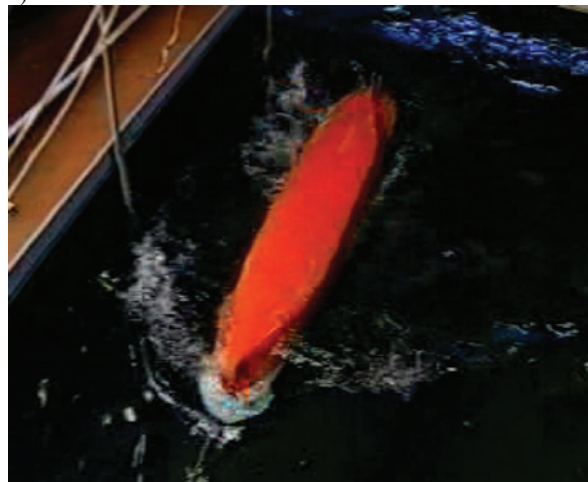


Рис. 1. Модельный эксперимент по определению влияния параметрического резонанса на остойчивость судна: а — судно сохраняет остойчивость; б — крен судна в условиях параметрического резонанса; в — потеря остойчивости судна в условиях параметрического резонанса; г — опрокидывание судна в условиях параметрического резонанса

С учетом ранее изложенного можно предположить, что соотношение (1) для возникновения параметрического резонанса справедливы также для судна, движущегося с постоянной скоростью v и курсовым углом q по отношению к регулярному волнению (кажущейся) частоте волнения σ_k . В этом случае относительная (кажущаяся) скорость распространения волн, т. е. их скорость по отношению к движущемуся судну, определится следующим образом:

$$C_k = C - v \cos q, \quad (2)$$

где C_k — относительная (кажущаяся) скорость распространения волн, м/с; C — скорость распространения волн, м/с; v — скорость движения судна, м/с; q — курсовой угол волнения, град.

Период собственной бортовой качки судна следует определять при помощи так называемой капитанской формулы:

$$\tau = \frac{cB}{\sqrt{h}}, \quad (3)$$

где τ — период собственной бортовой качки судна, с; B — ширина судна, м; h — начальная поперечная метацентрическая высота судна, м; c — постоянная, которая для большинства транспортных судов находится в диапазоне 0,78 — 0,82.

С учетом связи между частотой колебаний и их периодом запишем выражение для частоты собственных колебаний по бортовой качке в следующем виде:

$$\omega = \frac{2\pi}{\tau} = \frac{2\pi\sqrt{h}}{cB}. \quad (4)$$

На основании формулы (2) определим кажущуюся частоту волнения:

$$\tau_k = \frac{\tau_2}{1 - \frac{v}{C} \cos q};$$

$$\sigma_k = \frac{2\pi}{\tau_k} = \frac{2\pi}{\tau_b} \left(1 - \frac{v}{C} \cos q\right), \quad (5)$$

где τ_b — период волнения, с; τ_k — кажущийся период волнения, с; σ_k — кажущаяся частота волнения, с⁻¹.

Перепишем соотношение (1) в следующем виде:

$$\sigma_k = 2\omega, \quad \omega, \quad \frac{2}{3}\omega \quad (6)$$

или, с учетом формул (3) и (5), — в виде

$$\frac{\sigma_k}{\omega} = \frac{\sigma_k cB}{2\pi\sqrt{h}}. \quad (7)$$

Примем постоянное значение $c = 0,8$ в формуле (7), а соотношение $\sigma_k/\omega = 2$ (наиболее вероятное условие возникновения параметрического резонанса). Тогда на основании выражений (4) — (7) получим

$$\frac{0,8B - 0,8B \frac{v}{C} \cos q}{\tau_b \sqrt{h}} = 2, \quad (8)$$

откуда

$$\cos q = \frac{0,8B - 2\tau_b \sqrt{h}}{0,8B \frac{v}{C}}. \quad (9)$$

Если принять приближенные выражения:

$$C = 1,25\sqrt{\lambda}; \quad (10)$$

$$\tau_B = 0,8\sqrt{\lambda}, \quad (11)$$

то

$$\cos q = \frac{B\sqrt{\lambda} - 2\lambda\sqrt{h}}{0,8Bv}, \quad (12)$$

где λ — длина волны, м.

Выражения (8) – (12) могут служить для определения наиболее опасного с точки зрения возникновения параметрического резонанса по бортовой качке курсового угла волнения q (соотношение $\sigma_k/\omega = 2$).

Для возникновения дополнительного параметрического резонанса $\sigma_k/\omega = 1$ выражение (9) примет вид

$$\cos q = \frac{0,8B - \tau_B \sqrt{h}}{0,8B \frac{v}{C}}, \quad (13)$$

или, с учетом выражений (10) и (11),

$$\cos q = \frac{B\sqrt{\lambda} - \lambda\sqrt{h}}{0,8Bv}, \quad (14)$$

Для соотношения $\sigma_k/\omega = 2/3$ выражение (9) примет вид

$$\cos q = \frac{0,8B - \frac{2}{3}\tau_B \sqrt{h}}{0,8B \frac{v}{C}}, \quad (15)$$

или, с учетом выражений (10) и (11),

$$\cos q = \frac{B\sqrt{\lambda} - \frac{2}{3}\lambda\sqrt{h}}{0,8Bv}. \quad (16)$$

Расчет по выражениям (9) — (16) позволяет сделать следующие выводы.

1. Использование формул (9) — (16) для расчетного судна подтверждает возможность основного параметрического резонанса ($\sigma_k/\omega = 2$), в том числе параметрического резонанса на попутном волнении (курсовой угол волнения $q = 165^\circ$).

2. Представление результатов расчета по формулам (9) — (16) на диаграмме Ю. В. Ремеза доказывает возможность совпадения зон резонансной качки, включая резонанс на попутном волнении с зоной параметрического резонанса для расчетного судна (рис. 2).

3. Для малых судов шириной до 20 м возможность появления дополнительного (отношение частот $\sigma_k/\omega = 2/3$) параметрического резонанса наблюдается для средних значений метацентрической высоты (до $h = 3,00$ м) и на курсовых углах, больших 10° , т. е. близких к встречному волнению. Увеличение скорости движения судов смещает возможность появления параметрического резонанса в сторону увеличения курсовых углов волнения.

4. Для малых судов шириной до 20 м возможность появления основного параметрического резонанса (отношение частот $\sigma_k/\omega = 2$) для малых значений метацентрической высоты ($h = 0,15$ м) на курсовых углах 16° , т. е. близких к встречному волнению. Увеличение скорости движения судов смещает возможность появления параметрического резонанса в сторону увеличения курсовых углов волнения (в зону бортовой качки).

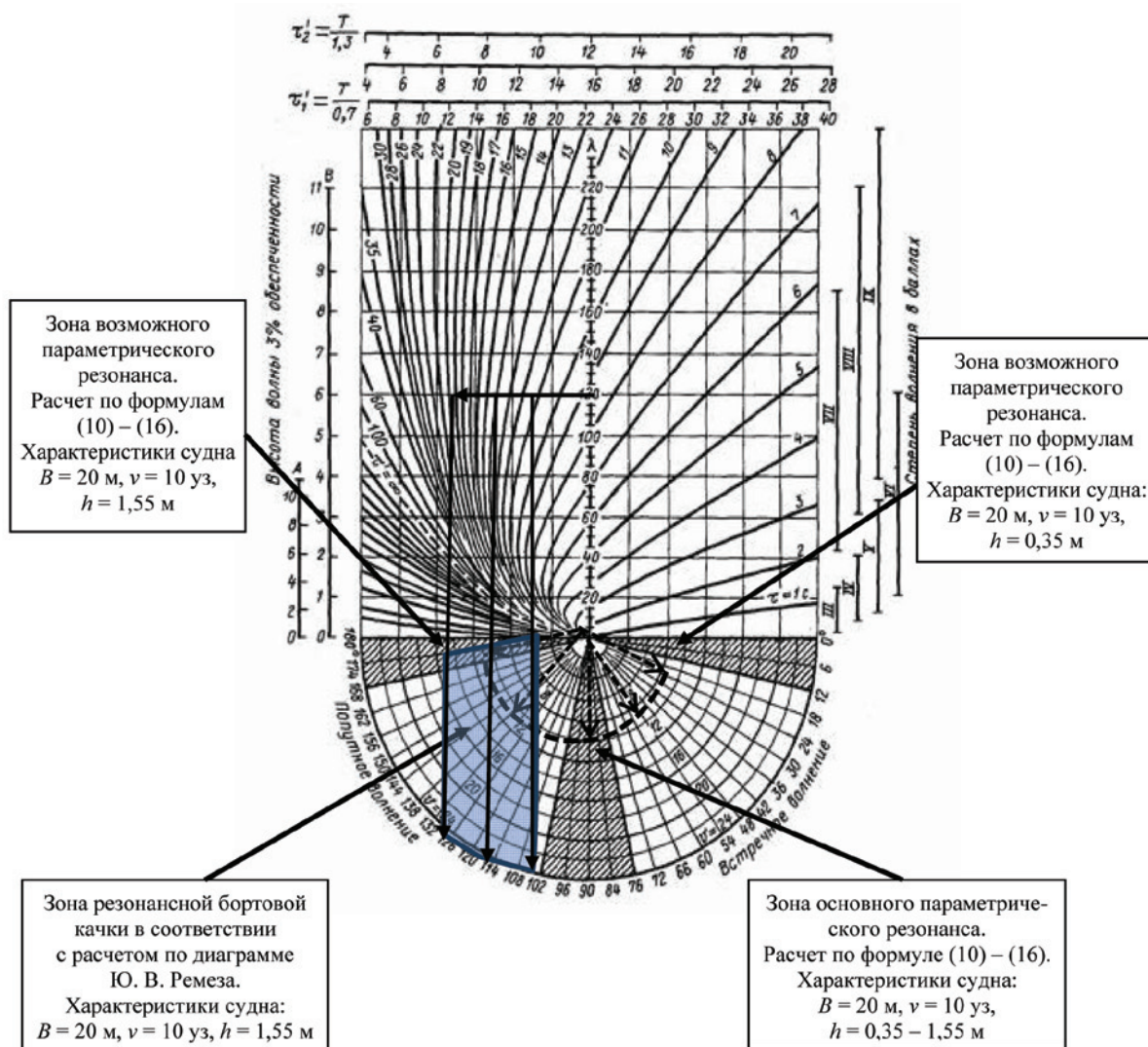


Рис. 2. Результаты расчета по формулам (9) – (16) на диаграмме Ю. В. Ремеза

5. Для малых судов шириной до 20 м при постоянной скорости 10 уз возможность появления дополнительного ($\sigma_k/\omega = 1$) параметрического резонанса наблюдается для больших значений метацентрической высоты ($h > 1,35$ м) и на курсовых углах, больших 15° , т. е. близких к встречному волнению. Увеличение скорости движения судов смещает возможность появления параметрического резонанса в сторону увеличения курсовых углов волнения.

Выводы

1. Возможность возникновения параметрического резонанса по бортовой качке является дополнительной опасностью для судна при плавании в условиях волнения наряду с обычным резонансом и возможностью потери остойчивости на попутном волнении. Для определения курсовых углов волнения, при которых возможен параметрический резонанс по бортовой качке, могут быть использованы формулы (9) — (16).
2. Наибольшую опасность для судна могут представлять сочетания зон резонансной качки, получаемых с использованием диаграммы Ю. В. Ремеза и зон параметрического резонанса, получаемых по выражениям (9) — (16).
3. На практике следует отмечать зоны параметрического резонанса, рассчитываемые по формулам (9) — (16) на диаграмме Ю. В. Ремеза, для установки дополнительных опасных сочетаний скорости движения судна и курсового угла волнения. Это позволит судоводителю определять без-

опасные курсовые углы волнения для всех возможных опасностей, включая возможность возникновения параметрического резонанса.

4. На основании ранее изложенного можно утверждать, что использование диаграммы Ю. В. Ремеза для определения дополнительных опасных зон параметрического резонанса по бортовой качке может повысить безопасность судоходства при плавании судна в шторм.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Ершов А. А. От «Титаника» до «Costa Concordia» неиспользованные возможности для спасения: монография / А. А. Ершов. — Германия: LAP LAMBERT Academic Publishing, 2013. — 146 с.
2. Ершов А. А. Некоторые аварии и катастрофы отечественных и иностранных судов: монография / А. А. Ершов, В. И. Никольский. — СПб.: Изд-во ГУМРФ им. адм. С. О. Макарова, 2013. — 196 с.
3. Логиновский В. А. Моделирование оценки вероятности посадки судна на грунт с помощью нечетких чисел / В. А. Логиновский, А. А. Струков // Вестник Государственного университета морского и речного флота имени адмирала С. О. Макарова. — 2013. — № 1 (20). — С. 89–96.
4. Астерин В. В. Принципы координации подсистем судна для предупреждения столкновений / В. В. Астерин, Е. В. Хекерт // Вестник Государственного университета морского и речного флота имени адмирала С. О. Макарова. — 2013. — № 2 (21). — С. 13–22.
5. Сазонов А. Е. Прогнозирование траектории движения судна при помощи нейронной сети / А. Е. Сазонов, В. В. Дерябин // Вестник Государственного университета морского и речного флота имени адмирала С. О. Макарова. — 2013. — № 3 (22). — С. 6–13.
6. Бурмака А. И. Стратегия расхождения судов в ситуации чрезмерного сближения / А. И. Бурмака // Вестник Государственного университета морского и речного флота имени адмирала С. О. Макарова. — 2014. — № 1 (23). — С. 20–22.
7. Некрасов С. Н. Навигационные риски буксировки судна в стесненных навигационных условиях / С. Н. Некрасов, К. И. Ефимов, Д. В. Трененков // Вестник Государственного университета морского и речного флота имени адмирала С. О. Макарова. — 2014. — № 6 (28). — С. 13–19.
8. Ершов А. А. Использование зон безопасного расхождения для движения судов на подходах к портам и внутренних водных путях // Сб. науч. тр. проф.-преп. сост. ГУМРФ им. адм. С. О. Макарова. — СПб.: Изд-во ГУМРФ им. адм. С. О. Макарова, 2014. — С. 6–13.
9. Паринов П. П. Новые способы обеспечения безопасного движения судов в Большом порту Санкт-Петербург и на подходах к порту: дис. ... канд. техн. наук: 05.22.19: защищена 21.12.2010; утв. 12.06.2011 / П. П. Паринов. — СПб., 2010. — 120 с.
10. Ершов А. А. Разработка системы интеллектуальной поддержки судоводителя для снижения опасности столкновений судов: дис. ... д-ра техн. наук: 05.22.19; защищена 19.11.2012; утв. 20.05.2013 / А. А. Ершов. — СПб., 2012. — 366 с.
11. Ершов А. А. Определение условий безопасного захода судна в порт / А. А. Ершов, Д. А. Хухарев // Вестник Государственного университета морского и речного флота имени адмирала С. О. Макарова. — 2015. — № 4 (32). — С. 38 — 42.

PRACTICAL METHOD FOR DETERMINING THE PARAMETRIC RESONANCE OF ROLLING OF THE VESSEL

Parametric resonance is one of the most dangerous phenomena, which occur for the ship in storm weather. Under certain conditions of parametric resonance absolutely intact and properly loaded ships can capsize in a few seconds. In modern conditions prediction of parametric resonance is the fairly complex task.

For the ship's navigators often need to know under what conditions for its vessel arises the possibility of parametric resonance in a storm. Thus they can more closely monitor the conduct of the vessel and in a timely manner to change course and speed to avoid the danger of tipping. To effectively solve this problem they must use his usual navigational instruments, charts and nomograms, which he uses for other tasks to ensure safety of the ship. One of the most commonly used tools for the Russian navigators is the diagram which was proposed by Yu. V. Remez.

This article provides a method of displaying on that diagram possibility of parametric resonance for a particular vessel on specific coursework corners of the wave and speeds of the ship.

Using the Remez diagrams to determine dangerous zones of parametric resonance can improve the safety of navigation in a storm.

Keywords: storm navigation, parametric resonance, a practical way to determine, improving the safety of storm navigation.

REFERENCES

1. Ershov, A. A. *Ot «Titanika» do «Costa Concordia» neispolzovannye vozmozhnosti dlja spasenija: monografija*. Germany: LAP LAMBERT Academic Publishing, 2013: 146.
2. Ershov, A. A., and V. I. Nikolskij. *Nekotorye avarii i katastrofy otechestvennyh i inostrannyh sudov: monografija*. SPb.: Izd-vo GUMRF imeni admirala S. O. Makarova, 2013: 196.
3. Loginovskij, V. A., and A. A. Strukov. "Modelirovanie ocenki verojatnosti posadki sudna na grunt s pomoshhju nechetkih chisel." *Vestnik Gosudarstvennogo universiteta morskogo i rechnogo flota imeni admirala S. O. Makarova* 1(20) (2013): 89–96.
4. Asterin, V. V., and E. V. Hekert. "Vessel subsystems coordination principles for collision avoidance." *Vestnik Gosudarstvennogo universiteta morskogo i rechnogo flota imeni admirala S. O. Makarova* 2(21) (2013): 13–22.
5. Sazonov, A. E., and V. V. Derjabin. "Forecasting to paths of the motion ship with the help of neyronnoy network." *Vestnik Gosudarstvennogo universiteta morskogo i rechnogo flota imeni admirala S. O. Makarova* 3(22) (2013): 6–13.
6. Burmaka, A. I. "The strategy of maneuvering of ships in a situation of excessive proximity." *Vestnik Gosudarstvennogo universiteta morskogo i rechnogo flota imeni admirala S. O. Makarova* 1(23) (2014): 20–22.
7. Nekrasov, S. N., Efimov K. I., and D. V. Trenenkov. "Navigation risks towing in cramped navigational conditions." *Vestnik Gosudarstvennogo universiteta morskogo i rechnogo flota imeni admirala S. O. Makarova* 6(28) (2014): 13–19.
8. Ershov, A. A. "Ispolzovanie zon bezopasnogo rashozhdenija dlja dvizhenija sudov na podhodah k portam i vnutrennih vodnyh putjah." *Sb. nauch. tr. prof.-prep. sost. GUMRF im. adm. S. O. Makarova*. SPb.: Izd-vo GUMRF imeni admirala S. O. Makarova, 2014: 6–13.
9. Parinov, P. P. *Novye sposoby obespechenija bezopasnogo dvizhenija sudov v Bolshom portu Sankt-Peterburg i na podhodah k portu: dis. ... kand. tehn. nauk: (05.22.19) : zashhishhena (21.12.2010); utv. (12.06.2011) / Petr Petrovich Parinov.* — SPb., 2010: 120 p.
10. Ershov, A. A. *Razrabotka sistemy intellektualnoj podderzhki sudovoditelja dlja snizhenija opasnosti stolknovenij sudov: dis. ... d-ra tehn. nauk: (05.22.19); zashhishhena (19.11.2012) ; utv. (20.05.2013) / Andrej Aleksandrovich Ershov.* — SPb., 2012: 366 p.
11. Ershov, A. A., and D. A. Huharev. "Conditions for safe entry of ships in port." *Vestnik Gosudarstvennogo universiteta morskogo i rechnogo flota imeni admirala S. O. Makarova* 4(32) (2015): 38 – 42.

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

Ершов Андрей Александрович – доктор технических наук, доцент. ФГБОУ ВО «Государственный университет морского и речного флота имени адмирала С. О. Макарова». *ershov_63@mail.ru*
Теренчук Александр Владимирович – аспирант. ФГБОУ ВО «Государственный университет морского и речного флота имени адмирала С. О. Макарова». *ershov_63@mail.ru*

INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Ershov Andrey Alexandrovich – Doctor of Engineering, associate professor. Admiral Makarov State University of Maritime and Inland Shipping *ershov_63@mail.ru*
Terenchuk Alexander Vladimirovich – Postgraduate. Admiral Makarov State University of Maritime and Inland Shipping *ershov_63@mail.ru*

МОДЕЛИРОВАНИЕ КОНТЕЙНЕРООБОРОТА МОРСКОЙ ТРАНСПОРТНОЙ СИСТЕМЫ НА ОСНОВЕ МАТЕМАТИЧЕСКОГО АППАРАТА ГРАВИТАЦИОННОЙ МОДЕЛИ

Морские транспортные системы являются основной и лидирующей формой в системе транспортировки товаров. При решении прогнозных задач в работе морской транспортной системы необходимо использовать моделирование, в частности — имитационное. Существуют различные методы моделирования грузопотоков, среди которых в данной статье предлагается применение гравитационной модели с расчетом матриц корреспонденций применительно для перевозки контейнеров. Правильность выбора данной методики обуславливается большим количеством исходных данных, которые детально описывают морскую транспортную систему, и возможностью расширения данной методики. Под расширением понимается возможность размещения схем «сухих портов» грузовых и контейнерных терминалов и включения других контейнерных линий, которые работают на данном участке. Методика позволяет определять наиболее загруженные элементы транспортной системы. Несмотря на это предлагаемая методика подразумевает расчет большого числа матриц корреспонденций контейнеров между портами, что выполнить вручную достаточно сложно, поэтому дополнительно приводится разработанный программный инструментарий. Рассматривается пример моделирования и реализации морской транспортной системы на примере работы контейнерной линии компании APL с включением терминалов, которые вовлечены в процесс доставки контейнеров по суше.

Ключевые слова: морская контейнерная линия, морская транспортная система, моделирование, гравитационная модель, модель расчета матриц корреспонденции, расписание движения судов.

Введение

Морской транспорт на сегодня остается главной артерией международного товарооборота, обеспечивая перевозки более 90 % физического объема мировой товарной торговли. Это делает его важным инструментом товарообмена (контейнерооборота) между отдельными регионами, создания и организации единого экономического пространства. Наблюдается постоянный рост количества контейнерных судов, используемых для перевозки грузов. Это приводит к тому, что на достаточно длинных маршрутах контейнерных перевозок оправданным оказывается использование только крупных судов.

На сегодняшний момент созданы информационные системы, которые предоставляют большое количество логистической статистической информации (числовые характеристики контейнерооборота) как по работе отдельных портов, так и по конкретному судну или контейнерной линии [1], [2]. Несмотря на это при работе морских контейнерных линий возникает определенное количество задач, которые можно решить только с помощью моделирования. Особенно это актуально при решении задач прогнозирования. Работа морской контейнерной линии представляет собой сложную систему, жизнедеятельность которой, определяется как достаточно четким расписанием, так и случайными факторами (нарушение расписания прибытия судов — опоздание в рамках временного окна, ухудшение погодных условий, поломка судна). Объемы перевозимых контейнеров на судах образуют грузовой контейнерооборот. Задача создания имитационной модели [3] — [6], позволяющей спрогнозировать контейнерооборот при включении, к примеру, новых портов, принимая во внимание весь набор специфических условий, необходимых для выполнения отдельных операций с морской линией, является актуальной.

Задачами исследования является обоснование правильности выбранной математической модели, описывающей инфраструктуру морской транспортной сети, разработка алгоритма построения и представление разработанного программного инструментария, позволяющего пользователю прогнозировать контейнерооборот в транспортной сети.

Морская транспортная сеть

Морская транспортная сеть [6] сама по себе является физическим набором связей между серией узлов, по которым происходит движение грузов в контейнерах. Морская транспортная сеть характеризуется определенным набором инструментов управления движением потоков в сети, которая состоит из набора портов, связанных маршрутами морских транспортных судов. Рассмотрим схему морской транспортной системы в виде сетевой структуры системы, отражающей отношение от многих ко многим (рис. 1).

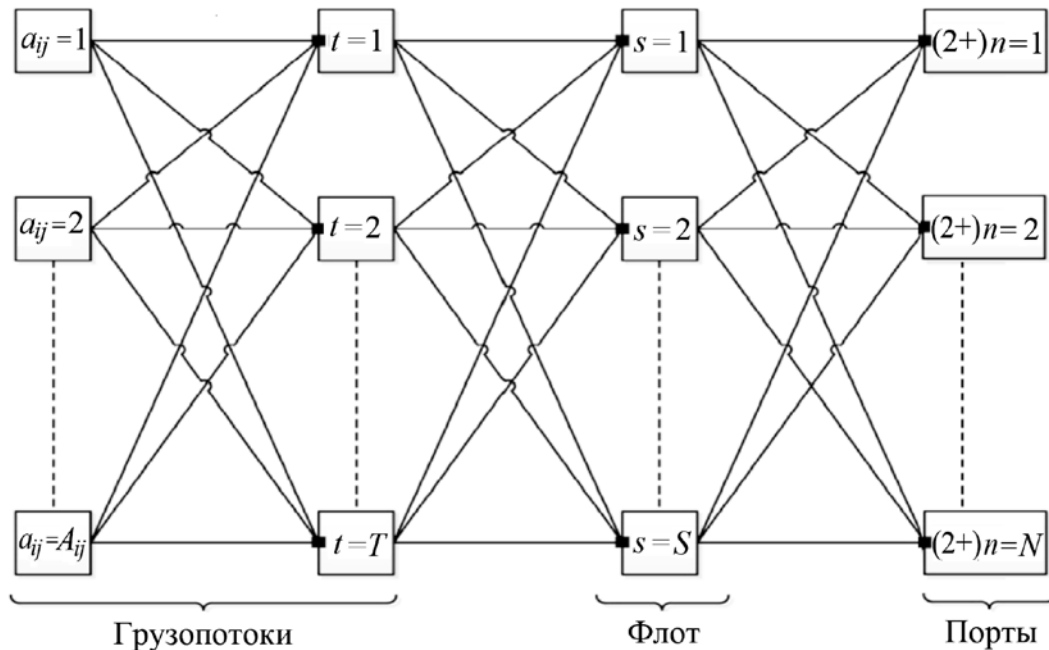


Рис. 1. Схема морской транспортной системы:

t — род груза для отправки; $t = 1, 2, \dots, T$; s — тип судна для перевозки; $s = 1, 2, \dots, S$;
 n — порт определенных технологических, географических и др. характеристик, используемый в процессе перевозки; $n = 1, 2, \dots, N$;
 a_{ij} — необходимый маршрут движения грузопотока a из порта отправки i в порт назначения j , $a_{ij} = 1, 2, \dots, A_{ij}$; $A_{ij} = (N - Nh)/2$, где Nh — совокупное количество портов, используемых исключительно для перевалки

Данная схема построена исходя из предположения о том, что выделяются три главных звена процесса перевозки грузов морем:

- 1) предоставление груза к перевозке;
- 2) погрузка грузов на судно, разгрузка грузов с судна в порту;
- 3) перевозка грузов морем на судне.

Целевая функция транспортной сети, или обобщенный план работы транспортно-логистической системы может быть получен из решения задачи

$$\sum_{a_{ij}=1}^{A_{ij}} \sum_{t=1}^T \sum_{s=1}^S \sum_{n=1}^N CQ \rightarrow \min, \quad (1)$$

где C — стоимость перевозки единицы груза t из пункта i в пункт j , перевозимого на судне s с использованием нескольких портов n ; Q — объем перевозок груза t из пункта i в пункт j на судне s с использованием нескольких портов n .

Грузопотоки, флот, порты выделены как главные направляющие процесса перевозки груза морем [7] — [9]. Оптимальное соотношение всевозможных качественных характеристик этих трех элементов дает нам оптимальность всей системы. Пример морской транспортной сети компании APL [10] приведен на рис. 2.



Рис. 2. Пример работы контейнерной линии компании APL [10]

Грузооборот в контейнерах в морской транспортной сети может быть описан с помощью следующих методов:

- аналитическим методом;
- аппаратом теории ориентированных графов [5], [6];
- аппаратом матриц корреспонденции;
- имитационным моделированием с использованием методики «следования за лидером».

Применение данного метода детально приведено в [2], [12].

Главным недостатком применяемых аналитических методов является то, что они позволяют в качестве исходных параметров учитывать лишь основные вероятностные распределения, а результирующими данными являются только средние величины показателей. Однако морская контейнерная линия является сложной системой, характеристики которой адекватно не могут быть описаны только вероятностными распределениями. Например, прибытие судов не является случайной величиной в широких временных рамках порядка недели, а определяется достаточно четким расписанием. Кроме того, случайные факторы, такие как отказ оборудования, локальное нарушение расписания прибытия судов (опоздание в рамках временного окна), ухудшение погодных условий и др., не могут быть учтены при аналитическом расчете. Но их можно учитывать при использовании имитационного моделирования.

Описание математической модели

Исходными данными для моделирования являются данные о перемещении контейнеров по транспортной сети, т. е. количестве передвижений судов между портами, а также данные на основе географического расположения о размещении портов, порождающих передвижения контейнеров по сети (портов доставки грузов). Для прогноза структуры перевозки контейнеров производится расчет матриц корреспонденций между расчетными портами, соответствующих передвижениям разного типа судов с целью доставки груза в соответствии с расписанием движения судов. Если матрица корреспонденции построена, то на ее основе можно:

- составить скорректированное расписание движения судов;
- определить главные контейнерообразующие пункты;
- оценить интенсивность перевозок контейнеров между различными портами;
- оценить количество перевозимых контейнеров.

При данном подходе принимается, что любой контейнер, требующий перевозки, имеет точку доставки, т. е. некоторую целевую функцию. Множество таких контейнеров образует множество целевых функций, которые можно описать с помощью матриц корреспонденции.

Процесс образования потоков контейнеров обусловлен потребностями по перевозке грузов, поэтому исходными данными для задачи прогноза потоков являются распределение портов на основе географического расположения, а также движение судов, т. е. их работа на маршруте за определенное время. Цели передвижений объединены в несколько групп (доставка контейнера в порт A , доставка контейнера в порт A_i , порожний пробег). Подвижность морской транспортной системы можно представить матрицей межцелевых передвижений контейнеров между портами (рис. 3).

	Порт	Порт 1	Порт 2	Порт N
Порт	0	g_{01}	g_{02}	g_{0k}
Порт 1	g_{10}	g_{11}	g_{12}	g_{1k}
Порт 2	g_{20}	g_{21}	g_{22}	g_{2k}
Порт N	g_{n0}	g_{n1}	g_{n2}	g_{nk}

Рис. 3. Матрица межцелевых перемещений контейнеров между портами

В данной матрице принимается, что передвижение в «порт 1 ... порт N » — это передвижение к месту доставки контейнера. Элементы матрицы должны удовлетворять условию

$$\forall k \sum_i g_{ki} = \sum_l g_{lk}. \quad (2)$$

Расчет матрицы корреспонденций проводится по гравитационной модели [2], [11]. В настоящее время для расчета корреспонденций вместо гравитационных моделей используются энтропийные, а гравитационная модель может быть использована только для задач, в которых имеет место дискретная структура. Гравитационная модель разработана по аналогии с ньютоновским законом, который описывает силу притяжения F_{ij} между двумя массами m_i и m_j , расположенными друг от друга на расстоянии d_{ij} ,

$$F_{ij} = c \frac{m_i m_j}{d_{ij}^2}, \quad (3)$$

где c — некоторая константа.

Аналогично закону Ньютона, транспортная гравитационная модель описывает интенсивность потока контейнеров T_{ij} между полным количеством отправок из i -й зоны (порта) Q_i (отправляющихся из зоны i) и прибытий в j зону D_j (прибывающих в порт j) и затраты на передвижение между зонами i и j в форме c_{ij} .

$$T_{ij} = k \frac{Q_i D_j}{c_{ij}^2}, \quad (4)$$

$$\text{где } \sum_i T_{ij} = D_j; \sum_j T_{ij} = Q_i; T_{ij} \geq 0. \quad (5)$$

Уравнение (4) означает, что суммарный поток судов из порта i в порт j должен быть равен потоку, который прибыл в порт j . Условия (5) означают, что суммарный поток, который вышел обратно из всех зон j в зону i , должен совпадать с числом прибывших в зону i . Суммарное количество покинувших порт судов должно быть равно суммарному количеству прибывших, т. е. должно обязательно выполняться условие

$$\sum_i T_i = \sum_j D_j. \quad (6)$$

При моделировании грузооборот T_{ij} между известными векторами отправок из портов Q_i и прибытия в порты D_j можно рассчитать по формуле

$$T_{ij} = A_i B_j Q_i D_j f(c_{ij}), \quad (7)$$

где
$$A_i = \left[\sum_j B_j D_j f(c_{ij}) \right]^{-1}; \quad B_j = \left[\sum_i A_i Q_i f(c_{ij}) \right]^{-1}, \quad (8)$$

где $f(c_{ij})$ — функция, которая зависит от стоимости перевозки контейнеров. В качестве $f(c_{ij})$ можно использовать среднее время передвижения t_{ij} , которое считается заданным при среднем времени доставки. Среднее время передвижения судов между портами является более или менее стабильным показателем морской транспортной системы, и данная величина может быть спрогнозирована.

Условия реализации программного инструментария для моделирования контейнерооборота

Для построения специализированного программного обеспечения для моделирования необходимы следующие входные данные:

- количество портов, в которые планируется доставка контейнеров определенных объемов;
- количество порожних контейнеров, которые доставляются в данные порты при обратном движении;
- количество контейнеров, которые ожидают погрузки в заданном порту;
- средняя стоимость перевозки контейнеров;
- данные реальной геоинформационной системы, на которой присутствуют заданные порты;
- количество судов, работающих на контейнерной линии;
- среднее время движения судна на линии (данной время для моделирования было взято из дискретного расписания заходов судна в порт).

Стоит учесть, что в программе необходимо внести возможность внесения данных других морских контейнерных линий, которые работают в данных портах и могут также использоваться при перевозке контейнеров. При расчете матрицы корреспонденций доставки контейнеров за среднее время принимает время, равное пути из порта в сегменте отправления в порт в сегмент прибытия. Данная модель может быть применена для моделирования контейнерооборота между «сухими портами» и контейнерными терминалами.

Реализации морских и сухопутных участков транспортной системы приведена на рис. 4. В узловых точках пользователь вводит как количество контейнеров для перевозки, так и количество порожних контейнеров, которые придут в заданный порт.

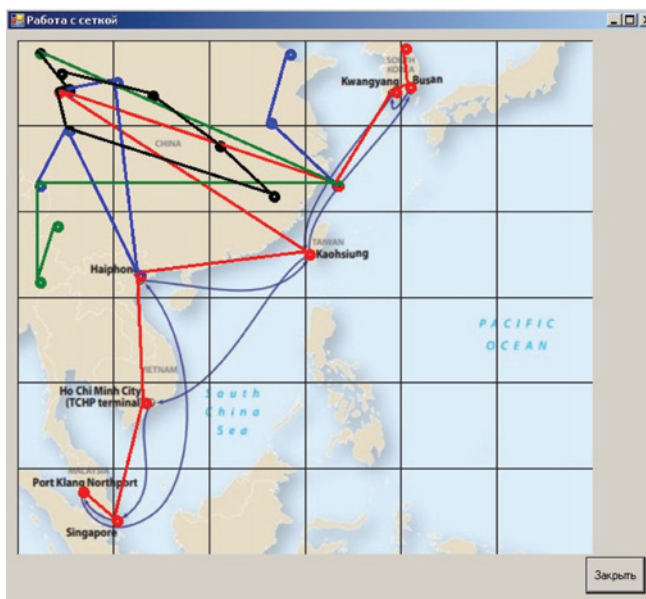


Рис. 4. Оконная форма морской транспортной системы на примере контейнерной линии APL и внесение системы грузовых терминалов и «сухих портов», включенных в систему доставки контейнеров

Заключение

Проведенное исследование направлено на обоснование возможности применения гравитационной модели и аппарата расчета корреспонденций для разработки имитационной модели контейнерооборота в морской транспортной системе. Используемая методика открывает новые возможности по решению группы прогнозных задач — таких как определение оптимального количества судов, определение наиболее загруженного порта на линии, количество перевозимых контейнеров и время доставки. Это достигается благодаря возможности внесения в программу схемы портов (геоинформационных данных), количества контейнеров, требующих перевозки между портами, количества порожних контейнеров и различных задержек в работе контейнерной линии. В качестве исходных данных был выбран набор портов и работа контейнерной линии компании *APL*, но можно также использовать любую другую контейнерную линию. Необходимо отметить, что созданное программное средство может быть использовано для моделирования грузооборота между «сухими портами» и контейнерными терминалами.

В статье предлагается возможность реализации такого подхода как «расчет матриц корреспонденции» для определения контейнерооборота. Авторы расширяют возможность применения данного метода для реализации различных задач моделирования в транспортной отрасли. В результате экспериментирования с добавлением новых судов на линии, внесения динамических данных по количествам контейнеров, требующих перевозки, в зависимости от грузопотока получают числовые характеристики загруженности линии, прогнозируются объемы перевозок.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Майоров Н. Н. Практические задачи моделирования транспортных систем / Н. Н. Майоров, В. А. Фетисов. — СПб.: Изд-во ГУАП, 2012. — 185 с.
2. Майоров Н. Н. Моделирование транспортных процессов / Н. Н. Майоров, В. А. Фетисов. — СПб.: Изд-во ГУАП, 2011. — 165 с.
3. Майоров Н. Н. Имитационное моделирование как метод оптимизации сложной технической системы / Н. Н. Майоров, В. А. Фетисов, В. Е. Таратун // Системный анализ и логистика. — 2013. — № 10. — С. 63–69.
4. 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.
5. Fetisov V. A. System Approach to the Simulation of Transport Infrastructure of Container Terminals / V. A. Fetisov, N. N. Maiorov // Our Sea, International Journal of Maritime Science & Technology. — 2015. — № 5–6. — Pp. 102–105.
6. Введение в транспортную логистику / А. В. Кириченко, А. Л. Кузнецов, О. А. Ражев [и др.]. — СПб.: Изд-во ГУАП, 2011. ¾ 228 с.
7. Global Logistics and Supply Chain Management, second edition / J. Mangan, Ch. Lalwani, T. Butcher, R. Javadpour. — USA: John Wiley & Sons, 2011. ¾ 446 p.
8. Song D.-W. Maritime Logistics: A Complete Guide to Effective Shipping and Port Management / D.-W. Song, Ph. M. Panayides. — London: Kogan Page, 2012. — 344 p.
9. Rodrigue J. P. The Geography of Transport Systems, third edition / J. P. Rodrigue, C. Comtois, B. Slack. — London: Routledge, 2013. — 432 p.
10. Расписание судозаходов фидерных линий в порт Санкт-Петербург [Электронный ресурс]. — Режим доступа: http://baltcomp.spb.ru/public/files/shedule/sched_apl.pdf, http://aplinfo.apl.com/services/documents/sells_mkt_ia_nsl.pdf (дата обращения: 24.06.2015).

11. Каукин А. С. Анализ издержек перемещения товаров при моделировании внешнеторговых потоков / А. С. Каукин, Г. И. Идрисов // Российское предпринимательство. — 2013. — № 12 (234). — С. 23–31.
12. Свидетельство № 19958 / Алгоритм реализации имитационной модели работы морской контейнерной линии / Н. Н. Майоров, В. А. Фетисов. ¾ Свидетельство о регистрации электронного ресурса в объединенном фонде электронных ресурсов «Наука и образование» Государственной Академии Наук. № 19958, 2014. — 6 с.

MODELING OF MARINE CONTAINER TRANSPORT SYSTEM ON THE BASIS OF THE MATHEMATICAL APPARATUS OF THE GRAVITY MODEL

The Maritime transport system are the main and leading form in the system of transporting goods. When solving predictive problems in Maritime transport system it is necessary to use simulation, particularly simulation. There are various methods of modeling the flows of goods among which this article proposes the application of gravity models with calculation of matrix correspondence in relation to the transport of containers. The correct choice of this methodology is due to a large number of initial data that describe in detail the marine transportation system and the possibility of expansion of this technique. Under the extension refers to the ability to host the schemes 'dry ports' cargo and container terminals and other container lines that work on this site. The method allows to determine the most loaded elements of the transport system. Despite this the proposed method involves the calculation of a large number of matrix correspondence of containers between ports that manually is quite difficult therefore the article presents the developed instrument. The article provides an example implementation of the Maritime transportation system on the example of container line APL c switching terminals are involved in the process of shipping containers.

Key words: sea container line, sea transport, modeling, gravity model, the model of calculation of matrix correspondence, vessel schedules.

REFERENCES

1. Majorov, N. N., and V. A. Fetisov. *Prakticheskie zadachi modelirovaniya transportnyh system*. SPb.: GUAP, 2012.
2. Majorov, N. N., and V. A. Fetisov. *Modelirovanie transportnyh processov*. SPb.: GUAP, 2011.
3. Majorov, N. N., V. A. Fetisov, and V. E. Taratun. "Imitacionnoe modelirovanie kak metod optimizacii slozhnoj tehnicheckoj sistemy." *Sistemnyj analiz i logistika* 10 (2013): 63-69.
4. Fetisov, V. A., and N. N. Majorov. "Research and realization of an optimum variant of work of port logistical system, using imitating models of systems of mass service." *Jekspluatacija morskogo transporta* 3 (2012): 3-7.
5. Fetisov, V. A., and N. N. Maiorov. "System Approach to the Simulation of Transport Infrastructure of Container Terminals." *Our Sea, International Journal of Maritime Science & Technology* 5-6 (2015): 102-105.
6. Kirichenko, A. V., A. L. Kuznecov, O. A. Razhev, et al. *Vvedenie v transportnuju logistiku*. SPb.: GUAP, 2011.
7. Mangan, J., Ch. Lalwani, T. Butcher, and R. Javadpour. *Global Logistics and Supply Chain Management, second edition*. John Wiley & Sons, 2011.
8. Song, D.-W., and Ph. M. Panayides. *Maritime Logistics: A Complete Guide to Effective Shipping and Port Management*. Kogan Page, 2012.
9. Rodrigue, J. P., C. Comtois, and B. Slack. *The Geography of Transport Systems, third edition*. Routledge, 2013.
10. Raspisanie sudozahodov fidernyh linij v port Sankt-Peterburg. Web. 24 June 2015 <http://baltcomp.spb.ru/public/files/shedule/sched_apl.pdf>, <http://aplinfo.apl.com/services/documents/sells_mkt_ia_ns1.pdf>.
11. Kaukin, Andrey S. and Georgiy I. Idrisov. "Analysis of Expenses of Goods Transfer in Modeling of Trade Flows." *Russian Journal of Entrepreneurship* 12(234) (2013): 23-31.
12. Majorov, N.N., and V.A. Fetisov. Algoritm realizacii imitacionnoj modeli raboty morskoy kontejnernoj linii. Svidetelstvo o registracii jelektronnogo resursa v obedinennom fonde jelektronnyh resursov "Nauka i obrazovanie" Gosudarstvennoj Akademii Nauk. № 19958. 2014.

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

Майоров Николай Николаевич –
кандидат технических наук, доцент.
Федеральное государственное автономное
образовательное учреждение высшего
профессионального образования
«Санкт-Петербургский государственный
университет аэрокосмического приборостроения»
sciencesuai@yandex.ru
Кириченко Александр Викторович –
доктор технических наук, профессор.
ФГБОУ ВО «ГУМРФ имени адмирала
С. О. Макарова»
Kirichenko.AV@gumrf.ru
Фетисов Владимир Андреевич –
доктор технических наук, профессор.
Федеральное государственное автономное
образовательное учреждение высшего
профессионального образования
«Санкт-Петербургский государственный
университет аэрокосмического приборостроения»
Fet1@aanet.ru

INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Majorov Nikolaj Nikolaevich –
Candidate of Engineering, associate professor.
Saint-Petersburg State University of Aerospace
Instrumentation
sciencesuai@yandex.ru
Kirichenko Aleksandr Viktorovich –
Doctor of Engineering, professor.
Admiral Makarov State University
of Maritime and Inland Shipping
Kirichenko.AV@gumrf.ru
Fetisov Vladimir Andreevich –
Doctor of Engineering, professor.
Saint-Petersburg State University of Aerospace
Instrumentation
Fet1@aanet.ru

УДК 656.1

**А. Л. Кузнецов,
С. С. Павленко,
В. Н. Щербакова-Слюсаренко**

МОДЕЛИРОВАНИЕ СЕТЕЙ КОНТЕЙНЕРНОГО ГРУЗОРАСПРЕДЕЛЕНИЯ

Статья посвящена вопросам генезиса, эволюции и моделирования сетей контейнерного распределения. Подробно рассмотрены основные причины и факторы, вызывающие к жизни процессы формирования сетей и систем контейнерного грузораспределения — от развития первичных связей между грузополучателями и портами, до появления полноценных круговых отправок грузов маршрутными партиями через сухопутные центры контейнерного грузораспределения. Целью проведенной работы является определение зависимости суммарных конечных затрат грузоотправителей при организации отправок в различных сетях грузораспределения от периодичности и географии отправок. Достижение данной цели возможно с использованием имитационного моделирования. Приведено описание имитационной модели сетей контейнерного грузораспределения, проведен анализ практических результатов моделирования, а также сделаны выводы о возможностях применения видов сетей контейнерного грузораспределения, исходя из различных рыночных условий с учетом варьирования периодичности и географии отправок.

Ключевые слова: логистика добавленной стоимости, контейнеры, логистика, контейнерные перевозки, центры грузораспределения, имитационное моделирование.

Эволюция сетей контейнерного грузораспределения

С последней четверти XX в. облик морской транспортной индустрии претерпел значительные изменения. Начальный период развития системы контейнерного грузораспределения в большинстве стран предполагал растарку и затарку контейнеров на территории порта, как показано на рис. 1, без их выпуска в тыловые территории [1], [2]. Грузы выгружались из контейнера и покидали порт в виде генерального груза. Какая-то часть контейнеров загружалась в порту обратным грузом, также прибывающим в порт в виде брейк-балка.

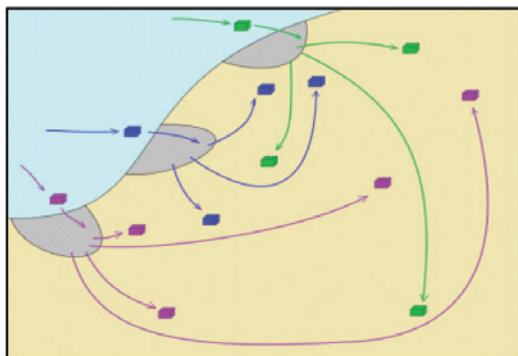


Рис. 1. Обработка на терминалах морских портов

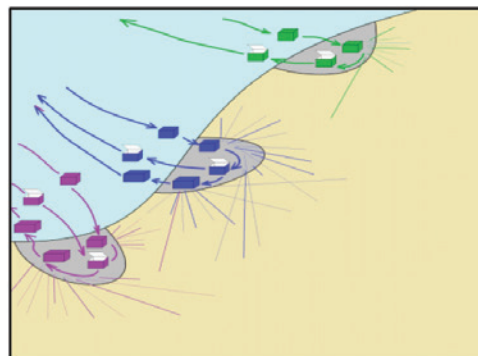


Рис. 2. Доставка импортных контейнеров

Судоходные линии следили за обеспечением баланса выгруженных и погруженных в каждом порту контейнеров (груженых или порожних), поскольку этого требовала природа их оборота как многоразовой тары и экономика замкнутых циклов обращения. При превышении объема импортных грузов над экспортными из порта вывозился излишек порожних контейнеров, в обратном случае ввозились порожние [3]. Однако идеальная сбалансированность импортно-экспортных потоков наблюдалась лишь на начальном этапе контейнеризации, когда для насыщения всего контейнерного оборота было достаточно самого малого объема имеющегося генерального груза. Контейнер все больше завоевывал популярность как интермодальное оборудование, идеально подходящее для доставки грузов в территории грузового тяготения, и контейнеры линий под ответственностью экспедиторов начали проникать в территории грузового тяготения портов.

В России в импорте всегда преобладали груженые контейнеры, поскольку перевозимыми в них грузами являлись в основном промышленные товары. Эти импортные грузопотоки складывались обычно из отправок контейнеров мелким и потому многочисленным грузополучателям, рассеянным по значительной территории [4]. Малый размер грузовых партий заставлял делать выбор в пользу автомобильного транспорта — даже на расстояниях экономического предпочтения железной дороги или внутреннего водного транспорта и при наличии соответствующих транспортных путей. Транспортная процедура при этом разбивалась на несколько отдельных этапов.

Первым этапом процесса контейнерной транспортировки являлась доставка груженых контейнеров из порта в адрес грузополучателя, условно показанная на рис. 2, для ограниченного числа мест доставки. Доставленный контейнер растаривался, тем самым переходя в категорию порожних по месту доставки груза. В большинстве случаев потребители промышленных товаров по специфике своего бизнеса не имели обратного генерального груза для затарки образовавшихся порожних контейнеров, поэтому общим решением был возврат их в порт, откуда был получен груз, как показано на рис. 3. Порожние контейнеры, возвращенные в порт получателями импортных грузов, ожидали там отправки морем к поставщикам импортных грузов.

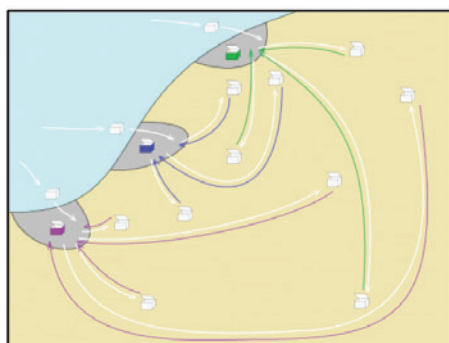


Рис. 3. Возврат порожних контейнеров в порт

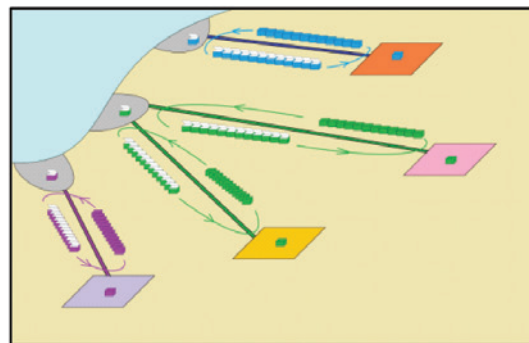


Рис. 4. Репозиционирование порожних контейнеров

Появление экспортных контейнеризированных грузов в первую очередь было связано с работой различных производств — химических, деревообрабатывающих комбинатов, металлургических заводов и пр. Природа их деятельности и экономика транспортировки диктовали использование, как правило, железнодорожного транспорта. Продукция этих грузоотправителей, которая раньше перевозилась в крытых вагонах, полувагонах и на платформах, постепенно стала перевозиться в контейнерах. Отправка поездных партий груза стала требовать симметричной подачи из портов к месту загрузки соответствующих партий порожних контейнеров, как показано на рис. 4.

Подача порожних контейнеров под загрузку в тыловых территориях порта (хинтерленде) носит название «репозиционирование». Если объем производства был согласован с расписанием движения морских линий, проблемы транспортировки не возникало: заблаговременно к моменту подхода судна производство готовило необходимое число экспортных железнодорожных партий, для их транспортировки в порт подавались порожние контейнеры, которые загружались и возвращались в порт круговыми железнодорожными маршрутами. Избыток или дефицит порожних контейнеров восполнялся морскими перевозками (как на начальном этапе, показанном на рис. 1, но с учетом железнодорожных звеньев). Сколько бы отдельных линий ни заходило в тот или иной порт, импортный и экспортный контейнерные потоки к отдельным производствам реализовались через один порт, что позволяло легко устанавливать баланс порожних и использовать полные маршрутные поезда.

С течением времени, по самым разным причинам список портов захода линий может меняться. Кроме того, при возможном ухудшении конъюнктуры рынка, особенно во времена экономического кризиса, уровень «точечного» потребления падает [5]. Для сохранения объема производства и выживания на рынке, поставщики (производители) вынуждены расширять географию рынков и бороться за любых, самых мелких клиентов. Частота сервиса же напрямую связана с максимальным периодом ожидания отправки (получения) груза. Меньший требуемый период доставки грузов в адрес одного порта и множественность ее адресатов не позволяли накопить достаточные для оптимальных перевозок по железной дороге партии грузов. Вытекающее из этого ухудшение экономики перевозок усугубляют обстоятельства наступающего экономического кризиса. Как следствие, сформировавшаяся картина сбалансированных перевозок, показанная на рис. 4, нарушается. Производства заключают контракты с многочисленными потребителями, которые предполагают перевозку различными линиями через различные порты, не имеющие прямого железнодорожного сообщения и даже не имеющими железнодорожного сообщения вовсе. Сроки доставки исключают возможность использовать длинные сроки накопления груза в адрес одного порта. Возникает ситуация, когда в адрес каждого порта партия не составляет объема, нужного для организации маршрутных контейнерных отправок, хотя общий объем продукции позволял бы это сделать, что показано на рис. 5 [6].

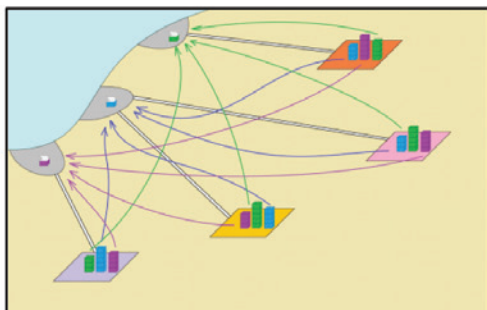


Рис. 5. Проблема репозиционирования

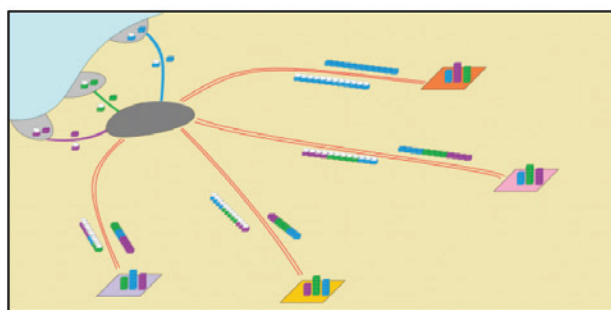


Рис. 6. Концепция сухого порта

Появляется необходимость перехода на повагонные отправки или даже автомобильный транспорт, поскольку в каждом отдельном порту имеются порожние контейнеры, но они принадлежат различным линиям и не могут составлять объемы, требуемые для полноценных маршрут-

ных контейнерных отправок. Очевидно, что ухудшение конъюнктуры рынка напрямую снижает конечную цену товара и косвенно повышает его себестоимость. Производства начинают испытывать сильное экономическое давление. Решением этой проблемы является использование концепции сухого порта, расположенного в ближнем хинтерленде портового кластера [7] – [10]. При этом известном и эффективном логистическом решении в сеть транспортировки вводится новый терминал железнодорожного транshipment (транshipmentом называется передача груза между одним и тем же видом транспорта), или «сухой порт», что показано на рис. 6. Смысл этого названия в том, что для грузоотправителя и грузополучателя этот терминал выполняет все функции морского порта: в общем случае им все равно, через какие именно ворота их груз ввозится или вывозится для морской перевозки. На территории сухого порта осуществляется перекомпоновка маршрутных контейнерных отправок, содержащих адресованные в разные порты партий, в контейнерные же поезда однородной адресации.

Другим вариантом является использование для технологической перевозки между «сухим портом» и морскими портами специализированного автотранспорта. Выбор того или иного варианта зависит от многих факторов: наличия железнодорожных путей, их статуса и проч. В реальных случаях решение о введении «сухого порта» в сеть маршрутов транспортировки не так легко выполнить — необходимо иметь особую конфигурацию транспортных маршрутов. В случае железнодорожного транспорта это не так просто сделать и по времени и по трудоемкости. Во многих практических случаях общие варианты реализуются на сложной иерархической железнодорожной сети.

Поскольку в любом случае изменение схемы транспортировки грузов связано с масштабными затратами, целесообразность перехода на концепцию «сухого порта» должна тщательно обосновываться. Традиционный инструментарий проектирования, планирования и управления оказывается непригодным для управления глобальными логистическими цепями поставок. Интуитивные решения, даже основанные на обширном опыте и коммерческом чутье топ-менеджеров с безупречными резюме, могут оказаться опасными для судеб мега-компаний. Наиболее эффективным инструментом принятия подобных стратегических решений является имитационное моделирование [11] – [14]. Оно не является панацеей и не гарантирует 100 % успеха, но оно не имеет приемлемых альтернатив [15].

Описание имитационной модели сетей контейнерного грузораспределения

На рис. 7 рассмотрены возможные варианты маршрутов между предприятиями-производителями и морскими портами.

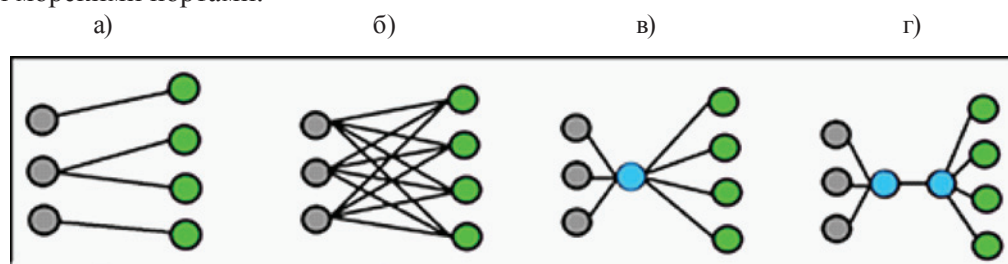


Рис. 7. Конфигурации сетей контейнерного грузораспределения

Как следует из содержательной постановки задачи, изменение объемов отправок продукции предприятий-производителей в морские порты может приводить к отступлениям от схемы, показанной на рис. 7, а. Возможными вариантами является прямая доставка от каждого предприятия в каждый порт-получатель (рис. 7, б), использование консолидирующего узла — «сухого порта» (рис. 7, в), использование двух консолидирующих распределительных узлов (рис. 7, г).

Пусть r_i обозначает предприятие i , и p_j обозначает порт j . В случае конфигурации сетей контейнерного грузораспределения, показанных на рис. 7, а и рис. 7, б, предприятие i направляет в порт j плановый годовой объем $q[r_i, p_j] = q_{ij}$. Эти значения совокупно образуют матрицу годов-

вых грузопотоков между предприятиями и портами $Q = Q_{ij} = q_{ij}$. Каждое предприятие r_i характеризуется своим предельно допустимым интервалом отправки груза в порт t_i^{int} , значения которых составляют вектор-столбец $T^{int} = T_{i,1}^{int} = t_i^{int}$. Тем самым, объем одновременной регулярной отправки из предприятия i в порт j составляет величину $v_{ij} = \frac{q_{ij}}{t_i^{int}}$. Соответствующие значения формируют матрицу объемов регулярных отправок $V = V_{ij} = v_{ij}$.

Если объем регулярной отправки $v_{ij} = \frac{q_{ij}}{t_i^{int}}$ превышает значение V , принимаемое равным максимальной вместимости поезда из 60 фитинговых платформ, т. е. 120 TEU, то для перевозки части регулярной отправки, кратной значению V , используется маршрутная отправка — железнодорожная отправка по одной накладной партии груза в количестве, соответствующем грузоподъемности целого состава поезда. Соответствующие значения формируют матрицу объемов регулярных маршрутных отправок $V_{\text{марш}} = V_{i,j \text{ марш}} = v_{ij \text{ марш}}$.

Если объем регулярной отправки $v_{ij} = \frac{q_{ij}}{t_i^{int}}$ не превышает значение V или составляет большее значение, то для перевозки регулярной отправки объема более или менее значения V , используется повагонная отправка — железнодорожная отправка по одной накладной партии груза, для перевозки которого по его объему, массе или роду требуется отдельный вагон. Соответствующие значения формируют матрицу объемов регулярных повагонных отправок $V_{\text{ваг}} = V_{i,j \text{ ваг}} = v_{ij \text{ ваг}}$.

Когда для регулярной отправки используется маршрутная отправка, применяется тариф C_{ij}^{train} за каждую перевозимую единицу. Когда для регулярной отправки используется повагонная отправка, применяется тариф C_{ij}^{car} за перевозимую единицу, причем $C_{ij}^{\text{train}} = 0,9 C_{ij}^{\text{car}}$. Соответствующие тарифы образуют матрицы $C^{\text{train}} = C_{ij}^{\text{train}} = c_{ij}^{\text{train}}$ и $C^{\text{car}} = C_{ij}^{\text{car}} = c_{ij}^{\text{car}}$.

В случае конфигурации сетей контейнерного грузораспределения, показанных на рис. 7, а и рис. 7, б, задача ставится следующим образом: при заданных значениях $Q = q_{ij}$, $T^{int} = t_i^{int}$, V , $C^{\text{train}} = c_{ij}^{\text{train}}$, $C^{\text{car}} = c_{ij}^{\text{car}}$ определить, какая из данных двух конфигураций транспортной сети является предпочтительной по критерию совокупных затрат. Решение задачи для сетей контейнерного грузораспределения, показанных на рис. 7, а и рис. 7, б, предполагает следующие действия.

1. Вычисление матрицы объема регулярных вывозов с заводов $V_{\text{пер}} = v_{ij \text{ пер}} = Q_{ij} / \left(\frac{365}{T^{int}} \right) = q_{ij} / \left(\frac{365}{t_i^{int}} \right)$.
2. Формирование матрицы регулярных маршрутных отправок $V_{\text{марш}} = V_{i,j \text{ марш}} = v_{ij \text{ марш}}$ при соблюдении условия $v_{ij \text{ пер}} \geq V$ и матрицы регулярных повагонных отправок $V_{\text{ваг}} = V_{i,j \text{ ваг}} = v_{ij \text{ ваг}}$ в случаях, когда $v_{ij \text{ пер}} < V$.
3. Формирование матрицы тарифов $C^{\text{train}} = C_{ij}^{\text{train}} = c_{ij}^{\text{train}}$ и $C^{\text{car}} = C_{i,j}^{\text{car}} = c_{ij}^{\text{car}}$.
4. Вычисление матрицы стоимости перевозок из заводов в порты $X = X_{ij} = x_{ij} = c_{ij}^{\text{car}} \cdot v_{ij \text{ ваг}} + c_{ij}^{\text{train}} \cdot v_{ij \text{ марш}}$.
5. Вычисление суммы элементов матрицы X , дающее значение суммарной стоимости.
6. Вычисление вектора стоимости перевозки годовой партии от каждого завода $X_{\text{год}} = x_{i \text{ год}}$ и вычисление вектора стоимости доставки одного TEU от каждого завода $X_{\text{TEU}} = x_{i \text{ TEU}}$.

В случае конфигурации сети контейнерного грузораспределения, показанной на рис. 7, в, предприятие i направляет грузы не прямо в порты, а в некий контейнерный центр грузораспределения L_1 , откуда общий объем далее распределяется между портами j . Соответственно, матрица годовых грузопотоков между предприятиями и портами $Q = Q_{ij} = q_{ij}$ распадается на два вектора — вектор-столбец, описывающий поставки из предприятий в некий контейнерный центр грузораспределения L_1 , т. е. $Q^r = Q_{i,L_1}^r = q_{i,L_1}^r$, и вектор-строку, описывающий поставки из некоего контейнерного центра грузораспределения L_1 в морские порты, т. е. $Q^p = Q_{L_1,j}^p = q_{L_1,j}^p$.

В случае конфигурации сети контейнерного грузораспределения, показанной на рис. 7, в, каждое предприятие r_i также будет характеризоваться своим предельным допустимым интервалом отправки груза в контейнерный центр грузораспределения t_i^{int} , значения которых составляют вектор-столбец $T^{int} = T_{i,1}^{int} = t_i^{int}$. Тем самым, объем одновременной регулярной отправки из пред-

приятия i в порт контейнерный центр грузораспределения L_1 , как и в предыдущих вариантах, составляет величину $v_{iL_1} = \frac{q_{iL_1}}{t_i^{int}}$. Соответствующие значения сформируют вектор объемов регулярных отправок $V = V_{iL_1} = v_{iL_1}$. В данном случае действуют те же условия и принципы применения повагонных и маршрутных отправок, что и случаях, показанных на рис. 7, а и рис. 7, б.

В случае конфигурации сети контейнерного грузораспределения, показанной на рис. 7, в, тарифы на повагонную и маршрутную отправки будут отличаться по принципу $C_{ij}^{train} > C_{iL_1}^{train}$ и $C_{ij}^{car} > C_{iL_1}^{car}$ в связи с меньшим расстоянием перевозок. Тариф на перевозки партий груза из контейнерного центра грузораспределения L_1 в морские порты j в так называемых «поездах-шаттлах» определяется значением U и задается вектор-строкой $U = U_{L_1j} = U_{L_1}$.

В случае конфигурации сети контейнерного грузораспределения, показанной на рис. 7, в, задача ставится следующим образом: при заданных значениях $Q = q_{ij}$, $T^{int} = t_i^{int}$, V , $C^{train} = c_{iL_1}^{train}$, $C^{car} = c_{iL_1}^{car}$ и $U = U_{L_1j}$ определить, какая из трёх конфигураций транспортной сети является предпочтительной по критерию совокупных затрат. Решение задачи для сети контейнерного грузораспределения, показанной на рис. 7, в, предполагает следующие действия.

1. Вычисление вектора объемов регулярных вывозов с заводов $V_{per} = v_{iL_1per} = Q_i / \left(\frac{365}{T^{int}} \right) = q_i / \left(\frac{365}{t_i^{int}} \right)$.
2. Формирование вектора регулярных маршрутных отправок $V_{марш} = V_{i \times L_1 марш} = v_{iL_1 марш}$ при соблюдении условия $v_{iL_1per} \geq V$ и вектора регулярных повагонных отправок $V_{ваг} = V_{iL_1 ваг} = v_{iL_1 ваг}$ в случаях, когда $v_{iL_1per} < V$.
3. Формирование векторов применяемых тарифов $C^{train} = C_{iL_1}^{train} = c_{iL_1}^{train}$ и $C^{car} = C_{iL_1}^{car} = c_{iL_1}^{car}$.
4. Вычисление вектора-столбца стоимости перевозок из заводов в контейнерный центр грузораспределения $X = X_{iL_1} = x_{iL_1} = c_{iL_1}^{car} \cdot v_{iL_1 ваг} + c_{iL_1}^{train} \cdot v_{iL_1 марш}$.
5. Вычисление вектора-строки стоимости перевозок из контейнерного центра грузораспределения в морские порты $Y = Y_{L_1j} = y_{L_1j} = U_{L_1j} \cdot q_j$.
6. Вычисление суммы элементов векторов X и Y , дающее суммарную стоимость перевозок.
7. Вычисление вектора стоимости перевозки годовой партии от каждого завода $X_{год} = x_{i год}$ и вычисление вектора стоимости доставки одного TEU от каждого завода $X_{TEU} = x_{i TEU}$.

В случае конфигурации сети контейнерного грузораспределения, показанной на рис. 7, з, предприятие i направляет грузы не прямо в порты, а в некий ближайший контейнерный центр грузораспределения L_2 , где партии объединяются, грузятся в ускоренные контейнерные поезда (далее — УКП) и направляются в контейнерный центр грузораспределения L_1 . Соответственно, матрица годовых грузопотоков между предприятиями и портами $Q = Q_{ij} = q_{ij}$ распадается на три элемента: два вектора (вектор-столбец, описывающий поставки из предприятий в некий контейнерный центр грузораспределения L_2 , т. е. $Q^r = Q_{iL_2}^r = q_{iL_2}^r$, и вектор-строку, описывающую поставки из некоего контейнерного центра грузораспределения L_1 в морские порты, т. е. $Q^p = Q_{L_1j}^p = q_{L_1j}^p$), и на значение отправок в УКП — $Q_{УКП} = Q_{L_1L_2}$. Тариф на перевозки партий груза между контейнерными центрами грузораспределения L_1 и L_2 в УКП определяется значением S . Объемы повагонных и маршрутных отправок рассчитываются в виде векторов аналогично предыдущим вариантам.

В случае конфигурации сети контейнерного грузораспределения, показанной на рис. 7, з, тарифы на повагонную и маршрутную отправки $C_{iL_1}^{train} > C_{iL_2}^{train}$ и $C_{iL_1}^{car} > C_{iL_2}^{car}$ в связи с меньшим расстоянием перевозок. Решение задачи для сети, показанной на рис. 7, з, предполагает следующие действия.

1. Вычисление объемов регулярных вывозов $V_{per} = v_{iL_2per} = Q_i / \left(\frac{365}{T^{int}} \right) = q_i / \left(\frac{365}{t_i^{int}} \right)$.
2. Формирование вектора регулярных маршрутных отправок $V_{марш} = V_{iL_2 марш} = v_{iL_2 марш}$ при соблюдении условия $v_{iL_2per} \geq V$ и вектора регулярных повагонных отправок $V_{ваг} = V_{iL_2 ваг} = v_{iL_2 ваг}$ в случаях, когда $v_{iL_2per} < V$.

3. Определение значения $V_{\text{УКП}} = V_{L_1 L_2 \text{ УКП}} = Q_{L_1 L_2} = Q$.
4. Формирование векторов тарифов $C^{\text{train}} = C_{iL_2}^{\text{train}} = c_{iL_2}^{\text{train}}$ и $C^{\text{car}} = C_{iL_2}^{\text{car}} = c_{iL_2}^{\text{car}}$.
5. Вычисление вектора-столбца стоимости перевозок из заводов в контейнерный центр грузораспределения L_2 : $X = X_{iL_2} = x_{iL_2} = c_{iL_2}^{\text{car}} \cdot v_{iL_2 \text{ вар}} + c_{iL_2}^{\text{train}} \cdot v_{iL_2 \text{ марш}}$.
6. Вычисление значения стоимости перевозки груза между контейнерными центрами грузораспределения L_1 и L_2 в УКП: $S_{\text{УКП}} = S_{L_1 L_2 \text{ УКП}} = Q_{L_1 L_2} = S \cdot Q$.
7. Вычисление вектора-строки стоимости перевозок из контейнерного центра грузораспределения L_1 в морские порты $Y = Y_{L_1 j} = y_{L_1 j} = U_{L_1 j} \cdot q_j$.
8. Вычисление суммы векторов X , Y и значения S суммарной стоимости перевозок.
9. Вычисление вектора стоимости перевозки годовой партии от каждого завода $X_{\text{год}} = x_{i \text{ год}}$ и вычисление вектора стоимости доставки одного TEU от каждого завода $X_{\text{ТЕУ}} = x_{i \text{ ТЕУ}}$.

Анализ результатов имитационного моделирования

Для того чтобы продемонстрировать работу имитационной модели сетей контейнерного грузораспределения, рассмотрим несколько частных случаев со следующими начальными данными: значениями годового грузопотока от каждого предприятия-производителя Q , TEU; интервалами отправок грузовых партий T^{int} , сут; максимальной вместительностью контейнерного поезда V , TEU; тарифами на маршрутную отправку от предприятия к морскому или «сухому» порту C^{train} , руб./TEU; тарифами на повагонную отправку от предприятия к морскому или «сухому» порту C^{car} , руб./TEU; тарифами на маршрутную отправку от «сухого порта» к морскому порту U , руб./TEU; тарифами на маршрутную отправку между контейнерными центрами грузораспределения в составе УКП $S_{\text{УКП}}$, руб./TEU.

Для наглядности проведем рассуждения на конкретных примерах с известными финансовыми показателями, поскольку количественные характеристики позволят лучше продемонстрировать работу имитационной модели. Предположим, что задача состоит в нахождении максимально дешевого варианта доставки контейнеров между предприятиями-производителями и морскими портами, исходя из конфигураций системы, предложенных на рис. 7, а – рис. 7, з. В качестве морских портов для использования в модели выберем морские контейнерные терминалы в порту Санкт-Петербург — ОАО «Петролеспорт» и ЗАО «КТСП», обслуживаемые железнодорожными станциями Новый порт и Автово, а также терминал ОАО «УЛКТ», обслуживаемый станцией Лужская. В качестве грузоотправителей для наглядности выберем четыре предприятия в глубине территории Российской Федерации — в городах Сегежа (ст. Сегежа), Кондопога (ст. Нигозеро), Нижнекамск (ст. Биклянь) и Нижний Новгород (ст. Правдинск). В качестве припортового центра контейнерного грузораспределения — «сухого порта», выбрана станция Шушары в Санкт-Петербурге, тогда как в качестве внутреннего центра контейнерного грузораспределения выбрана станция Киров. Железнодорожные тарифы для использования в модели рассчитаем с помощью промышленного комплекса ЭТРАН.

Пример 1. Весь годовой грузопоток от каждого предприятия достается полностью каждому порту в отдельности, а интервал отправок минимальный — еженедельная отправка грузовой партии, соответственно: значения годового грузопотока от каждого предприятия-производителя Q составляют по 7000 TEU в каждый порт; интервал отправок грузовых партий из каждого предприятия T^{int} , 7 сут.; максимальная вместительность контейнерного поезда V , 120 TEU.

Пример 2. Весь годовой грузопоток от каждого предприятия распределяется по всем трем портам в соотношении 3 : 3 : 1, интервал отправок остается минимальным — еженедельная отправка грузовой партии, соответственно: значения годового грузопотока от каждого предприятия-производителя Q составляют по 3000 TEU в порты 1 и 2, а также по 1000 TEU в порт 3; интервал отправок грузовых партий из каждого предприятия T^{int} , 7 сут.; максимальная вместительность контейнерного поезда V , 120 TEU.

Пример 3. Весь годовой грузопоток от каждого предприятия достается полностью каждому порту в отдельности, а интервал отправок максимальный — отправка грузовой партии в конце

каждой третьей недели, соответственно: значения годового грузопотока от каждого предприятия-производителя Q составляют по 7000 TEU в каждый порт; интервал отправок грузовых партий из каждого предприятия T^{int} , 19 сут; максимальная вместительность контейнерного поезда V , 120 TEU.

Пример 4. Весь годовой грузопоток от каждого предприятия распределяется по всем трем портам в соотношении 3 : 3 : 1, а интервал отправок максимальный — отправка грузовой партии в конце каждой третьей недели, соответственно: значения годового грузопотока от каждого предприятия-производителя Q составляют по 3000 TEU в порты 1 и 2, а также по 1000 TEU в порт 3; интервал отправок грузовых партий из каждого предприятия T^{int} , 19 сут.; максимальная вместительность контейнерного поезда V , 120 TEU.

Сведем полученные результаты моделирования в общий рисунок для удобства сравнения. Общая стоимость доставки годового грузопотока Q для всех четырех предприятий-производителей с использованием различных сетей грузораспределения составит, руб.:

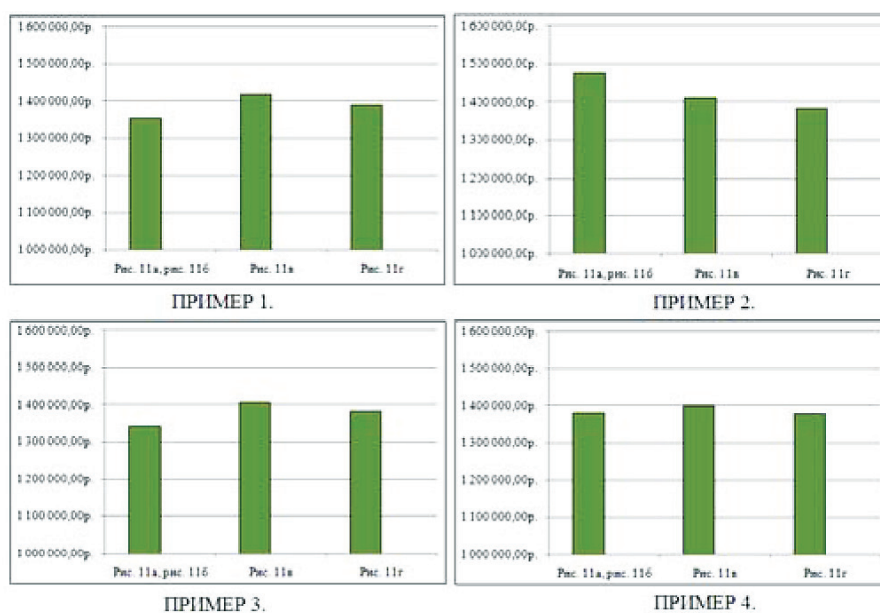


Рис. 8. Сравнительная гистограмма для примеров 1 – 4

Выводы

1. Структура глобальных контейнерных сетей транспортировки характеризуется высокой динамикой развития и калейдоскопической изменчивостью.
2. Все большее значение в планировании развития портов и терминалов принимает концепция не реактивного, а проактивного поведения.
3. Предугадывание возможных тенденций развития и оценка вероятности их реализации требует глубинного понимания движущих механизмов развития современной транспортной системы.
4. Некоторые из этих механизмов описаны в данной статье — наряду с проблемами, которые ставит современная транспортная индустрия перед руководством портов и терминалов.
5. Имитационное моделирование позволяет определить те начальные условия, при которых та или иная сеть контейнерного грузораспределения будет наиболее эффективна с точки зрения затрат на организацию перевозки.
6. Сети контейнерного грузораспределения, не использующие элементы «сухих портов», являются эффективными с точки зрения затрат на организацию перевозки только в случаях больших интервалов между отправлениями (более 14 сут.) и ориентации на каждый конкретный порт в отдельности.

7. В случаях, когда небольшие интервалы отправок исключают возможность длительное время накапливать груз в адрес одного порта, наиболее эффективной с точки зрения затрат на организацию перевозки для каждого предприятия является схема с использованием двух консолидирующих распределительных узлов — припортового и внутреннего.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Кузнецов А. Л. Морские и сухопутные порты в новой мировой системе грузораспределения / А. Л. Кузнецов // Эксплуатация морского транспорта. — 2009. — № 1. — С. 9–12.
2. Щербанин Ю. А. Контейнерные перевозки. Настоящее и будущее / Ю. А. Щербанин // Логистика и управление. — 2014. — № 16 (36). — С. 18–23.
3. Погодин В. А. Пустопорожняя логистика: только в России? / В. А. Погодин, И. В. Серова, А. Л. Кузнецов // Терминал. — 2004. — № 4 (44). — С. 58–59.
4. Кузнецов А. Л. Транспорт России как часть мировой системы / А. Л. Кузнецов, О. И. Титберия // Морские порты России. — 2002. — № 5 (33). — С. 18–20.
5. Степанов А. Л. Проектирование морских терминалов / А. Л. Степанов, А. Л. Кузнецов, О. И. Титберия // Терминал. — 2002. — № 4–5 (34–35). — С. 26–31.
6. Щербакова-Слюсаренко В. Н. Концепция сухих портов в мире и в Российской Федерации / В. Н. Щербакова-Слюсаренко // Материалы 2-й Межвузовской науч.-практ. конф. — СПб.: Изд-во ГУМРФ, 2014. — С. 76–89.
7. Галин А. В. Сухие порты как часть транспортной инфраструктуры. Направления развития / А. В. Галин // Вестник Государственного университета морского и речного флота имени адмирала С. О. Макарова. — 2014. — № 2 (24). — С. 87–92.
8. Кузнецов А. Л. Показатели производительности на практике / А. Л. Кузнецов, В. Н. Щербакова-Слюсаренко // Морские порты. — 2014. — № 10 (121). — С. 24–28.
9. Щербакова-Слюсаренко В. Н. Базовая модель для оценки экономической эффективности контейнерных терминалов на основе анализа логистических процессов / В. Н. Щербакова-Слюсаренко // Транспортное дело России. — 2013. — № 1. — С. 55–57.
10. Инфраструктура порта и ее влияние на конкурентоспособность контейнерных перевозок / В. А. Погодин, О. Парикка, И. В. Серова [и др.] // Контейнерный бизнес. — 2007. — № 4 (10). — С. 70–73.
11. Кузнецов А. Л. Генезис агентного имитационного моделирования в ходе развития методов технологического проектирования портов и терминалов / А. Л. Кузнецов // Эксплуатация морского транспорта. — 2009. — № 4. — С. 3–7.
12. Кузнецов А. Л. Формализация задачи выбора транспортно-технологической схемы контейнерного терминала / А. Л. Кузнецов, О. И. Титберия // Труды Междунар. науч.-практ. конф. KDS-2001 «Знание — диалог — решение». — СПб.: Лань, 2001. — С. 409–415.
13. Ковалев Р. В. Введение в моделирование динамики механических систем / Р. В. Ковалев, Д. В. Даниленко // САПР и графика. — 2008. — № 4. — С. 26–31.
14. Кириченко А. В. Обоснование исходных данных при моделировании вывоза контейнеров из порта на тыловой терминал с применением технологии «блок-трейн» / А. В. Кириченко, М. О. Малыхин // Вестник Государственного университета морского и речного флота имени адмирала С. О. Макарова. — 2015. — № 4 (32). — С. 22–30.
15. Горынцев М. Н. Имитационное моделирование порта Тамань / М. Н. Горынцев // Материалы 2-й Межвузовской науч.-практ. конф. — СПб.: Изд-во ГУМРФ, 2014. — С. 35–43.

CONTAINER DISTRIBUTION NETWORKS MODELING

The article is devoted to the genesis, evolution and container distribution networks modeling. Main causes and factors that bring to life the processes of cargo distribution networks formation are analyzed — from the development of the primary links between the consignees and ports up to the full routing shipments of goods through hinterland cargo distribution centers. The main goal of the research is to define the relations between the shipping costs and periods of shipping or transshipment points in different market and distribution conditions. This goal can be achieved with the help of simulation modeling. The article contains full description of container distribution

networks model. The article also contains practical analysis of modeling results and main conclusions about different types of cargo distribution networks based on various market and distribution conditions.

Key words: value added logistics, containers, logistics, container shipping, cargo distribution centers, simulation.

REFERENCES

1. Kuznetsov, A. L. "Sea and dry ports in the new world cargo distribution system." *Exploatatsiya morskogo transporta* 1 (2009): 9-12.
2. Shcherbanin, J. K. "Container Shipping. Present and Future." *Logistics and Management* 16(36) (2014): 18-23.
3. Pogodin, V. A., I. V. Serova, and A. L. Kuznetsov. "Pustoporozhnyaya logistica: tolko v Rossii?" *Terminal* 4(44) (2004): 58-59.
4. Kuznetsov, A. L., and O. I. Titberiya. "Transport Rossii kak chast mirovoj sistemy." *Morskie porty Rossii* 5(33) (2002): 18-20.
5. Stepanov, A. L., A. L. Kuznetsov, and O. I. Titberiya. "Proektirovanie morskikh terminalov." *Terminal* 4-5 (34-35) (2002): 26-31.
6. Shcherbakova-Slyusarenko, V. N. "Concepcia suhih portov v mire i v Rossiskoy federatsii." *Materiali vtoroi mezhvuzovskoi nauchno-practicheskoy konferencii*. - SPb.: Izd-vo GUMRF im adm. S.O. Makarova, 2014: 76-89.
7. Galin, A. V. "Dry ports as part of inland transport system. Directions of development." *Vestnik Gosudarstvennogo universiteta morskogo i rechnogo flota imeni admirala S.O.Makarova* 2(24) (2014): 87-92.
8. Kuznetsov, A. L., and V. N. Shcherbakov-Slyusarenko. "Pokazatili proizvoditelnosti na practice." *Morskie porty* 10(121) (2014): 24-28.
9. Shcherbakova-Slyusarenko, V. N. "Basic model of assessment of economic efficiency of container terminal based on the logistic processes analyses." *Transport business in Russia* 1 (2013): 55-57.
10. Pogodin, V. A., Olli Parikka, I. V. Serov, and A. L. Kuznetsov. "Infrastructura porta i eye vliyanie na konkurentosposobnost containernyh perevozok." *Kontejnernyj biznes* 4(10) (2007): 70-73.
11. Kuznetsov, A. L. "Genesis of the agent simulation in development of methods of technological design of ports and terminals." *Exploatatsiya morskogo transporta* 4 (2009): 3-7.
12. Kuznetsov, A. L., and O. I. Titberiya. "Formalizacija zadachi vybora transportno-tehnologicheskoy shemy kontejnernogo terminala." *Trudi mezhdunarodnoi practicheskoi konferencii KDS-2001 "Znanie-dialog-reshenie"*. SPb.: Lan, 2001: 409-415.
13. Kovalev, R. V., and D. V. Danilenko. "Vvedenie v modelirovanie dinamiki mehanicheskikh system." *SAPR i grafika* 4 (2008): 26-31.
14. Kirichenko, A. V., and M. O. Malihin. "Justification of the original data in the simulation of containers' carriage from sea terminal to dry port with the use of technology «block-train»." *Vestnik Gosudarstvennogo universiteta morskogo i rechnogo flota imeni admirala S.O.Makarova* 4(32) (2015): 22-30.
15. Goryntsev, M. N. "Imitatsionnoye modelirovaniye porta Taman." *Materiali vtoroi mezhvuzovskoi nauchno-practicheskoy konferencii*. SPb.: Izd-vo GUMRF im adm. S.O. Makarova, 2014: 35-43.

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

Кузнецов Александр Львович,
доктор технических наук, доцент.
ФГБОУ ВО «ГУМРФ имени адмирала С. О. Макарова»
thunder1950@yandex.ru
Павленко Сергей Сергеевич, аспирант.
ФГБОУ ВО «ГУМРФ имени адмирала С. О. Макарова»
Научный руководитель:
Кузнецов Александр Львович, доктор технических наук, доцент
spavlenko90@mail.ru
Щербакова-Слюсаренко Виктория Николаевна, аспирант.
ФГБОУ ВО «ГУМРФ имени адмирала С. О. Макарова»
Научный руководитель: Кузнецов Александр Львович, доктор технических наук, доцент
victorysch@mail.ru

INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Kuznetsov Alexander Lvovitch,
Doctor of Engineering, associate professor
Admiral Makarov State University of Maritime and Inland Shipping
thunder1950@yandex.ru
Pavlenko Sergei Sergeyevich, postgraduate.
Admiral Makarov State University of Maritime and Inland Shipping
Supervisor: Kuznetsov Alexander Lvovitch, Doctor of Engineering, associate professor
spavlenko90@mail.ru
Scherbakova-Slyusarenko Victoria Nickolaevna, postgraduate.
Admiral Makarov State University of Maritime and Inland Shipping
Supervisor: Kuznetsov Alexander Lvovitch, Doctor of Engineering, associate professor
victorysch@mail.ru

КОМПЛЕКС ДЛЯ ПЕРЕГРУЗКИ НАСЫПНЫХ СТРОИТЕЛЬНЫХ МАТЕРИАЛОВ В СРЕДСТВА ВОДНОГО ТРАНСПОРТА

Для перегрузки насыпных строительных материалов из автосамосвалов в средства водного транспорта обычно создается промежуточный склад, оснащенный специализированным погрузочным и вспомогательным оборудованием, задействуется дополнительный персонал, что значительно увеличивает стоимость транспортировки грузов. Совершенствование и оптимизация перегрузочных операций с целью снижения стоимости работ и количества задействованного погрузочного оборудования и персонала при перевалке насыпных грузов является актуальной задачей. В статье предлагается конструкция перегрузочного комплекса, позволяющего с минимальными эксплуатационными и капитальными затратами решить задачу по перегрузке насыпных строительных материалов из автосамосвалов в средства водного транспорта при удаленном расположении производственно-добывающего предприятия от водных путей. Комплекс увеличивает производительность погрузки насыпных материалов за счет ведения процесса посредством двух бункеров и автоматизации управления перемещением бункеров в пространстве, а также обеспечивает высокий уровень техники безопасности при ведении работ.

Ключевые слова: строительные материалы, перегрузка, причальная стенка, автосамосвал, судно, трюм, гидроцилиндры, привод, бункер, рама.

Введение

Протяженность внутренних водных путей Российской Федерации составляет более 100 тыс. км и является самой большой в мире [1], [2]. Речной транспорт позволяет доставлять грузы в труднодоступные места, где отсутствует или слабо развита транспортная инфраструктура, особенно это актуально для ряда районов Сибири и Дальнего Востока. Наиболее массовыми являются такие грузы как щебень, гравий, песок и песчано-гравийная смесь, используемые в качестве строительных материалов [3]. Потребность в строительных материалах максимально возрастает именно в теплый период года, когда осуществляется судоходство, следовательно, речной транспорт, взяв на себя перевозку подобных грузов, разгрузит другие виды транспорта, чем повысит пропускную способность всей транспортной инфраструктуры регионов.

Некоторые предприятия, ведущие добычу и переработку строительных горных пород, производящие щебень и другие строительные материалы, расположены на определенном удалении от речных коммуникаций, через которые планируется отправлять готовую продукцию потребителям [4], [5]. При этом транспортирование щебня и других насыпных материалов до средств водного транспорта осуществляется, как правило, строительными автосамосвалами, которые могут перемещаться по автомобильным дорогам общего пользования и имеют грузоподъемность 7 – 20 т [6], [7]. Обычно автосамосвалы разгружаются на специальных промежуточных складах готовой продукции, расположенных вблизи водных коммуникаций, данные склады оснащаются различным перегрузочным оборудованием в виде порталных кранов, конвейеров, устройств пневмо- и гидротранспорта [3], [8], [9]. Для организации промежуточного склада необходим соответствующий землеотвод, а также приобретение специального перегрузочного оборудования и вспомогательных машин в виде бульдозера или погрузчика, содержание на складе специального персонала для обслуживания этой техники, что связано со значительными дополнительными капитальными и эксплуатационными затратами, в дальнейшем отражающимися на стоимости строительных материалов [4]. Поэтому совершенствование и оптимизация перегрузочных операций с целью снижения стоимости работ и количества задействованного погрузочного оборудования при перевалке насыпных грузов из автомобильного в водный транспорт является актуальной задачей.

Анализ известных устройств

Для обеспечения непосредственной разгрузки насыпных грузов из автосамосвалов в трюмы судна разработаны погрузочные устройства, включающие эстакаду с дорожным покрытием, расположенную вдоль причальной стенки, рельсовую колею, размещенную под эстакадой, тележку с рамой и загрузочным желобом, гидроцилиндры управления рамой и загрузочным желобом, механизм перемещения тележки по рельсам [4], [10], [11]. После швартовки транспортного судна к причальной стенке тележка с загрузочным желобом перемещается по рельсам в пределах фронта погрузки до положения, соответствующего размещению загрузочного желоба между смежными колоннами эстакады. В этом положении тележка останавливается, включаются гидроцилиндры управления рамой и загрузочным желобом и разворачивают их в положение для приема сыпучего материала из кузова автосамосвала. Одновременно с этим автосамосвал по подъездной дороге въезжает на эстакаду с дорожным покрытием, останавливается напротив загрузочного желоба и разгружается, сыпучий материал самотеком направляется на загрузочный желоб, а с него падает в трюм судна, образуя штабель, симметричный продольной оси судна. После заполнения соответствующего участка трюма гидроцилиндры поворачивают раму и загрузочный желоб в транспортное положение, и тележка перемещается по рельсовому пути в новое положение, при котором загрузочный желоб оказывается между очередными смежными колоннами эстакады, затем описанный процесс повторяется.

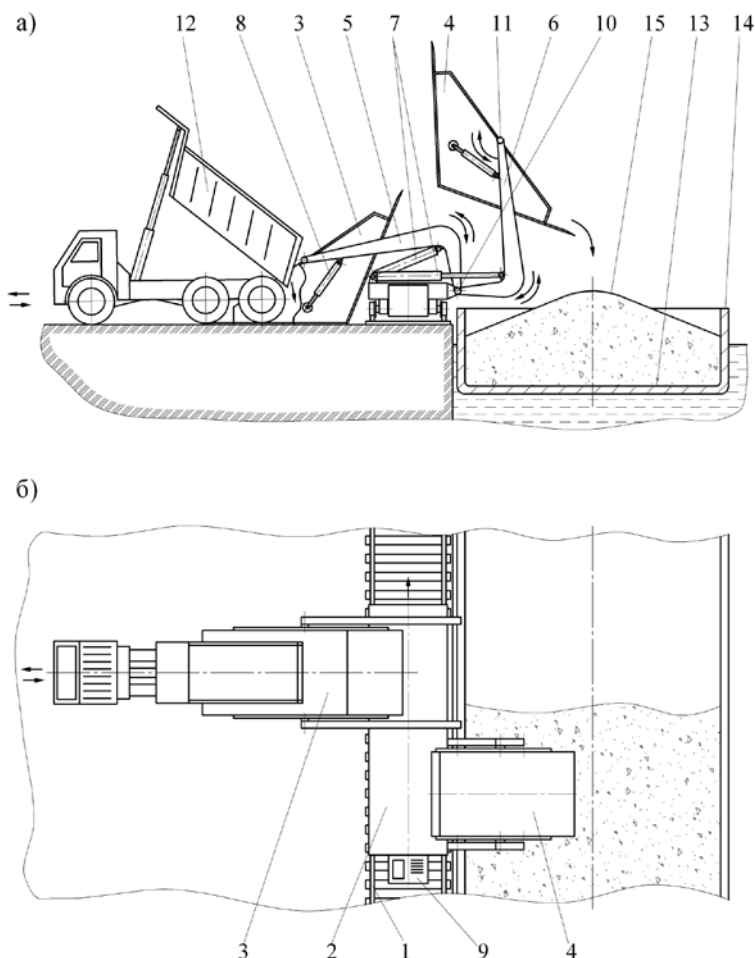
Применение данных погрузочных комплексов позволяет отказаться от промежуточного склада, однако строительство эстакады с дорожным покрытием для перемещения по ней автосамосвалов с грузом требует значительных дополнительных капитальных затрат и затрудняет использование причала для работы с другими грузами; при перемещении тележки по рельсам вдоль причальной стенки требуется постоянное сворачивание и разворачивание рамы и загрузочного желоба с помощью гидроцилиндров, что снижает производительность погрузочного устройства; движение автосамосвала по эстакаде и разгрузка на ней снижает безопасность ведения перегрузочных работ.

Предлагаемая конструкция

Устранить перечисленные недостатки позволяет комплекс для перегрузки насыпных строительных материалов из автосамосвалов в трюмы судна [12], включающий в себя рельсовую колею 1, тележку 2, бункеры 3 и 4, рамы 5 и 6 бункеров, гидроцилиндры 7 подъема-опускания рам, гидроцилиндры 8 поворота бункеров, привод 9 (см. рисунок с. 45). Рамы 5 и 6 шарнирами 10 подвижно связаны с тележкой 2, а бункеры 3 и 4 при помощи шарниров 11 подвижно соединены с рамами 5 и 6. Привод 9 (автономный или с питанием от внешнего источника энергии) установлен на тележке 2.

Работа комплекса по перегрузке насыпных строительных материалов в трюмы судна реализуется следующим образом. Автосамосвал 12 задним ходом частично заезжает в один из бункеров, например в бункер 3, находящийся в нижнем положении, и разгружается в нем, бункер 3 в данном случае также является противовесом для обеспечения устойчивости тележки 2 при разгрузке бункера 4. Бункер 4, ранее загруженный другим автосамосвалом, при помощи рамы 6, гидроцилиндров 7, 8 и привода 9 перемещается в пространстве, позиционируется над трюмом 13 судна 14 и разгружается в трюм, образуя штабель 15 симметричный продольной оси судна.

Управление перемещением бункера производится оператором комплекса с выносного пульта управления, при этом автоматически через блок управления обеспечивается синхронизация работы гидроцилиндров 7 и 8 для выравнивания угла наклона днища бункера 4, перемещаемого в пространстве для исключения просыпания насыпного материала. После разгрузки бункера 4 в трюм судна происходит его возвращение в нижнее положение, и начинается подъем загруженного бункера 3. При заполнении соответствующего участка трюма судна тележка с порожними бункерами перемещается по рельсовому пути вдоль фронта погрузки в новое положение, затем описанный процесс повторяется.



Комплекс для перегрузки насыпных строительных материалов из автосамосвалов в водный транспорт:
а — вид сбоку; *б* — вид сверху; 1 — рельсовая колея; 2 — тележка; 3, 4 — бункеры; 5, 6 — рамы;
 7 — гидроцилиндры подъема-опускания рам; 8 — гидроцилиндры поворота бункеров;
 10, 11 — шарнирные соединения; 12 — автосамосвал; 13 — трюм; 14 — судно;
 15 — штабель насыпного материала

Таким образом, комплексом обеспечиваются одновременно протекающие процессы приема сыпучих материалов и их погрузки в трюм судна, а также периодическое перемещение тележки по рельсам на всю длину фронта погрузки, равного суммарной длине трюмов судна.

Выводы

Предлагаемая конструкция комплекса для перегрузки насыпных строительных материалов позволяет с минимальными эксплуатационными и капитальными затратами решить задачу по перевалке грузов из автосамосвалов в средства водного транспорта в условиях удаленного расположения производственно-добывающих предприятий от транспортных коммуникаций. Комплекс увеличивает производительность погрузки насыпных материалов за счет ведения процесса посредством двух бункеров и автоматизации управления перемещением бункеров в пространстве, а также обеспечивает высокий уровень техники безопасности при ведении работ.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Галин А. В. Внутренние водные пути России как часть транспортной инфраструктуры страны / А. В. Галин // Вестник Государственного университета морского и речного флота имени адмирала С. О. Макарова. — 2014. — № 1 (23). — С. 120–124.

2. Злобин Д. С. Обоснование оптимальных параметров судов «река-море» плавания в современных условиях эксплуатации / Д. С. Злобин, Ю. Н. Уртминцев // Наука и техника транспорта. — 2012. — № 2. — С. 40–46.
3. Филиппова Д. А. Баланс сточных вод при перегрузке песка гидромеханизированным способом / Д. А. Филиппова // Вестник Государственного университета морского и речного флота имени адмирала С. О. Макарова. — 2014. — № 2 (24). — С. 151–155.
4. Тарасов Ю. Д. Перегрузка насыпных грузов из автомобилей-самосвалов в средства водного транспорта / Ю. Д. Тарасов // Горное оборудование и электромеханика. — 2010. — № 6. — С. 15–21.
5. Чебан А. Ю. Структурный анализ технических средств, задействованных при добыче строительных горных пород на юге Дальневосточного региона / А. Ю. Чебан, Г. В. Секисов, Н. П. Хрунина // Горная промышленность. — 2013. — № 4 (110). — С. 26–29.
6. Секисов Г. В. Техническое вооружение горных предприятий Приморского края, занимающихся добычей строительных горных пород / Г. В. Секисов, А. Ю. Чебан // Горный информационно-аналитический бюллетень. — 2013. — № 11. — С. 283–287.
7. Чебан А. Ю. Анализ парка горных машин горнодобывающих предприятий Амурской области / А. Ю. Чебан, И. Ю. Рассказов, В. С. Литвинцев // Маркшейдерия и недропользование. — 2012. — № 2. — С. 41–50.
8. Адамов Е. И. Устройства, снижающие потери сыпучих грузов при перегрузке грейферными кранами / Е. И. Адамов, Н. С. Отделкин, С. Н. Сикарев // Вестник государственного университета морского и речного флота имени адмирала С. О. Макарова. — 2014. — № 6 (28). — С. 129–133.
9. Алексеев А. В. Анализ структуры современных складов сыпучих грузов / А. В. Алексеев // Наука и техника транспорта. — 2013. — № 3. — С. 84–87.
10. Пат. 2268225 Российская Федерация, МПК В 65 G 67/60. Устройство для погрузки сыпучих грузов в трюм судна / Тарасов Ю. Д.; заявитель и патентообладатель Санкт-Петербургский государственный горный институт им. Г. В. Плеханова (технический университет). — № 2004122606/11; заявл. 22.07.2004; опубл. 20.01.2006. Бюл. № 02.
11. Пат. 2329937 Российская Федерация, МПК В 65 G 67/02, 67/60, 63/00. Устройство для погрузки сыпучих грузов в трюмы судна / Тарасов Ю. Д.; заявитель и патентообладатель Государственное образовательное учреждение высшего профессионального образования Санкт-Петербургский государственный горный институт имени Г. В. Плеханова (технический университет). — № 2007107292/11; заявл. 26.02.2007; опубл. 27.07.2008. Бюл. № 21.
12. Заявка № 2015130257 от 21.07.2015. Способ погрузки сыпучих материалов в трюмы судна / Чебан А. Ю.

COMPLEX FOR HANDLING OF DRY BULK CONSTRUCTION MATERIALS IN WATER TRANSPORT

For overload of bulk construction materials dump in the water transport is usually created intermediate storage, equipped with specialized loading and ancillary equipment, employ additional staff, which greatly increases the cost of transportation. Improvement and optimization of transfer operations to reduce the cost of the work involved and the number of loading equipment and personnel for bulk cargo is an urgent task. The paper proposes a design handling system, allowing with minimum operating and capital costs to solve the problem of overload of bulk construction materials dump in the water transport means at a remote location production and mining businesses from waterways. Complex increases performance loading of bulk materials by conducting the process by two bunkers and silos of automation motion control in space, but also provides a high level of safety in the conduct of operations.

Key words: building materials, overload, quay wall, dump truck, boat, hold, cylinders, drive, hopper frame.

REFERENCES

1. Galin, Aleksandr Valentinovich. "Inland waterways of russian federation as part of country inland transport infrastructure." *Vestnik gosudarstvennogo universiteta morskogo i rechnogo flota imeni admirala S. O. Makarova* 1 (23) (2014): 120–124.

2. Zlobin, D. S., and Ju. N. Urtmintcev. "Substantiation of optimal parameters of «river-sea» vessels in modern operating conditions." *Science and Technology in Transport* 2 (2012): 40–46.
3. Filippova, D. A. "Balance scheme in sand cargo hydrotransport handling." *Vestnik gosudarstvennogo universiteta morskogo i rechnogo flota imeni admirala S. O. Makarova* 2 (24) (2014): 151–155.
4. Tarasov, Jurij Dmitrievich. "Overload of Bulk Cargoes from Cars-Dump-Body Trucks in Sailing Charter Means." *Mining Equipment and Electromechanics* 6 (2010): 15–21.
5. Cheban, Anton Jurevich, G. V. Sekisov, and N. P. Khrunina. "Structural analysis of the machinery and equipment fleet for construction rock mining in the southern part of the Far East Region." *Mining Industry Journal*. 4 (2013): 26–29.
6. Sekisov, Gennadij Valentinovich, and A. Ju. Cheban. "Technical equipment of the mining enterprises of the Primorsky territory, involved of production of construction rocks." *Mining informational and analytical bulletin (scientific and technical journal)* 11 (2013): 283–287.
7. Cheban, Anton Jurevich, I. Ju. Raskazov, and V. S. Litvintsev. "Analysis of the Amur region mining enterprises machinery park." *Markshejderija i nedropolzovanie* 2 (2012): 41–50.
8. Adamov, Evgenij Ivanovich, N. S. Otdelkin, and S. N. Sikarev. "Device reduces losses in bulk cargo reloading grabbing crane." *Vestnik gosudarstvennogo universiteta morskogo i rechnogo flota imeni admirala S. O. Makarova* 6 (28) (2014): 129–133.
9. Alekseev, Anton Vladimirovich. "Analysis of structure of modern warehouses of bulk cargo." *Science and Technology in Transport* 3 (2013): 84–87.
10. Tarasov Ju. D. Ustrojstvo dlja pogruzki sypuchih грузов v trjum sudna. Rossiiskaja Federacija, assignee. Patent 2268225. 22.07.2004.
11. Tarasov Ju. D. Ustrojstvo dlja pogruzki sypuchih грузов v trjum sudna. Rossiiskaja Federacija, assignee. Patent 2329937. 26.02.2007.
12. Cheban A. Ju. Sposob pogruzki sypuchih materialov v trjummy sudna. Zajavka № 2015130257. 21.07.2015.

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРЕ

Чебан Антон Юрьевич —
кандидат технических наук, доцент.
Федеральное государственное бюджетное
учреждение науки Институт горного дела
Дальневосточного отделения Российской
академии наук (ИГД ДВО РАН)
chebanay@mail.ru

INFORMATION ABOUT THE AUTHOR

Cheban Anton Yurievich —
Candidate of Engineering, associate professor.
Federal State budgetary institution of Science Mining
Institute of Far Eastern branch
of the Russian Academy of Sciences
(Mining Institute)
chebanay@mail.ru

УДК 639.2.052

**С. С. Мойсеенко,
А. Е. Мейлер**

МЕТОДИКА ОЦЕНКИ РИСКОВ АВАРИЙНОСТИ РЫБОЛОВНЫХ СУДОВ

Оценка и управление рисками в рыболовстве как специфическом виде мореплавания является в настоящее время актуальной проблемой. Эффективность работы рыболовного флота во многом зависит от качества управленческих решений, связанных с обеспечением безопасности мореплавания и ведения промысла. Особенность работы рыболовного флота и его транспортного обслуживания заключается в том, что все операции выполняются в условиях воздействия на них многих внутренних и внешних факторов. В статье, на основе анализа работы рыболовных судов, описаны причинно-следственные связи и «сценарии» возникновения аварийных ситуаций и промысловых происшествий, определены основные виды рисков. Представленная методика количественной оценки ожидаемого риска — его цены и допустимых значений, разработана на основе использования метода нечётких множеств (экспертных оценок) и теории вероятностей. В статье приведён практический пример реализации алгоритма расчёта прогностических оценок и цены риска. Предлагаемая методика была апробирована на практике и может быть рекомендована к внедрению в рыбопромысловых/судоходных компаниях.

Ключевые слова: рыболовные суда, «сценарий» аварии, оценка риска, причинно-следственные составляющие риска, цена риска.

В НАСТОЯЩЕЕ время проблема управления рисками и их оценка в различных областях, в частности, в мореплавании является актуальной, ей посвящены работы многих отечественных и зарубежных авторов. В частности, в работе [1] рассматриваются все аспекты рисков и безопасности в мореплавании: инженерные и эксплуатационные, требования безопасности, а также страхование и расследование несчастных случаев. Согласно исследованию [2], так называемые навигационные риски представляют собой совокупность вероятности возникновения отказа техники и последствий, которые это может вызвать. Человеческий фактор в мореплавании был исследован применительно к анализу рисков [3]. Анализ проблем обеспечения безопасности морских грузоперевозок, а также методы и модели оценки рисков приведены в работах [4], [5], где рассматриваются как организационные аспекты обеспечения безопасности в морских перевозках различных грузов, так и управление рисками.

Несмотря на большое количество публикаций по результатам исследований рисков в мореплавании и идентичные во многом подходы, можно утверждать, что в настоящее время отсутствует универсальное общепринятое определение риска. В частности, риск рассматривается [6] как комбинация вероятности возникновения нежелательного события и степени возможных последствий или условие, при котором возможно такое нежелательное событие и тяжесть его последствий. В случае определения безопасности как независимости от неприемлемого риска, её взаимосвязь с риском используется для описания степени независимости от опасности [1].

Международная морская организация ИМО [7] определяет риск, как *сочетание частоты и тяжести последствий*, т.е. формулируются две составляющие вероятности: вероятность возникновения и вероятность тяжести непредсказуемых или предсказуемых последствий. В п. 1.2.2.2 Международного кодекса по управлению безопасностью (МКУБ) отмечается следующее: «Цели управления безопасностью компании преследуют <...> установление защиты от всех выявленных рисков». Стандарт ISO8402:1995/BS 4778 определяет управление рисками, включающее также и оценку морского риска, следующим образом: «Процесс, посредством которого принимаются решения: допустим ли известный или оценённый риск и / или необходимо ли осуществить меры по сокращению вероятности возникновения риска и его последствий». Правила МКУБ [8] дают наиболее приемлемое определение риска для мореплавания и для большинства отраслей промышленности, а именно: «Сочетание вероятности или частоты возникновения определённой опасности и возможной величины негативных последствий».

В связи с ранее изложенным, важным моментом является оценка риска, его допустимых пределов, т. е. всесторонняя оценка вероятности и степени возможных последствий аварийных ситуаций для того, чтобы выбрать подходящие меры обеспечения безопасности [6]. Одним из способов, с помощью которых можно контролировать и минимизировать риски, является формальная оценка безопасности [9], которая определяется как «рациональный и систематический процесс оценки рисков, связанных с судоходством, и оценки издержек и выгод, связанных с сокращением рисков». Руководство по методологии применения FSA было утверждено ИМО в 2002 г. (MSC/Circ.1023/MEPC/Circ.392), с поправками согласно циркуляру MSC/Circ.1180-MEPC/Circ.474 and MSC-MEPC.2/Circ.5 [7]. Однако FSA имеет некоторые ограничения, главным из которых является то, что «издержки и выгоды», определённые по данной методологии, рассматриваются в частичном и очень общем виде [10]. Например, с точки зрения критерия эффективности затрат, методология FSA не рассматривает источник оплаты за устранение выявленного риска [11].

Приведённый в Правилах и руководстве по внедрению МКУБ [8] «оценитель риска» (*Risk Estimator*) даёт матричную (качественную) характеристику вероятности риска и его последствий. Однако наряду с такой оценкой, необходимо иметь и количественную, в частности, финансовую, оценку последствий, т. е. приемлемости риска. В настоящей статье данный вопрос рассматривается применительно к освоению биоресурсов Мирового океана, приводятся некоторые результаты исследований в области управления рисками, проводимых в БГАРФ КГТУ.

Требования к конструкции и оборудованию, с точки зрения обеспечения безопасности рыболовных судов и экипажей, приведены в Кодексе безопасности рыбаков и рыболовных судов [12].

Предполагается, что оценка рисков для таких судов должна проводиться в соответствии с ранее указанными нормативными документами. Однако рыболовство как вид мореплавания имеет специфическую проблему оценки рисков. Не случайно, в публикации [13] отмечается, что коммерческое рыболовство является одним из наименее безопасных видов деятельности, а вероятность полной потери судна и ожидаемое количество погибших членов экипажа обратно пропорциональны цене вылова рыбы. Данное объясняется особенностями процесса промысла и транспортировки сырья из районов промысла, который заключается в том, что все операции выполняются в условиях воздействия многих внутренних и внешних негативных факторов. В связи с этим задача оценки и управления рисками в рыболовстве является особенно актуальной.

Согласно модели вероятности аварии рыболовного судна в промысловых районах [14], средние суда имеют наиболее высокую вероятность возникновения несчастных случаев, в отличие от небольших судов, имеющих низкую вероятность. Предложенная вероятностная модель позволяет осуществлять количественную оценку безопасности в промышленном рыболовстве. Также можно отметить современный подход к разработанной политике безопасности в рыболовстве [15], предполагающий создание правовой базы — жизненно важного предварительного условия для осуществления мер, направленных на повышение безопасности рыболовных судов. Возникновение рисков в рыболовстве и управление ими являлось предметом недавних исследований учёных и специалистов стран Балтийского моря [16].

Несмотря на большое количество исследований по безопасности рыболовных судов, можно констатировать, что проблема оценки и управления рисками в рыболовстве разработана недостаточно и является актуальной. На основе анализа аварийности рыбопромысловых судов определены причинно-следственные связи возникновения аварийных ситуаций и промысловых происшествий. Разработаны методы расчёта уровня прогнозируемого риска при различных сочетаниях негативных факторов внешней и внутренней среды. Поскольку на сегодняшний день статистические данные об аварийности рыболовных судов недостаточно полно отражают условия и причины возникновения аварийных ситуаций (часто не приводятся данные о числе судов, работающих в рассматриваемом районе и сезоне года), рассчитать количественные оценки рисков, используя стандартные статистические методы, невозможно. Для случаев неполной статистической информации предложен метод расчёта рисков на основе использования метода нечётких множеств / экспертных оценок и теории вероятностей.

Рассмотрим возможный сценарий развития аварийных ситуаций. Из многообразия рисков, присущих работе флота на промысле и транспортировке грузов в порт, целесообразно выделить три основных группы:

- риски потери/гибели судов и груза;
- риски аварий и аварийных происшествий, не повлёкших потери судов и груза;
- риски отказа технических средств, обеспечивающих хранение, перевозку и сохранность грузов.

Был выполнен анализ большого числа аварий / аварийных происшествий рыболовных и транспортных судов [17], на основе которого можно сделать вывод о том, что в наиболее общем виде аварийные ситуации в процессе работы флота на промысле и транспортировки сырья / продукции развиваются по следующему «сценарию»: внешние или внутренние обстоятельства (ошибки оператора, гидрометеорологические условия, отказы судовой техники и т. п.) приводят к авариям (посадка на мель, столкновения и т. п.). Последствия возможны в виде повреждения корпуса судна, поломки судового оборудования, затопления отсеков, потери промыслового вооружения и т. п.

При определённых обстоятельствах (отсутствие необходимой информации о погоде, приближении урагана, цунами и т. д.) причиной возникновения аварийной ситуации (чрезвычайной ситуации — ЧС) являются тяжёлые погодные условия. Вследствие этого ошвартованные «борт-борт» суда (обычный режим совместной работы добывающего и транспортного судов) могут быть повреждены и даже конструктивно разрушены. Таким образом, указанные ранее обстоятельства

провоцируют риски возникновения ошибок, отказов техники и совместно с негативным влиянием природных факторов являются причиной аварий (столкновений, посадок на мель, потерей груза и даже судна и экипажа). Ранее приведённый «сценарий» развития ЧС и аварий рыболовных и транспортных судов при выполнении грузовых операций и транспортировке можно использовать как общую модель при расчёте риска возникновения аварийных ЧС в процессе работы рыболовных судов на промысле и транспортного обслуживания рыболовного флота [17], [18].

Учитывая возможный описанный ранее «сценарий», важной задачей является оценка риска аварий рыболовных судов и промысловых происшествий в рыболовстве. Промысловые происшествия — это, прежде всего, потери орудий лова, связанные с такими провоцирующими причинами, как отказ технических средств, ошибки операторов промысловых судов при управлении процессами лова, гидрометеорологические условия и др. Отказ технических средств, например, гидроакустической станции, может явиться причиной зацепов и потери трала при работе на тяжёлых (например, скалистых) грунтах. Отказ траловой лебёдки также может стать причиной повреждения орудий лова, так как оператор не сможет управлять процессом движения трала (горизонт траления, изменение горизонта движения трала при обнаружении подводных препятствий и т. д.). Ошибки оператора, прежде всего, связаны с неверной оценкой ситуации, особенно при работе в группе судов, и, соответственно, неверным выбором манёвра. Ошибки оператора — это и недооценка степени влияния гидрометеорологических условий на процесс лова. Так, при угрозе шквалистых порывов ветра существует риск потери остойчивости судна при подъёме орудий лова (например, кошелькового невода) а также опрокидывания судна, следующего на попутном волнении [5].

Оценка риска аварий / промысловых происшествий может быть выполнена *методом экспертных оценок и методами теории вероятностей*. При этом для использования строгих математических методов необходимо иметь представительную статистическую базу, т. е. большой объем выборки данных по аварийности и промысловым происшествиям. Причём, эти данные должны быть сгруппированы по типам судов, районам промысла, видам аварий / происшествий, орудиям лова, причинам и последствиям, времени года / сезонам. Однако такой статистической базы, должным образом систематизированной, на сегодняшний день не существует. В связи с недостатком статистических данных по промысловым происшествиям и авариям рыболовных судов при ведении промысла можно применить *метод экспертных оценок с использованием теории нечётких множеств*.

Рассмотрим наиболее часто встречающиеся на практике аварийные ситуации и методы оценки риска негативных последствий. Предположим, что в районе промысла работает группа рыболовных судов. Необходима оценка риска возникновения аварийной ситуации в этом случае. В процессе тралового лова в группе судов возможно появление трёх независимых событий, появление которых может создать аварийную ситуацию и явиться причиной аварии / промыслового происшествия: первое (A_1) — отказ гидроакустической станции; второе (A_2) — ошибка оператора; третье (A_3) — ошибка оператора другого судна. Требуется найти вероятностную оценку риска аварии / промыслового происшествия.

Алгоритм решения данной задачи содержит несколько этапов.

Первый этап — определение экспертных оценок вероятности того, что в течение процесса лова ни одно из событий: A_1 , A_2 , A_3 , не реализуется. Эксперты называют минимальные и максимальные значения вероятностей. Далее расчет выполняется по формулам [19]:

$$P_i^{\text{exp}} = (P_i^{\text{min}} + 4P_i^{\text{mp}} + P_i^{\text{max}})/6, \quad (1)$$

где P_i^{exp} — априорная вероятность ожидания i -го отказа; P_i^{min} — минимальное значение вероятности i -го отказа; P_i^{mp} — наиболее вероятная величина вероятности i -го отказа; P_i^{max} — максимальное значение вероятности i -го отказа;

$$P_i^{\text{mp}} = (2P_i^{\text{min}} + P_i^{\text{max}})/3. \quad (2)$$

Дисперсия рассчитывается по формуле

$$\delta^2 = [(P_i^{\min} - P_i^{\max})/6]^2. \quad (3)$$

Предположим, что в результате расчётов были определены априорные вероятности появления событий $P(A_1)$, $P(A_2)$, $P(A_3)$, которые равны, соответственно, 0,95; 0,90; 0,85.

На втором этапе по формуле умножения вероятностей [19] рассчитывается вероятность того, что ни одно из независимых событий A_i не появится:

$$P(A_1 A_2 A_3) = P(A_1) \cdot P(A_2) \cdot P(A_3) = 0,95 \cdot 0,90 \cdot 0,85 = 0,727. \quad (4)$$

Вероятность того, что событие i появится, соответственно, равна: $1 - 0,95 = 0,05$; $1 - 0,90 = 0,10$; $1 - 0,85 = 0,15$. Тогда вероятность того, что в процессе лова (например, траления) могут появиться все три события, которые могут явиться причиной аварии, т. е. вероятность / риск возникновения аварийной ситуации при тралении в группе судов равна: $P(A) = 0,05 \cdot 0,10 \cdot 0,15 = 0,00075$.

Анализ решения практических задач такого типа показывает, что, как правило, вероятность совместного наступления указанных событий мала, но в условиях работы судов в осенне-зимний период на небольших промысловых акваториях и при большом скоплении судов вероятность наступления аварийной ситуации резко возрастает. Например, при работе флота в районе Антарктиды в зимний период при априорных вероятностях 0,85; 0,75; 0,7, согласно оценке экспертов, хорошо знающих этот район промысла, вероятность риска аварии / промыслового происшествия возрастает до 0,011. Пренебрегать таким уровнем риска становится уже опасно.

Рассмотрим оценку риска аварий / промысловых происшествий в случае совместного появления двух и более зависимых событий. Определим событие B_i как причину i -го ущерба, причиненного рыболовному судну / орудиям лова / окружающей среде (загрязнение моря). Риск при ведении промысла можно оценить математическим ожиданием ущерба от возможной аварии. Цена риска рассчитывается по формулам [20]:

$$R = M(w), \quad (5)$$

где $M(w)$ — функция ущерба.

Составляющие риска промысловых аварий или причинения вреда судну можно представить следующим выражением:

$$R = M(w) = \sum P(B_i) \cdot w_i, \quad (6)$$

где $\sum P(B_i)$ — вероятность события B_i ; w_i — предполагаемая сумма ущерба.

Рассмотрим методы оценки риска аварий R_A . С этой целью определим событие причинения i -го вида ущерба судну / орудиям лова при аварии B_i :

$$B_i = A \cap C_i, \quad (7)$$

где A — событие (авария/промысловое происшествие); C_i — событие (реализация аварии / промыслового происшествия по i -му сценарию).

Так как A и C_i — совместные события, вероятность события, связанного с причинением ущерба судну при аварии, определяется [19], в виде

$$P(B_i) = P(A \cap C_i) = P(A)P(C_i|A). \quad (8)$$

Подставив выражение (8) в выражение (6), получим

$$R_A = \sum P(A)P(C_i|A)w_i, \quad (9)$$

где $P(A)$ — причины возникновения риска аварии R_A ; $P(C_i|A)w_i$ — ожидаемые последствия аварии.

Оценка причинно-следственных составляющих риска выполняется с использованием статистических методов, методов нечётких множеств и экспертных оценок, имитационных методов моделирования аварийных ситуаций / сценариев. Оценка ожидаемых последствий аварий / промысловых происшествий с рыболовными судами базируется в основном на анализе дерева событий с использованием математического аппарата [19], [21].

Рассмотрим пример практической реализации метода. Рейс рыбопромыслового судна проходит в различных гидрометеорологических условиях. В частности, 50 % времени рейса судно работает в хороших погодных условиях, 30 % времени — в условиях плохой погоды, но работать на промысле можно, 20 % времени судно работает, а чаще не работает в тяжёлых погодных условиях. По оценкам экспертов, рассчитаны априорные вероятности (формулы (1) – (3)) безаварийной работы в условиях хорошей, плохой и тяжёлой погоды, которые равны, соответственно, 0,98; 0,95; 0,80. Необходимо определить вероятность того, что рейс закончится без аварий и промысловых происшествий.

Введём обозначения: A – событие, означающее успешное завершение рейса; B_1, B_2, B_3 — события, означающие работу судна в разных условиях. Тогда $P(B_1) = 0,50$; $P(B_2) = 0,30$; $P(B_3) = 0,20$. Поскольку событие A наступает при условии появления одного из событий B_1, B_2, B_3 , которые образуют полную группу несовместных событий, вероятность события A равна сумме произведения вероятностей каждого события на условную вероятность, соответственно, событий B_1, B_2, B_3 :

$$P(A) = \sum_{i=1}^n P(B_i)P(A|B_i). \quad (10)$$

Имеем следующие условные вероятности: $P(A|B_1) = 0,98$; $P(A|B_2) = 0,95$; $P(A|B_3) = 0,87$. По формуле (10) рассчитаем вероятность того, что рейс будет выполнен без аварий и промысловых происшествий: $P(A) = 0,5 \cdot 0,98 + 0,3 \cdot 0,95 + 0,2 \cdot 0,87 = 0,949$. Итак, вероятность благоприятного исхода рейса рыбопромыслового судна равна 0,949, а вероятность аварии или промыслового происшествия — $(1 - 0,949) = 0,051$. Таким образом, в случае аварии или промыслового происшествия при величине ущерба, например, 5 000 000 руб., цена риска составит $0,051 \cdot 5\,000\,000 = 255\,000$ руб., что является, в частности, для среднего рыбопромыслового траулера не столь значительной суммой по сравнению с получаемой прибылью.

Представляется важным провести интегральную оценку риска в рыболовстве, которая может быть представлена в следующем виде:

- как сумма вероятностей возникновения аварий на каждом этапе промысловой работы рыбопромыслового судна;
- как средневзвешенная вероятность риска возникновения аварии;
- как средневзвешенная цена риска аварии;
- как сумма цены риска по каждому этапу промысловой работы судна.

Теоретические основы формирования интегральной оценки риска представлены в работах [19], [21], [22].

Алгоритм комплексной оценки риска можно представить в виде ряда последовательных этапов.

1. Определение вероятности отказа по статистическим данным или экспертным оценкам (мини-макс).
2. Определение весовых оценок на режиме отказа j -го типа / условий, вызвавших аварийные случаи.
3. Оценка условной вероятности события B_i (аварии i -го типа). Расчёт выполняется для всех режимов — j , маршрутов — i и вариантов транспортировки — l .
4. Определение значений максимальной вероятности того, какие типы отказов / условий, скорее всего, приведут к событию B_i (аварии i -го типа).
5. Проведение интегральной оценки аварийной ситуации или вероятности события B_i . (Интегральная оценка $P(B_i|A_{ijl})$ рассчитывается в соответствии с законом сложения вероятностей).
6. Вычисление средней стоимости риска в виде суммы произведений взвешенных оценок j -го типа отказа и i -го типа повреждения в районе промысла l , определяемая путём умножения вероятности возникновения аварии на сумму ущерба от нее.
7. Сравнение расчётной стоимости риска с допустимым значением риска. Риск может быть признан приемлемым, если нет жертв и стоимость риска меньше, чем ожидаемая коммерческая прибыль.

Выводы

1. Методика оценки рисков в океаническом рыболовстве строится на основе использования общей модели сценария развития аварийных ситуаций, теории нечётких множеств и экспертных оценок. При расчёте оценок риска необходимо учитывать причинно-следственные связи в логике: «обстоятельства/условия — причины — следствия».

2. Предложенная методика оценки рисков включает как методы расчёта вероятностных оценок рисков в океаническом рыболовстве, так и расчёты цены риска, т. е. ожидаемой величины ущерба судну, грузу, окружающей среде в случае, если ситуация риска будет реализована (произойдёт авария).

3. Уровень допустимого риска определяется путем сравнения цены риска с величиной ожидаемой прибыли, которую получит судовладелец при выполнении рейса. В случае, если величина ожидаемой прибыли выше цены риска, то такой риск можно считать допустимым (предполагается, что угрозы для жизни людей нет).

4. Методика оценки рисков была апробирована одним из авторов статьи (капитаном С. С. Мойсеенко) на практике и дала положительные результаты, что позволяет рекомендовать ее к внедрению в рыбопромысловых / судоходных компаниях для использования в системе управления безопасностью / рисками при освоении биоресурсов Мирового океана и транспортировке сырья.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Kristiansen S. Maritime transportation: Safety management and risk analysis / S. Kristiansen // Elsevier. — 2010. — P. 528.
2. Gucma M. Combination of processing methods for various simulation data sets / M. Gucma // TransNav. — 2008. — № 2(1). — P. 11–15.
3. Kobyliński L. Risk analysis and human factor in prevention of CRG casualties / L. Kobyliński // TransNav. — 2009. — № 3 (4). — P. 443–448.
4. Кириченко А. В. Организационно-технические основы безопасности судов и портовых средств. / А. В. Кириченко, С. В. Латухов, В. А. Никитин, О. А. Ражев. — СПб: Изд-во ГУМРФ им. адм. С. О. Макарова, 2014. — 368 с.
5. Мойсеенко С. С. Безопасность морских грузоперевозок / С. С. Мойсеенко, Л. Е. Мейлер. — Калининград: Изд-во БГАРФ, 2011. — 398 с.
6. Yin J. Quantitative Risk Assessment for Maritime Safety Management / PhD thesis. Hong Kong Polytechnic University. — 2011. <http://repository.lib.polyu.edu.hk/jspui/bitstream/10397/4317/2/b24415613_ir.pdf>.
7. International Maritime Organization. <<http://www.imo.org>>.
8. International Safety Management. Code and Guidelines on Implementation of the ISM Code. — London: IMO, 2012.
9. Formal Safety Assessment. <<http://www.imo.org/en/OurWork/Safety/SafetyTopics/Pages/FormalSafetyAssessment.aspx>>.
10. Karahalios, H. A risk appraisal system regarding the implementation of maritime regulations by a ship operator / H. Karahalios, Z. L. Yang, J. Wang // Maritime Policy & Management. — 2015. — Vol. 42. — No. 4. — P. 389–413.
11. Vanem E. Cost-effectiveness criteria for marine oil spill preventive measures / E. Vanem, O. Endersen, R. Skjong // Reliability Engineering & System Safety. — 2008. — Vol. 93. — P. 1354–1368.
12. Code of Safety for Fishermen and Fishing Vessels. — London: IMO, 2006.
13. Jin D. The safety of commercial fishing: determinants of vessel total losses and injuries / D. Jin, H. L. Kite-Powell, W. K. Talley // Journal of Safety Research. — 2001. — № 32 (2). — P. 209–228.
14. Jin D. A model of fishing vessel accident probability / D. Jin, H. L. Kite-Powell, E. Thunberg [etc.] // Journal of Safety Research. — 2002. — № 33. — P. 497–510.
15. Perez-Labajos C. Fishing safety policy and research / C. Perez-Labajos // Marine Policy. — 2008. — № 32. — P. 40–45.
16. Final Report of Flagship Project. To lay the groundwork for developing a plan to reduce the number of accidents in fisheries // EU strategy for the Baltic Sea region. Baltic Sea Advisory Council. — 2014. — P. 20. <<http://www.bsac.dk/archive/Dokumenter/Flagship%20Project/BSAC%20Safety%20Report%20FINAL.pdf>>.

17. *Мойсеенко С. С.* Анализ проблемы оценки рисков в промышленном рыболовстве / С. С. Мойсеенко, Л. Е. Мейлер, В. А. Бондарев [и др.] // Материалы II Балтийского морского форума. — Светлогорск, 26 – 30 мая. — 2014. — С. 76–83.
18. *Мойсеенко С. С.* Дифференциально-интегральный подход моделированию процессов развития аварийных ситуаций в мореплавании и океаническом рыболовстве / С. С. Мойсеенко, В. П. Скрыпник, О. Г. Фаустова // Вестник Государственного университета морского и речного флота имени адмирала С. О. Макарова. — 2014. — Вып. 4 (26). — С. 47–53.
19. *Вентцель Е. С.* Теория вероятностей / Е. С. Вентцель, Л. А. Овчаров. — М.: Наука, 1973. — 496 с.
20. *Топалов В. П.* Риски в судоходстве / В. П. Топалов, В. Г. Торский. — Одесса: Астропринт, 2007. — 368 с.
21. *Абчук В. А.* Теория риска в морской практике / В. А. Абчук. — Л.: Судостроение, 1983. — 152 с.
22. *Мойсеенко С. С.* Формирование интегральной оценки рисков возникновения ЧС в мультимодальных грузоперевозках / С. С. Мойсеенко, Л. Е. Мейлер, О. Г. Фаустова // Материалы I Балтийского морского форума. — Светлогорск, 28 – 31 мая. — 2013. — С. 265–270.

A METHOD OF RISKS ASSESSMENT FOR THE FISHING VESSELS ACCIDENCE

Risk assessment and management in fisheries, as a specific form of navigation, is now an actual problem. The efficiency of the fishing fleet is largely dependent on the quality of management decisions related to the safety of navigation and fishing. The feature of the fishing fleet activity and its transport service is that all operations are carried out in conditions of an impact of many internal and external factors.

The article describes cause-and-effect relationships of accidents of fishing vessels given on the base of an analysis of emergencies (fishing occurrences) and main types of risks in fishery are defined also. The presented method of the quantitative assessment of the predicted risk – its price and acceptable values is elaborated using of the method of fuzzy sets (expert estimates) and the theory of probability.

The article gives a practical example of realization of the algorithm for calculating the prognostic estimates and the price of the risk. The proposed method has been tested in marine practice and can be recommended for implementation in fisheries / shipping companies.

Key words: fishing vessels, accident scenario, risk assessment, cause-and-effect components of the risk, costs of the risk.

REFERENCES

1. Kristiansen, Svein. *Maritime transportation: Safety management and risk analysis*. Elsevier, 2010.
2. Gucma, Maciej. "Combination of processing methods for various simulation data sets." *TransNav*. 2.1 (2008): 11-15.
3. Kobyliński, Lech. "Risk analysis and human factor in prevention of CRG casualties." *TransNav*. 3.4 (2009): 443-448.
4. Kirichenko, Alexander, et al. *Organizational and technical foundations of ships and port facilities security*. S.-Petersburg: GUMRF imeni admiral S.O. Makarov Publ. House, 2014. (in Russian).
5. Moyseenko, Sergey, and Leonid Meyler. *Safety of marine cargo transportation*. Kaliningrad: BFFSA Publ. House, 2011. (in Russian).
6. Yin, Jingbo. "Quantitative Risk Assessment for Maritime Safety Management." PhD thesis. Hong Kong Polytechnic University, 2011. Web. <http://repository.lib.polyu.edu.hk/jspui/bitstream/10397/4317/2/b24415613_ir.pdf>
7. IMO. Web. <http://www.imo.org>
8. *ISM Code and Guidelines on Implementation of the ISM Code*. London: IMO, 2012.
9. FSA. Web. <<http://www.imo.org/en/OurWork/Safety/SafetyTopics/Pages/FormalSafetyAssessment.aspx>>
10. Karahalios, Hristos, Zaili Yang, and Jin Wang "A risk appraisal system regarding the implementation of maritime regulations by a ship operator." *Maritime Policy & Management*. 42.4(2015): 389-413.
11. Vanem, Erik, Oyvind Endersen, and Rolf Skjong. "Cost-effectiveness criteria for marine oil spill preventive measures." *Reliability Engineering & System Safety*. 93 (2008): 1354-1368.

12. *Code of Safety for Fishermen and Fishing Vessels*, London: IMO, 2006.
13. Jin, D., Hauke Kite-Powell, and Wayne Talley. "The safety of commercial fishing: determinants of vessel total losses and injuries." *Journal of Safety Research* 32.2 (2001): 209-228.
14. Jin, D., Hauke Kite-Powell, Erik Thunberg, Andrew Solow, and Wayne Talley. "A model of fishing vessel accident probability." *Journal of Safety Research*. 33(2002): 497-510.
15. Perez-Labajos, Carlos. "Fishing safety policy and research." *Marine Policy*. 32 (2008): 40-45.
16. Final Report of Flagship Project, EU strategy for the Baltic Sea region. "To lay the groundwork for developing a plan to reduce the number of accidents in fisheries." 2014, BSAC. Web. <<http://www.bsac.dk/archive/Dokumenter/Flagship%20Project/BSAC%20Safety%20Report%20FINAL.pdf>>.
17. Moyseenko, Sergey, Leonid Meyler, Vitaly Bondarev, and Oksana Faustova. "Analysis of the problem of risk assessment in commercial fishing." *Proc. XI Baltic Maritime Forum, Swetlogorsk, 26–30 May 2014*. Kaliningrad: BFFSA Publ. House, 2014. 76 – 83. Print. (in Russian).
18. Moyseenko, Sergey, Vladimir Skrypnik, and Oksana Faustova. "Differential-integral approach to the modeling of the development of emergency situations in shipping and oceanic fisheries." *Vestnik Gosudarstvennogo universiteta morskogo i rechnogo flota imeni admirala S. O. Makarova* 4(26) (2014): 47-53. (in Russian).
19. Ventzel, Elena, and Lev Owcharov. *Theory of probability*. Moscow: Nauka, 1973. (in Russian).
20. Topalov, Valeriy, and Vladimir Torskiy. *Risks in Shipping*. Odessa: Astroprint, 2007. (in Russian).
21. Abchuk, Vladimir. *Risk theory in the marine practice*. Leningrad: Sudostroenie, 1983. (in Russian).
22. Moyseenko, Sergey, Leonid Meyler, and Oksana Faustova. "Formation of the integrated risk assessment of a disaster in multimodal cargo transportation." *Proc. X Baltic Maritime Forum. Swetlogorsk, 28–31 May 2013*. Kaliningrad: BFFSA Publ. House, 2013. 265 – 270. Print. (in Russian).

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

Мойсеенко Сергей Сергеевич —
доктор педагогических наук, кандидат
технических наук, профессор.
Балтийская государственная академия
рыбопромышленного флота Калининградского
государственного технического университета
(БГАРФ КГТУ)
moiseenkoss@rambler.ru
Мейлер Леонид Ефимович —
кандидат технических наук, доцент.
Балтийская государственная академия
рыбопромышленного флота Калининградского
государственного технического университета
(БГАРФ КГТУ)
transport@bga.gazinter.net

INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Moiseenko Sergey Sergeevich —
Doctor of pedagogical sciences,
Candidate of Engineering, professor.
Baltic Fishing Fleet State Academy
of the Kaliningrad State Technical University
(BFFSA KSTU)
moiseenkoss@rambler.ru
Meyler Leonid Efimovich —
Candidate of Engineering,
associate professor.
Baltic Fishing Fleet State Academy
of the Kaliningrad State Technical University
(BFFSA KSTU)
transport@bga.gazinter.net

УДК 681.3: 656.62

**Д. А. Акмайкин,
С. Ф. Ключева,
П. А. Салюк**

ЭВРИСТИЧЕСКИЙ ПОИСК ОПТИМАЛЬНОГО МАРШРУТА СУДНА ПО СЕВЕРНОМУ МОРСКОМУ ПУТИ

В работе рассматриваются вопросы оценки поиска оптимальных маршрутов судов с точки зрения затрат времени на переход, экономичности маршрута и его безопасности. Приведен анализ построения оптимального маршрута судна на основе приближенных алгоритмов и эвристической оценочной функции. В результате проведенного исследования был разработан и программным образом реализован эвристический алгоритм A2015. Работоспособность алгоритма показана на примере формирования оптимально-

го маршрута судна для трассы Северного морского пути. Выполнена формализация постановки задачи. В работе представлена пошаговая реализация разработанного эвристического алгоритма построения оптимального маршрута судна. Представленная в статье программная реализация алгоритма A2015 включает сравнение его с классическими алгоритмами Дейкстры и Флойда-Уоршелла. Представленный алгоритм позволяет в некоторых случаях на порядок быстрее сформировать оптимальный маршрут судна для трассы морского пути в сравнении с классическими алгоритмами поиска пути на графе. Такой подход позволяет значительно сократить объем всех возможных вычислений и быстро получать возможные решения для оперативного анализа обстановки в заданном районе плавания.

Ключевые слова: граф, кратчайший путь, оптимальный маршрут, эвристический алгоритм, алгоритм Флойда, оптимизация поиска пути, вектор оценок, безопасность мореплавания.

П РАБОТКА маршрута в соответствии с международными требованиями начинается с составления плана перехода от причала до причала на основе имеющейся информации. Классически маршрут формируется вдоль рекомендованных морских путей, которые разработаны на основе многолетнего опыта мореплавания и среднестатистических данных о распределении гидрометеорологических явлений по сезонам [1] – [7]. В настоящее время для автоматизированного поиска оптимального маршрута судна используются алгоритмы, основанные на теории графов.

Решение задач построения оптимального маршрута судна на основе теории графов в отличие от традиционных задач поиска кратчайших путей на графе имеет некоторые особенности. К таким особенностям относятся динамическое изменение характеристик взаимосвязей между вершинами графа [8], [9], необходимость учета гидрометеорологических факторов в процессе движения судна, изменение масштабности графов для разных судов в одной акватории и для одного судна при разных условиях загрузки, а также учет иных факторов, влияющих на безопасность мореплавания [3] – [6].

Задача поиска кратчайших путей для динамических и масштабных графов на основе точных алгоритмов не реализуется за полиномиальное время. Поэтому для решения подобных задач актуальным является поиск наиболее быстрых и эффективных методов и алгоритмов. Наиболее простыми являются методы, реализуемые на основе приближенных алгоритмов из класса NP-полных задач [9], [10], однако данные алгоритмы не всегда позволяют получить требуемое решение, и число повторных поисков может оказаться значительным по объему операций. Более гибко работают *эвристические алгоритмы* позволяющие, не просматривая все варианты решений, сразу проложить трассу по кратчайшему пути к целевой вершине. Использование эвристической информации основано на применении оценочной функции, которая представляет собой меру, оценивающую перспективность раскрытия вершины [11], [12].

Цель данной работы состоит в разработке алгоритма эвристического поиска оптимального маршрута, основанного на использовании графа и оценочной функции, и апробации данного алгоритма на трассе Северного морского пути (СМП). Современные климатические изменения оказывают влияние на рост судоходства по СМП, который имеет огромное значение для развития перевозки как российских грузов, так и транзитных грузов других государств между Атлантическим и Тихим океанами. Перевозка по трассам СМП несмотря на особые климатические условия, зачастую короче по дистанции, быстрее по времени, и что немаловажно в настоящее время, абсолютно безопасна с точки зрения пиратских нападений.

Одной из основных проблем при движении по СМП является наличие льдов. В официальных документах, регламентирующих судоходство во льдах, указано, что выбор наиболее благоприятного варианта движения соотносится с наличием информации (текущей и прогностической), состоянием судна (судов в караване), а также другими объективными и субъективными факторами. Для выбора пути используются следующие критерии:

– минимум расчетных затрат времени перехода благодаря движению по кратчайшему расстоянию в легких ледовых условиях в обход зон тяжелого льда и мелководья;

– положение портов (пунктов), между которыми осуществляется плавание.

Таким образом, для каждой декады определяется наилегчайший путь, который отражает особенности распределения льда именно в эту декаду данного месяца и года.

Исходя из данных условий и требований, предлагается рассмотреть трассу Северного морского пути и особенности реализации предлагаемого эвристического алгоритма построения кратчайших путей (рис. 1).

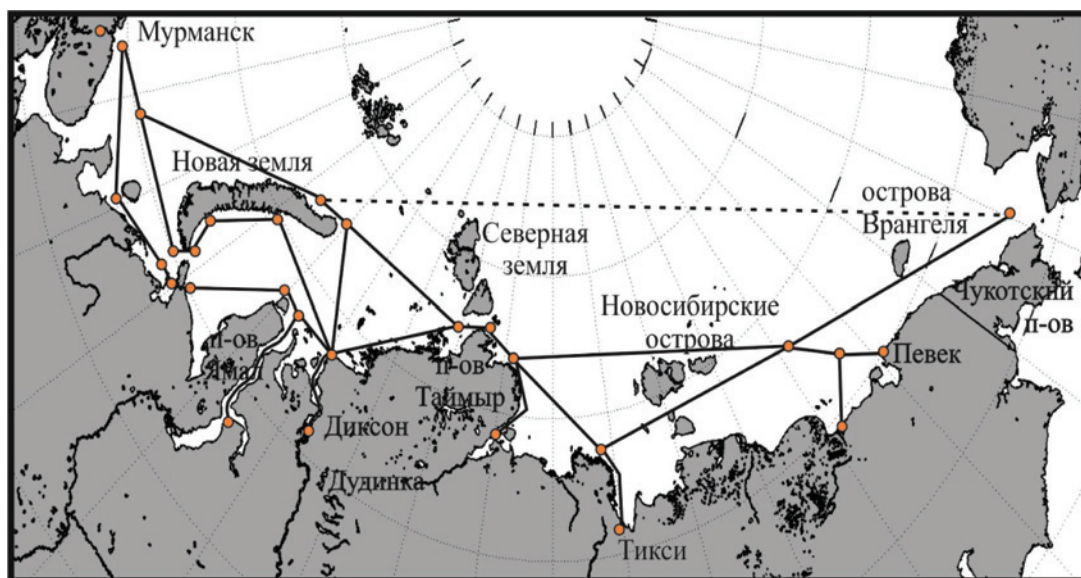


Рис. 1. Трасса Северного морского пути

Возможные варианты движения по СМП представлены в виде графа $G = (V, E)$, где $V = \{v_1, \dots, v_n\}$ — множество всех вершин графа, которые являются портами (пунктами) либо точками поворота; $E = \{e_1, \dots, e_m\}$ — множество всех ребер графа (рис. 2). Каждому элементу e_l , $l = \{1, \dots, m\}$ множества E поставлена в соответствие упорядоченная пара вершин $(v_i, v_j) \in E$, и вес ребра w_{ij} — некоторое неотрицательное значение, зависящее от времени перехода между смежными вершинами графа с учетом ледовой обстановки, глубины и течений. Ребро (v_{13}, v_{14}) обозначено пунктиром, так как этот отрезок СМП сезонный (динамическое ребро).

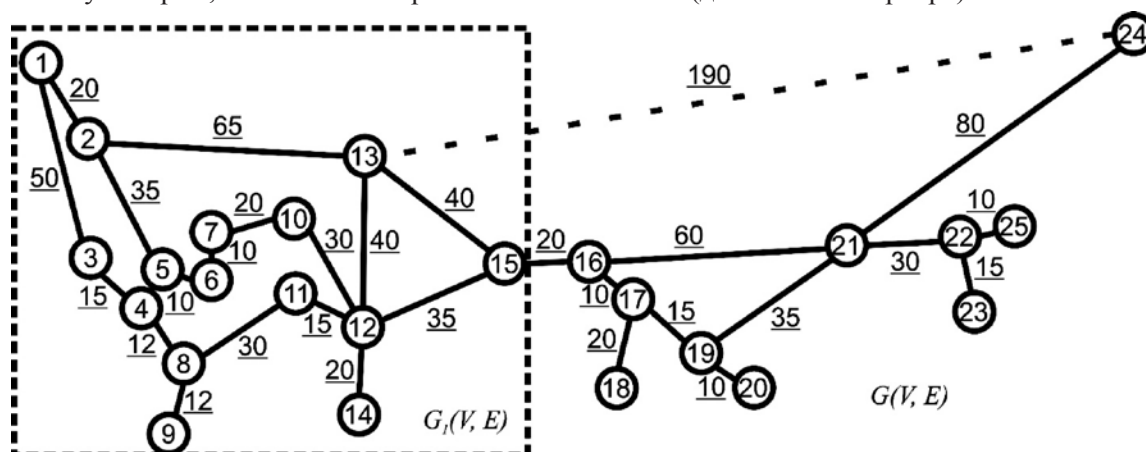


Рис. 2. Граф трассы Северного морского пути

Матрица весов $W = (w_{ij})$, в разрабатываемом алгоритме построена стандартным образом. В случае, если не существует прямого пути из вершины v_i в вершину v_j , то соответствующий вес приравнивается к бесконечности:

$$W = \begin{cases} 0, \text{если } i = j \\ w_{i,j}, \text{если } (v_i, v_j) \in E, i \neq j \\ \infty, \text{если } (v_i, v_j) \notin E, i \neq j \end{cases} \quad (1)$$

Для быстрого поиска оптимального пути в графе предлагается использовать эвристический алгоритм A2015. В этом алгоритме совместно с исходной матрицей весов W используется вектор оценок $Est(V)$. Элементы вектора равны сумме числа промежуточных вершин $d(V)$, отличных от нуля и бесконечно больших значений «Inf» для выбранной строки таблицы и некоторого индекса index, пропорционального суммарному весу ребер между промежуточными вершинами:

$$Est(V) = d(V) + \text{index}. \quad (2)$$

Эвристический алгоритм A2015 поиска кратчайших путей включает следующие шаги.

Шаг 1. Задать целевую вершину v_b и начальную вершину v_a .

Шаг 2. Задать вектор путей $Rt(V)$, с количеством элементов равному количеству вершин графа. Первый элемент равен номеру целевой вершины, последний — номеру начальной вершины, остальные не заданы.

Шаг 3. Номер строки i матрицы весов положить равным номеру целевой вершины v_b .

Шаг 4. Проверить для строки i выполнение условия $P(v_{i,a})$ для начальной вершины v_a :

$$P(v_{i,a}) = \begin{cases} 1, \text{если } w_{i,a} \neq 0, w_{i,a} \neq \infty \\ 0, \text{если } w_{i,a} = 0, \text{или } w_{i,a} = \infty \end{cases} \quad (3)$$

Если $P(v_{i,a}) = 1$, то условие выполнено, путь найден, перейти на шаг 9.

Если $P(v_{i,a}) = 0$, то условие не выполнено, перейти на шаг 5.

Шаг 5. Просматриваются по порядку веса w_{ij} в строке i и выбирается номер q элемента строки (соответственно номер вершины), которому соответствует наименьшее значение вектора оценок. Номер полученной вершины q внести в вектор путей $Rt(v)$, т. е. в первую по порядку не заданную позицию.

Шаг 6. Исключить из дальнейшего выбора элементы столбца с индексом, равным i .

Шаг 7. По номеру выбранной вершины q перейти к строке $i = q$.

Шаг 8. Вернуться к шагу 4.

Шаг 9. Вычислить суммарный вес ребер найденного пути.

Пример результата работы алгоритма для подграфа $G_1(V_1, E_1)$ графа $G = (V, E)$ приведен на рис. 3. Подграф G_1 получен из G путем оставления первых пятнадцати вершин и ребер.

Matrix weight		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15
1	:	0	20	50	Inf	Inf	Inf	Inf	Inf	Inf	Inf	Inf	Inf	Inf	Inf	Inf
2	:	20	0	Inf	Inf	35	Inf	Inf	Inf	Inf	Inf	Inf	Inf	Inf	65	Inf
3	:	50	Inf	0	15	Inf	Inf	Inf	Inf	Inf	Inf	Inf	Inf	Inf	Inf	Inf
4	:	Inf	Inf	15	0	Inf	Inf	Inf	12	Inf	Inf	Inf	Inf	Inf	Inf	Inf
5	:	Inf	35	Inf	Inf	0	10	Inf	Inf	Inf	Inf	Inf	Inf	Inf	Inf	Inf
6	:	Inf	Inf	Inf	Inf	10	0	10	Inf	Inf	Inf	Inf	Inf	Inf	Inf	Inf
7	:	Inf	Inf	Inf	Inf	Inf	10	0	Inf	Inf	20	Inf	Inf	Inf	Inf	Inf
8	:	Inf	Inf	Inf	12	Inf	Inf	Inf	0	12	Inf	30	Inf	Inf	Inf	Inf
9	:	Inf	Inf	Inf	Inf	Inf	Inf	Inf	12	0	Inf	Inf	Inf	Inf	Inf	Inf
10	:	Inf	Inf	Inf	Inf	Inf	Inf	20	Inf	Inf	0	Inf	30	Inf	Inf	Inf
11	:	Inf	Inf	Inf	Inf	Inf	Inf	30	Inf	Inf	0	15	Inf	Inf	Inf	Inf
12	:	Inf	Inf	Inf	Inf	Inf	Inf	Inf	Inf	30	15	0	40	20	35	Inf
13	:	Inf	65	Inf	Inf	Inf	Inf	Inf	Inf	Inf	Inf	40	0	Inf	40	Inf
14	:	Inf	Inf	Inf	Inf	Inf	Inf	Inf	Inf	Inf	Inf	20	Inf	0	Inf	Inf
15	:	Inf	Inf	Inf	Inf	Inf	Inf	Inf	Inf	Inf	Inf	35	40	Inf	0	Inf

Est[]	13	3	4	8	7	6	5	4	5	6	4	4	2	7	2
purp 1-->15															
Route	1	2					13		15						
weight u(1,15)=							125								
purp 1-->13															
Route	1	2					13								
weight u(1,13)=							85								
purp 1-->11															
Route	1		3					8			11				
weight u(1,11)=			107												
purp 1-->10															
Route	1		2					6		7		10			
weight u(1,10)=			95												
purp 1-->8															
Route	1			3					8						
weight u(1,8)=				77											

Рис. 3. Вывод результатов работы программы поиска кратчайших путей по алгоритму A2015

В качестве начальной вершины v_a выбрана первая вершина, в качестве целевой вершины v_b выбраны вершины с номерами: $v_{15}, v_{13}, v_{11}, v_{10}, v_8$. Матрица весов «Matrix weight» представляет собой исходную матрицу весов W для графа G_1 . Для каждого маршрута «ригп 1--> v_b » приведен вектор путей Rt и « $w(v_a, v_b)$ » — суммарный вес.

Для анализа эффективности работы алгоритма A2015 проведено его сравнение с алгоритмами Флойда-Уоршелла и Дейкстры. Алгоритм Флойда-Уоршелла выбран в связи с тем, что он позволяет находить оптимальные пути между всеми вершинами графа, у которого все ребра с неотрицательным весом за один цикл работы. Для алгоритма Флойда-Уоршелла важно, какие вершины используются в качестве промежуточных. Через $w_{ij}^{(k)}$ обозначен вес кратчайшего пути из вершины v_i в вершину v_j с промежуточными вершинами из множества $\{1, 2, \dots, k\}$. Если $k = 0$, то промежуточных вершин нет. В общем случае

$$W_{i,j}^{(k)} = \begin{cases} w_{i,j}, & \text{если } k = 0 \\ \min(w_{i,j}^{(k-1)}, w_{i,k}^{(k-1)} + w_{k,j}^{(k-1)}), & \text{если } k \geq 1 \end{cases} \quad (4)$$

Матрица $W^{(n)} = (w_{ij}^{(n)})$ — матрица искомым кратчайших путей. На каждом проходе добавляются по одному узлу до тех пор, пока не будут исследованы все узлы графа.

Матрица весов $W^{(n)}$ содержит все суммарные веса кратчайших путей. Матрица кратчайших путей $R^{(n)} = r_{ij}^{(n)}$ позволяет получить информацию о маршруте. Исходная матрица кратчайших путей R^0 задается в виде:

$$R_{i,j}^0 = \begin{cases} v_j, & (v_i, v_j) \in E \\ 0, & (v_i, v_j) \notin E, \text{ или } i = j \end{cases} \quad (5)$$

Реконструкция пути осуществляется следующим образом:

$$R_{i,j}^{(k)} = \begin{cases} r_{i,j}^{(k-1)}, & \text{если } w_{i,j}^{(k-1)} \leq w_{i,k}^{(k-1)} + w_{k,j}^{(k-1)} \\ r_{k,j}^{(k-1)}, & \text{если } w_{i,j}^{(k-1)} > w_{i,k}^{(k-1)} + w_{k,j}^{(k-1)} \end{cases} \quad (6)$$

Для алгоритма Дейкстры формируется матрица весов $W = (w_{ij})$, вектор меток вершин $q(V)$, вектор значений «окраса» вершин $col(V)$ и вектор путей $Rt(V)$. Вектор меток вершин содержит значения меток равных весу вершины. В каждой итерации вычисляются новые значения меток вершин в процедуре «релаксации ребер». Просмотренные вершины отмечаются цветом, в простейшем случае это бинарные значения: 1 — просмотренная вершина, 0 — не просмотренная вершина. Процесс «релаксации ребер» выполняется следующим образом: если имеется ребро из вершины с номером i в вершину с номером j с весом w_{ij} , и путь из начальной вершины v_a в вершину v_j , не проходящую через вершину v_i , то существует возможность улучшить значение q_j :

$$q_j = \begin{cases} q_j, & \text{если } q_j \leq w_{ij} + q_i \\ q_i + w_{ij}, & \text{если } q_j > w_{ij} + q_i \end{cases}$$

где j — номер очередной просматриваемой вершины пути; i — номер предыдущей вершины, смежной с вершиной v_j .

Результаты поиска кратчайших путей на основе эвристического алгоритма A2015 совпадают с решениями по алгоритму Флойда-Уоршела и Дейкстры, но объем вычислений для эвристического алгоритма значительно меньше.

Анализ эффективности работы рассмотренных алгоритмов для поиска оптимального маршрута судна с учетом построения матрицы путей приведен в следующей таблице.

Анализ эффективности работы алгоритмов A2015

Число вершин графа	Количество операций		
	Алгоритм A2015	Алгоритм Дейкстры	Алгоритм Флойда-Уоршелла
5	20	121	271
8	41	288	932
10	95	440	1686
13	37	730	3777
14	139	842	4550
15	77	963	5449
16	116	1091	6396
21	166	2026	13085
22	217	2028	13860
24	93	2418	16822
25	274	2635	17753

В этой таблице указано количество операций, которое необходимо выполнить по каждому из алгоритмов в зависимости от числа вершин в графе с учетом формирования матрицы кратчайших путей. Очевидно, что использование алгоритма A2015 для построения оптимальных путей движения судна является более быстрым и эффективным. При этом результат эвристического алгоритма в значительной степени зависит от успешности выбора оценочной функции. Если использовать оценочную функцию, которая не учитывает истинной перспективности вершин, то в результате будут построены пути, не обладающие минимальной стоимостью.

Выводы

1. В результате исследования приближенных алгоритмов построения кратчайшего пути для масштабных графов разработан эвристический алгоритм A2015 формирования оптимального маршрута судна на основе эвристической оценочной функции.
2. Разработанный эвристический алгоритм A2015 позволяет на первом этапе построения оптимального маршрута судна найти приближенные решения, и далее, если приближенные решения неприемлемы, перейти к поиску оптимального маршрута судна на основе точных алгоритмов.
3. Разработанный алгоритм реализован программно. Программа позволяет выполнить анализ полученных вариантов решения для формирования наилучшего маршрута судна, с учетом дополнительных факторов, влияющих на время прохождения маршрута, его стоимость и безопасность.
4. Представленный алгоритм позволяет значительно сократить объем вычислений и быстро получать возможные решения, для оперативного анализа обстановки в заданном районе плавания.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Акмайкин Д. А. Проект системы оперативного анализа и оптимизации движения морских судов / Д. А. Акмайкин, С. Ф. Ключева, П. А. Салюк // Вестник Государственного университета морского и речного флота имени адмирала С. О. Макарова. — 2015. — № 1. — С. 229–236.
2. Akmaykin D. Solaris' information system for ship's navigation, using operational analysis of shipboard and satellite remote sensing data of hydrosphere and atmosphere / D. Akmaykin, D. Homenko, P. Salyuk, I. Stepochkin, K. Smirko // SPIE Proceedings, Ocean Remote Sensing and Monitoring from Space. — 2014. — № 9261-41. — С. 1–10.
3. Васьков А. С. Взаимосвязь зон навигационной безопасности судна / А. С. Васьков, В. А. Васьков, А. А. Мироненко // Вестник Государственного морского университета имени адмирала Ф. Ф. Ушакова. — 2013. — № 2. — С. 18–21.

4. *Макоско А. А.* Гидрометеорологическое обеспечение плавания по трассам Северного морского пути / А. А. Макоско // Арктика: экология и экономика. — 2013. — № 3. — С. 40–49.
5. *Мироненко А. А.* Формирование маршрута судна в автоматизированных навигационных комплексах: автореф. дис. ... канд. техн. наук: 05.22.19. — СПб., 2002. — 24 с.
6. *Некрасов С. Н.* Комбинированный метод оценки навигационной безопасности при плавании по внутренним водным путям / С. Н. Некрасов, А. А. Прохоренков // Вестник Государственного университета морского и речного флота имени адмирала С. О. Макарова. — 2011. — № 1. — С. 106–108.
7. *Прохоренков А. А.* Применение ситуационного метода оценки навигационной безопасности при плавании по внутренним водным путям / А. А. Прохоренков // Вестник Государственного университета морского и речного флота имени адмирала С. О. Макарова. — 2011. — № 1. — С. 91–95.
8. *Берштейн Л. С.* Использование темпоральных графов как моделей сложных систем / Л. С. Берштейн, А. В. Баженов // Известия ЮФУ. Технические науки. — 2010. — № 4 (105). — С. 198–203.
9. *Kostakov V.* Temporal graphs / V. Kostakov // Proc. of Physica A: Statistical Mechanics and its Applications. — 2008. — V. 388. — Pp. 1007–1023.
10. *Chapman W. L.* System Design Is an NP-Complete problem / W. L. Chapman, J. Rozenblit, A. T. Bahill // Systems Engineering. — 2001. — V. 4. — № 3. — Pp. 222–229.
11. *Костюк Ю. Л.* Приближённые алгоритмы решения сбалансированной задачи k коммивояжёров / Ю. Л. Костюк, М. С. Пожидаев // Вестник Томского государственного университета. Управление, вычислительная техника и информатика. — 2008. — № 1. — С. 106–112.
12. *Частикова В. А.* Разработка и сравнительный анализ эвристических алгоритмов для поиска наименьшего гамильтонова цикла в полном графе / В. А. Частикова, К. А. Власов // Фундаментальные исследования. — 2013. — № 10-1. — С. 63–67.

HEURISTIC SEARCH FOR THE OPTIMAL ROUTE SHIP NORTHERN SEA ROUTE

This paper deals the results of the research for constructing an optimal route for the ship in accordance with route time, economical aspects and safety if navigation. The analysis of the constructing of the optimal ship's route based on the approximation algorithms and heuristic evaluation function presented in this paper. In result of work, a heuristic algorithm A2015 was formulate and was realized n software implementation. The efficiency of algorithm shown by the example of the formation optimal ships route for the Northern Sea Route. A statement of a problem formalized. The paper describes a step-by-step guide of execution of heuristic algorithm to constructing an optimal route of the ship. Presented in the article algorithm A2015 software implementation includes comparing it with the classical Dijkstra and Floyd-Warshall algorithms. The algorithm A2015 can in some cases much faster to generate the optimal ship's route in a sea in comparison with the classical shortest path algorithms. This approach uses is possible to significantly reduce the amount of all possible amount of calculations, and operational get possible solutions for quick analysis of the situation in a given area of navigation.

Keywords: graph, minimal path, optimal route, heuristic algorithm, Floyd algorithm, search optimization, vector estimates, safety of navigation.

REFERENCES

1. Akmaykin, D., S. Klyueva., and P. 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.
2. Akmaykin, D. et al. "Solaris' information system for ship's navigation, using operational analysis of ship-board and satellite remote sensing data of hydrosphere and atmosphere." *SPIE Proceedings, Ocean Remote Sensing and Monitoring from Space 926114*. (2014): 1–10.
3. Vaskov, A., V. Vaskov, A. Mironenko "Ships Navigation Domain relationship." *Vestnik of Admiral Ushakov State Maritime University*. (2013): 18–21.
4. Makosko, A. "Hydrometeorological Support of Navigation along the Northern Sea Route." *The Arctic: ecology and economy* 3 (2013): 040–049.
5. Mironenko, A. Formirovanie marshruta sudna v avtomatizirovannyh navigacionnyh kompleksah: PhD dissertation thesis: 05.22.19. SPb, 2002.

6. Nekrasov, S., and A. Prohorenkov. "Combined simulation while estimation of inland waterway navigation safety." *Vestnik gosudarstvennogo universiteta morskogo i rechnogo flota imeni admirala S.O. Makarova* 1 (2011): 106–108.
7. Prohorenkov, A. "Application of situation simulation while estimation of inland waterway navigation." *Vestnik gosudarstvennogo universiteta morskogo i rechnogo flota imeni admirala S.O. Makarova* 1 (2011): 91–95.
8. Bershtein, L., and A. Bazhenyuk. "The using of temporal graphs as the models of complisity systems." *Izvestiya SFedU. Engineering sciences*. 4(105) (2010):198–203.
9. Kostakov, V. "Temporal graphs." *Proc. of Physics A: Statistical Mechanics and its Applications* 388 (2008): 1007–1023.
10. Chapman, William L., Jerzy Rozenblit, and A. Terry Bahill. "System Design Is an NP-Complete problem." *Systems Engineernig* 4.3 (2001): 222–229.
11. Kostyuk, Yu., and M. Pozhidaev. "Approximate algorithms for solution the balanced problem of k travel salesman." *Tomsk State University Journal of Control and Computer Science* 1 (2008): 106–112.
12. Chastikova, V., and K. Vlasov. "Development and comparative analysis of heuristic algorithms to search for the minimal Hamiltonian cycle in the complete graph." *Fundamental research* 10-1 (2013): 63–67.

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

Акмайкин Денис Александрович –
кандидат физико-математических наук, доцент.
МГУ им. адм. Г. И. Невельского
akmaykin@msun.ru
Клюева Светлана Федоровна –
кандидат технических наук.
МГУ им. адм. Г.И. Невельского
klsvetlkl@gmail.com
Салюк Павел Анатольевич –
кандидат физико-математических наук.
ТОИ ДВО РАН
pavel.salyuk@gmail.com

INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Akmaykin Denis Aleksandrovich –
Candidate of Physical and Mathematical Sciences,
associate professor.
MSU named after adm. G.I. Nevelskoy
akmaykin@msun.ru
Klyueva Svetlana Fedorovna –
Candidate of Engineering.
MSU named after adm. G.I. Nevelskoy
klsvetlkl@gmail.com
Salyuk Pavel Anatolievich –
Candidate of Physical and Mathematical Sciences.
V.I. Il'ichev Pacific Oceanological Institute
pavel.salyuk@gmail.com

ВОДНЫЕ ПУТИ СООБЩЕНИЯ И ГИДРОГРАФИЯ

УДК 528.48; 004; 327.7

Ю. Г. Фирсов

ГЕОДЕЗИЧЕСКИЕ АСПЕКТЫ РАЗГРАНИЧЕНИЯ МОРСКИХ ПРОСТРАНСТВ С США И ПЕРЕСМОТРЕННОЕ ПРЕДСТАВЛЕНИЕ РОССИИ ПО ГРАНИЦАМ КОНТИНЕНТАЛЬНОГО ШЕЛЬФА В АРКТИКЕ

Рассмотрены вопросы, касающиеся восточной границы арктической акватории России в контексте пересмотренного частичного Представления Российской Федерации о внешней границе континентального шельфа в Северном Ледовитом океане. Кратко изложена предыстория вопроса разграничения морских пространств России и США. Отмечено, что большинство публикаций по данной проблеме посвящено границе в Беринговом море. Показана обоснованность значения долготы меридиана секторальной линии в системе координат WGS-84, которая получена путем преобразования его величины, заданной на эллипсоиде Красовского в постановлении Совета Министров СССР 1979 г. Представлено значение координат северной точки разграничения морских пространств России и США в Северном Ледовитом океане в соответствии с нормами международного морского права согласно временно действующему в Российской Федерации Соглашению между СССР и США от 01.06.1990 г. На основе расчета площадей участков вдоль секторальной линии показано, что для Чукотского моря использование линии разграничения по указанному Соглашению от 01.06.1990 г. является менее выгодным, чем граница по медианной линии между Российской Федерацией и США. Отмечено, что изложенные технические вопросы будут являться предметом двухсторонних переговоров Российской Федерации и США с целью достижения договоренности как необходимого этапа, предваряющего рассмотрение частично пересмотренного Представления Российской Федерации в Комиссии по границам континентального шельфа ООН.

Ключевые слова: разграничение морских пространств, эллипсоид Красовского, система координат WGS-84, секторальная линия, медианная граница, международное морское право, внешняя граница континентального шельфа, Конвенция по морскому праву, Комиссия по границам континентального шельфа, Чукотское море, море Бофорта.

Введение

В августе 2015 г. Российская Федерация представила Генеральному секретарю Организации Объединенных наций (ООН) пересмотренное частичное Представление по внешней границе континентального шельфа (ВГКШ) в Северном Ледовитом океане (СЛО). Резюме пересмотренного частичного Представления опубликовано на сайте ООН [1]. Линия ВГКШ в СЛО включает семь участков. Первый и последний ее участки представляют собой линии разграничения морских пространств с прилежащими арктическими государствами. Вопрос о первом (западном) участке урегулирован с Королевством Норвегия в соответствии с Договором 2010 г. Текст договора и координаты, определяющие линию разграничения морских пространств между Россией и Норвегией, согласно договору от 15.09.2010 г., приводятся на сайте http://www.businesspravo.ru/Docum/DocumShow_DocumID_177741.html. Последний (седьмой) участок (восточный) практически совпадает с секторальной линией, исторически объявленной Россией вначале как Российская империя, а затем и СССР.

В контексте Конвенции по морскому праву 1982 г., которую Российская Федерация ратифицировала в 1997 г., эта секторальная линия — *восточная граница* — является линией разграничения морских пространств в СЛО с Канадой, Королевством Дания и США. Один участок этой границы, являющийся линией разграничения морских пространств с США, имеет юридическое обоснование с непростой историей.

Краткая история вопроса восточной границы

Истории разграничения морских пространств России и США посвящено большое количество публикаций, основной объем которых приходится на последние 25 лет, начиная с Соглаше-

ния между СССР и США от 01.06.1990 г. (далее — Соглашение между СССР и США 1990 г.). Подавляющее число этих публикаций [2], [3] – [5] сконцентрировано на обсуждении проблем морской границы в Беринговом море, связанной с добычей биоресурсов. Анализ публикаций, в которых проведено исследование Соглашения между СССР и США 1990 г., приводится в аналитическом обзоре [4]. Однако Соглашение между СССР и США 1990 г. касается также морской границы в Чукотском море и СЛО. Вопросы этой морской границы, ранее мало интересовавшие исследователей, в настоящее время приобретают существенное значение в связи с подачей пересмотренного частичного Представления Российской Федерации по ВГКШ в СЛО.

Изначально в качестве линии разграничения морских пространств между Россией и США был принят меридиан, определяемый в российско-американской Конвенции от 18 марта по старому стилю (30 марта по новому стилю) 1867 г. [6] как «*меридиан, проходящий посередине между островом Крузенитерна (Ignalook) и островом Ратманова (Noonarbook)*». Текст договора опубликован в «Собрании законов Соединенных Штатов» («*Statutes at Large*» — официальное издание законов и резолюций, принятых Конгрессом США): собрание законов за период с 1789 по 1875 гг., т. 15 (1867 – 1869 гг., документы 41 Конгресса), с. 539. Эти документы размещены на сайте библиотеки Конгресса США (*The Library of Congress*) [6], отсканированы и доступны в формате TIF по адресу: <http://memory.loc.gov/ll/llsl/015/0500/05780544.tif>. Текст, касающийся положения границ, содержится в ст. I Конвенции (с. 540 – 541 по нумерации тома). Англоязычный текст, описывающий западную (по отношению к Аляске) границу, приводится на с. 541 Конвенции. Официальный русскоязычный перевод ст. I Конвенции гласит:

«Западная граница, в пределах которой находятся переданные территории и владения, проходит через точку в Беринговом проливе на пересечении параллели шестьдесят пять градусов тридцать минут северной широты и меридиана, проходящего посередине между островом Крузенитерна (Ignalook) и островом Ратманова (Noonarbook), и идёт прямо на север, без ограничения, в Северный Ледовитый океан. Эта же западная граница, начинающаяся в той же самой начальной точке, проходит через Берингов пролив и Берингово море в направлении почти на юго-запад, посередине между северо-западной точкой острова Святого Лаврентия и юго-восточной точкой Мыса Чукотский, к сто семьдесят второму меридиану западной долготы; оттуда, от пересечения с этим меридианом, — в юго-западном направлении, проходя посередине между островом Атту и Медным островом Командорского архипелага (группы в Северном и Тихом океане), к сто девяносто третьему меридиану западной долготы, для того чтобы включить в переданные территории все Алеутские острова к востоку от этого меридиана».

Первым документом, определяющим статус земель, расположенных в российской арктической зоне, явилась нота МИД Российской Империи от 20 сентября 1916 г. [7]. В документе сохранилось положение о включении в состав территории государства всех земель, составляющих продолжение на север территории империи. В дальнейшем вопрос о советской арктической зоне был урегулирован в Постановлении Президиума ЦИК СССР 1926 г. «Об объявлении территории Союза ССР земель и островов, расположенных в Северном Ледовитом океане» [8]. В данном постановлении ЦИК отмечается следующее: «... *территорией Союза ССР являются все как открытые, так и могущие быть открытыми в дальнейшем земли и острова, не составляющие к моменту опубликования настоящего Постановления признанной Правительством Союза ССР территории каких-либо иностранных государств, расположенные в Северном Ледовитом океане к северу от побережья Союза ССР до Северного полюса в пределах между меридианом 32°4'35" в. д., проходящим по восточной стороне Вайда-Губы (граница с Финляндией)*, и меридианом 168°49'30" з. д., проходящим посередине Берингова пролива*». Таким образом, СССР ввел секторальный принцип разграничения своих арктических владений. Принадлежность СССР этих территорий официально не оспаривалась ни одной из арктических стран. Отметим, что в постановлении не указывался референц-эллипсоид, к которому были отнесены указанные геодезические координаты.

В 1979 г. Советский Союз в связи с ранее неточным определением координат линии, проходящей посередине Берингова пролива и разделяющей о-ва Ратманова (*Noonarbook*) и Крузенштерна (*Ignalook*), изменил значение меридиана, определяющего восточные границы своих полярных владений. В Указе Президиума Верховного Совета СССР от 21 февраля 1979 г. [9] предусматривалось «внести уточнение в изображение на советских картах восточной границы полярных владений СССР в Северном Ледовитом океане», заменив цифровое значение меридиана $168^{\circ}49'30''$ на $168^{\circ}58'49,4''$ з. д. В этот период все официальные карты в СССР издавались в системе координат «Пулково-42» на эллипсоиде Красовского. Таким образом, значение $168^{\circ}58'49,4''$ з. д. было дано в системе координат «Пулково-42».

Обоснование долготы граничного меридиана по Соглашению между СССР и США 1990 г.

В современных международных документах геодезические координаты, как правило, приводятся в международно-признанной системе координат WGS-84. Для преобразования геодезических координат из системы координат «Пулково-42» (на эллипсоиде Красовского), в систему координат WGS-84 могут быть использованы три или семь параметров трансформирования. Три линейных параметра приведены в Руководстве S-60 Международной гидрографической организации (МГО) [10]. Использование трех параметров трансформирования ($\Delta x = 28$ м, $\Delta y = -130$ м; $\Delta z = -95$ м) для точки с широтой $65^{\circ}30'00''$ и долготой $168^{\circ}58'49,4''$ з. д. позволяет получить значение долготы в системе координат WGS-84, равное $168^{\circ}58'37,06''$ з. д. Таким образом, восточная секторальная линия СССР, установленная согласно Указу Президиума Верховного Совета СССР (1979 г.) в системе координат WGS-84, имеет округленную до секунды долготу, равную $168^{\circ}58'37,00''$ з. д. Именно такое значение долготы зафиксировано в Соглашении между СССР и США 1990 г. В ст. 1 данного Соглашения дана ссылка на упомянутую Конвенцию 1867 г. и устанавливается, что данный «срединный» меридиан является линией разграничения морских пространств СССР и США. Координаты точек, формирующих линию разграничения морских пространств между СССР и США, согласно договору от 01.06.1990 г., приведены на сайте Организации Объединенных Наций [11]. Полный текст Соглашения между СССР и США 1990 г. приводится в официальном документе [11].

Согласно расчетам, выполненным в ГНИНГИ в 2014 г. на основе фрагментов береговой линии о-вов Крузенштерна (*Ignalook*) и Ратманова (*Noonarbook*), полученных из базы данных GSHHG (Global Self-consistent, Hierarchical Resolution Geography Database) версии 2.3.0., была подтверждена долгота меридиана, проходящего посередине между указанными островами. С округлением до целых секунд в системе координат WGS-84 долгота меридиана составила $168^{\circ}58'37''$ з. д.

Соглашение между СССР и США 1990 г. позволило сторонам разграничить территориальное море, экономические зоны и континентальный шельф в Чукотском и Беринговом море, Северном Ледовитом и Тихом океане. США ратифицировали данное Соглашение в 1991 г., а Российская Федерация его применяет временно. Детальный анализ исторических аспектов и современного состояния Соглашением между СССР и США 1990 г., включая сведения о «специальных районах», в том числе в Чукотском море, содержится в аналитическом докладе [4]. Линия разграничения морских пространств Российской Федерации и США в Чукотском море и СЛО в настоящее время наносится на навигационные морские карты Российской Федерации и США в соответствии с Соглашением между СССР и США 1990 г.

На рис. 1 приведена карта о-вов Диомиды (Большой и Малый) с нанесенной линией разграничения, являющаяся врезкой в навигационную морскую карту США с адмиралтейским номером 16190. Эта навигационная морская карта доступна на сайте Национальной администрации по океану и атмосфере США (NOAA) [12].

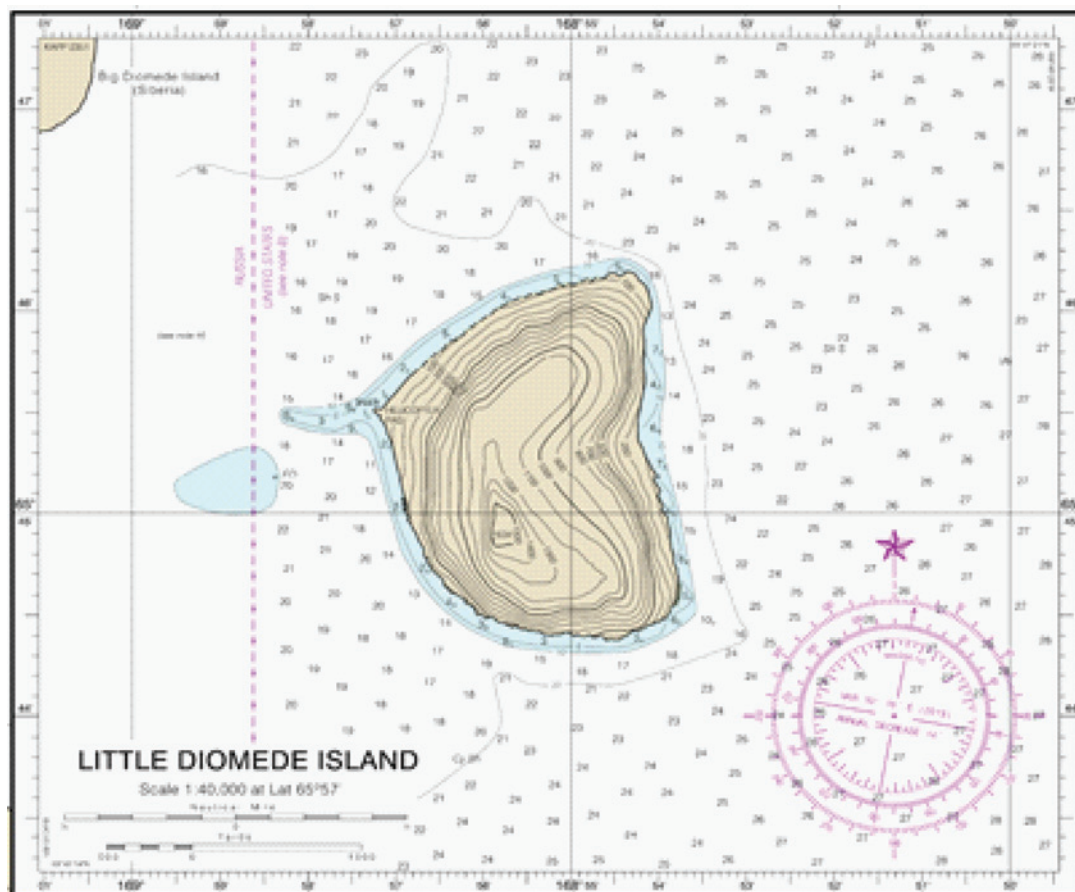


Рис. 1. Навигационная морская карта США для района островов Диомиды

Проблема разграничения морских пространств России и США в Чукотском море и СЛО

В ст. 2 Соглашения между СССР и США 1990 г. приводится значение координат исходной точки, через которую проходит пограничный меридиан: $65^{\circ}30'00''$ N, $168^{\circ}58'37''$ W. Далее указывается, что морская граница проходит на север по меридиану $168^{\circ}58'37''$ з. д. через Берингов пролив, Чукотское море и СЛО насколько это допускает международное право.

Официальный англоязычный текст ст. 2 данного документа гласит:

1. *From the initial point, $65^{\circ}30' N$, $168^{\circ}58'37'' W$, the maritime boundary extends north along the $168^{\circ}58'37'' W$ meridian through the Bering Strait and Chukchi Sea into the Arctic Ocean as far as permitted under international law.*

Официальный русскоязычный текст ст. 2 данного документа представлен в виде:

1. *От начальной точки $65^{\circ}30'$ с. ш., $168^{\circ}58'37''$ з. д. линия разграничения морских пространств идет на север по меридиану $168^{\circ}58'37''$ з. д. через Берингов пролив и Чукотское море по Северному Ледовитому океану, насколько допускается по международному праву.*

Возникает закономерный вопрос: до какой широты правомерно продлить этот меридиан в соответствии с международным морским правом. В соответствии с практикой международного морского законодательства возможны два основных принципа раздела морских пространств и арктического шельфа между государствами [13]: секторальный и медианный. Согласно *секторальному принципу*, использованному в Соглашении между СССР и США 1990 г., при разграничении морских пространств в Чукотском море и СЛО Северный полюс рассматривается в качестве точки, от которой проводятся прямые линии вдоль долгот.

Медианный линейный метод деления основан на использовании принципа равной удалённости граничной линии от точек исходных линии сопредельных государств. Данный метод

применяется, например, для разграничения морских пространств США и Канады в море Бофорта, однако официальный перечень координат точек указанной медианной линии в настоящее время отсутствует. Более того, участок медианной линии, исходящий от побережья Аляски, является объектом территориального спора между США и Канадой [13], [20].

Для построения медианной границы между США и Канадой в море Бофорта использовались данные о координатах точек прямых и нормальных исходных линий. Координаты точек прямых исходных линий Канады были взяты из документа, размещенного на сайте Министерства юстиции Канады [14]. В США прямые и / или нормальные исходные линии на Аляске и границы исключительной экономической зоны США в море Бофорта официально не опубликованы. Точки линии исключительной экономической зоны США в море Бофорта представлены согласно данным, приведенным Морским институтом Фландрии» (Бельгия) (*Flanders Marine Institute* — сокращенно называемый VLIZ, сайт в Интернете: <http://www.vliz.be/en>).

Описание набора данных и непосредственно данные доступны в интернете [15]. Координаты нормальной исходной линии для побережья Аляски были взяты из базы данных GSHHG, созданной геофизической лабораторией Национальной администрации по океану и атмосфере (NOAA Geosciences Lab) [16]. Совместное использование информации о нормальной исходной линии Аляски были использованы для получения медианной линии. Расчет медианных линий осуществлялся с помощью инструмента «Generate Midline», входящего в состав подсистемы «Shelf (Unclos Article 76 functionality)» программы GeoCap [17]. Таким образом, были построены медианные линии Канады – США и РФ – США. Для расчета точек пересечения геодезических линий использована геодезическая программа «PCTrans» [18]. Пакет программ GeoCap использовался также для выполнения всех расчетов по обоснованию ВГКШ РФ в СЛО в соответствии со ст. 76 Конвенции ООН по морскому праву, включая определение точек подножия континентального шельфа, формульных и ограничительных линий [19].

В контексте договора между СССР и США линию разделения морских пространств в СЛО следует продлить до точки пересечения с медианной линией, определяющей разграничение морских пространств между Канадой и США. Данная точка, являющаяся точкой начала условной линии разграничения морских пространств РФ и США, имеет координаты: $80^{\circ}40'31,38''\ N$ $168^{\circ}58'37,00''\ W$ (в системе координат WGS-84). В Резюме пересмотренного частичного Представления Российской Федерации по ВГКШ в СЛО [1] указанная точка, получившая наименование US-R, представлена в таблице координат ВГКШ.

Координаты начальной и конечной точки условной линии разграничения морских пространств РФ и США (точки с названиями *Point 1* и *US-RF* соответственно) будут являться предметом двухсторонних переговоров в ходе подготовки к рассмотрению пересмотренного частичного Представления Российской Федерации по ВГКШ в СЛО в Комиссии по границам континентального шельфа [1].

Обсуждение разграничения морских пространств России и США в Чукотском море и СЛО

В мире существует несколько авторитетных экспертных организаций по морской юрисдикции и границам [15], [20]. Одной из таких организаций является университет Дурхам (*Durham University*) в Великобритании, в составе которого существует Международное исследовательское бюро по границам (International Boundary Research Unit — IBRU). В 2008 г., а затем в 2015 г. IBRU опубликовало карту «Морская юрисдикция и границы в Арктике» [20]. Фрагмент карты 2015 г. представлен на рис. 2. На отдельной карте «Maritime jurisdiction and boundaries in the Arctic region. Russian Claims» приведены данные по границам из «Резюме» Российской Федерации [1]. На картах, опубликованных в 2008 и 2015 гг., линия разделения морских пространств РФ и США заканчивается в точке пересечения с медианной границей морских пространств США и Канадой в море Бофорта, а в легенде карты эта линия обозначена как «Agreed boundary» (согласованная граница).

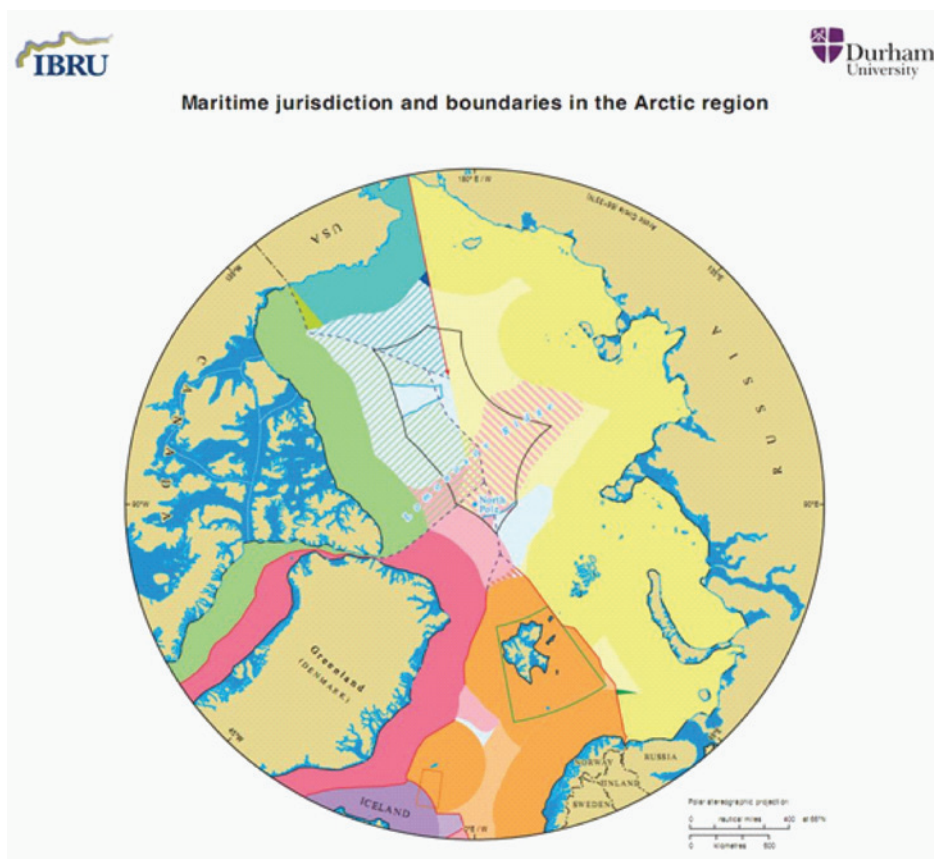


Рис. 2. Фрагмент карты, подготовленной в университете Дурхам в 2015 г. [20]

В мае 2009 г. в журнале «National Geographic» (США) была опубликована статья [21], посвященная текущему состоянию обоснования ВГКШ арктическими государствами. В статье приведено несколько карт с границами в Арктике. Фрагмент одной из таких карт, на которой нанесены медианные линии арктических государств, приведен на рис. 3. На карте линия разграничения морских пространств РФ и США проходит до точки пересечения с медианной границей США и Канадой. В легенде к этой карте линия разграничения морских пространств РФ и США показана как Международная морская граница (International Maritime Boundary).

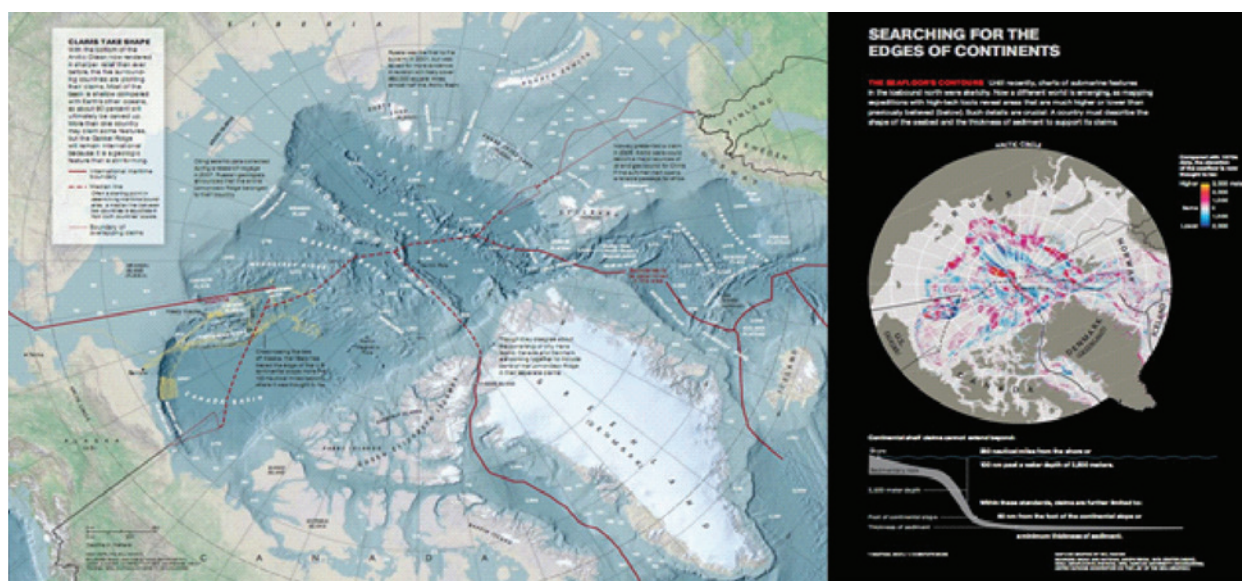


Рис. 3. Фрагмент карты с границами в Арктике, опубликованной в журнале «National Geographic»

Уяснив возможные пределы простираения условной линии разграничения морских пространств РФ – США в Чукотском море и СЛО, проанализируем далее преимущества этой линии по сравнению с альтернативным вариантом: медианной линией РФ – США, возможной в рамках международного морского права. На карте-схеме, приведенной на рис. 4, показаны следующие объекты: 1 — медианная линия РФ – США; 2 — медианная линия Канада – США; 3 — медианная линия РФ – Канада; 4 — условная линия разграничения морских пространств РФ – США по Соглашению 1990 г.; 5 — граница исключительной экономической зоны РФ в Чукотском море.

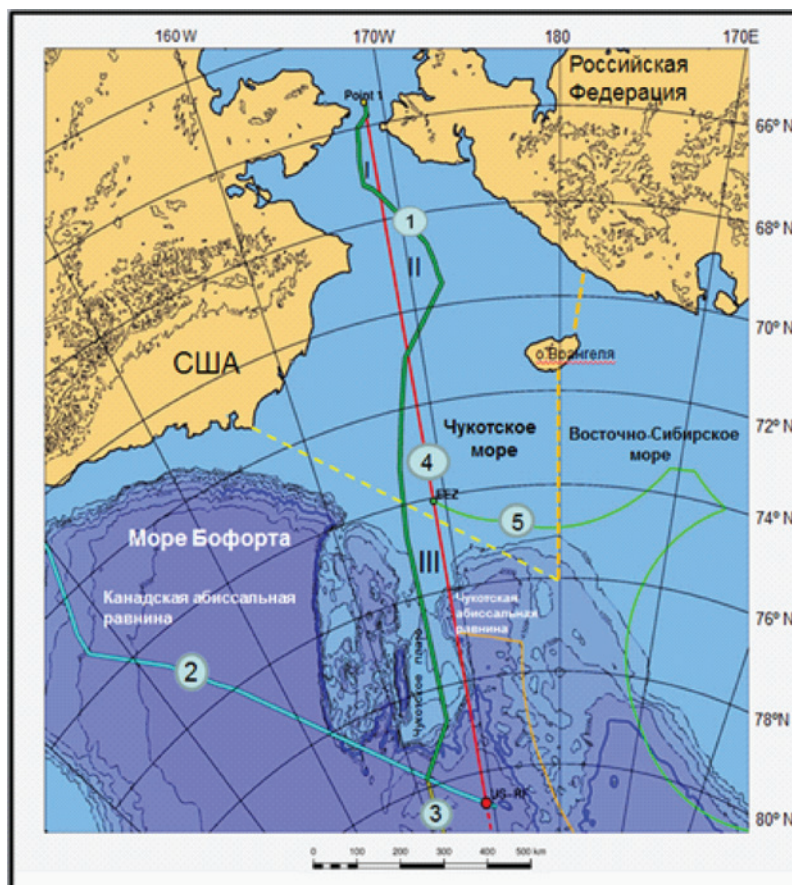


Рис. 4. Карта-схема акватории Чукотского моря и СЛО с медианными линиями Канада – США, РФ – США и условной линией разграничения морских пространств РФ – США

Пересечение медианной линии РФ – США с условной линией разграничения морских пространств РФ – США образует акватории, обозначенные цифрами I, II и III. Согласно Соглашению между СССР и США 1990 г., Российская Федерация теряет акваторию I площадью 5731,3 км² и акваторию III площадью 77286,7 км², но приобретает акваторию II площадью 26959,3 км². Таким образом, общий баланс является отрицательным и составляет 56058,7 км². В случае отказа от Соглашения между СССР и США 1990 г. и использования для делимитации морских пространств медианной линии РФ – США получается положительный баланс, составляющий 56058,7 км². Очевидно, что не только баланс площадей акватории имеет решающее значение. С одной стороны, акватория II находится на мелководном участке шельфа с глубинами 35 — 50 м и потенциально является более доступной для добычи природных ресурсов. С другой стороны, акватория III только частично имеет глубины менее 100 м и располагается в основном на Чукотском плато с глубинами в пределах 200 — 500 м.

Рассмотрение ресурсного потенциала Чукотского моря является предметом отдельного большого исследования и выходит за рамки данной работы. Отметим только, что недавно правительством США было дано разрешение компании «Shell» на проведения разведочного бурения на

шельфе Чукотского моря в непосредственной близости от линии условного разграничения морских пространств согласно Соглашению между СССР и США 1990 г. [22]. Таким образом, освоение природных ресурсов Чукотского моря уже началось.

Заключение и выводы

1. Пересмотренное частичное Представление Российской Федерации по ВГКШ в СЛО явилось результатом большой работы, связанной с выполнением высокоширотных экспедиций (2005 г., 2007 г., 2010 – 2014 гг.) и обработкой большого объема информации, в результате которой были получены современные батиметрические, геофизические и геологические материалы, позволившие убедительно доказать континентальную природу основных поднятий дна российской части СЛО, являющихся подводным продолжением Сибирской континентальной платформы.

2. В настоящее время, когда основные технологические и научные работы по обоснованию ВГКШ Российской Федерации в СЛО практически завершены, эта проблема переходит в юридическую стадию, связанную с проведением переговоров с прилежащими арктическими государствами с целью решения вопросов делимитации «восточной» границы.

3. Положение линии разграничения морских пространств Российской Федерации и США в СЛО юридически не определено.

4. Достижение договоренности о разграничении морских пространств в Чукотском море и СЛО может базироваться на Соглашении между СССР и США 1990 г. При этом экспертам предстоит согласовать ряд технических вопросов, в том числе вопрос, касающийся определения начальной точки линии разграничения (точка «US-RF») [1].

5. Двухсторонние переговоры РФ и США для достижения договоренности о разграничении морских пространств в Чукотском море и СЛО являются необходимым этапом, предваряющим рассмотрение пересмотренного частичного Представления Российской Федерации в Комиссии по границам континентального шельфа ООН.

6. Делимитация морских пространств в СЛО на секторальной линии с Канадой и Королевством Дания представляет отдельный непростой вопрос.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Пересмотренное частичное Представление Российской Федерации в Комиссию по границам континентального шельфа в отношении континентального шельфа в Северном Ледовитом океане. Резюме. — 2015. — 37 с. [Электронный ресурс]. — Режим доступа: http://www.un.org/Depts/los/clcs_new/submissions_files/rus01_rev15/2015_08_03_Exec_Summary_English.pdf (Дата обращения: 25.08.2015).

2. Вылегжанин А. 20 лет «временного применения» Соглашения между СССР и США о линии разграничения морских пространств / А. Вылегжанин // Вестник МГИМО-университета. — 2010. — С. 1–10.

3. Паламарь Н. Г. Некоторые аспекты пограничного разграничения между Российской Федерацией и Соединенными Штатами Америки / Н. Г. Паламарь // Информационный гуманитарный портал «Знание. Понимание. Умение». — 2009. — № 6. [Электронный ресурс]. — Режим доступа: http://www.zpu-journal.ru/e-zpu/2009/6/Palamar_Boundary_Differentiation/index.php?sphrase_id=4718 (Дата обращения: 26.07.2015).

4. Политика России в Арктике: как избежать новой холодной войны. Доклад грантополучателей Международного дискуссионного клуба «Валдай». — 2014. — 118 с. [Электронный ресурс]. — Режим доступа: <http://valdaiclub.com/publication/72820.html> (Дата обращения — 25.07.2015).

5. Konyshov V. Russia's Policies on the Territorial Disputes in the Arctic / V. Konyshov, A. Sergunin // Journal of International Relations and Foreign Policy. — March. — 2014. — Vol. 2. — No. 1. — Pp. 55–83.

6. Русско-американская Конвенция от 18/30 марта 1867 г. — Собр. законов Соединенных Штатов» (Statutes at Large, официальное издание законов и резолюций, принятых Конгрессом США): собр. законов за период с 1789 по 1875 гг., т. 15 (1867 — 1869, док. 41 Конгресса). — 539 с. [Электронный ресурс]. — Режим доступа: <http://memory.loc.gov/ammem/amlaw/lwslink.html> (Дата обращения: 17.07.2015).

7. Барциц И. Н. О правовом статусе российского арктического сектора / И. Н. Барциц // Право и политика. — 2000. — № 12. — С. 23.

8. Документы внешней политики СССР. — М.: Политиздат, 1964. — 228 с.
9. СССР. Верховный Совет. Президиум. Указ Президиума Верховного Совета СССР № 8908-IX от 21 февраля 1979 г. [Электронный ресурс]. — Режим доступа: <http://xn--80aoh9a5b.farpar.ru/> (дата обращения: 15.09.2015).
10. Users Handbook on Datum Transformations involving WGS – 84, 3rd Edition (IHO Publication S-60). — Monaco: International Hydrographic Bureau, 2003. — 112 p.
11. Agreement between the United States of America and the Union of Soviet Socialist Republics on the maritime boundary, 1 June 1990. — 5 p. [Электронный ресурс]. — Режим доступа: <http://www.un.org/Depts/los/LEGISLATIONANDTREATIES/PDFFILES/TREATIES/USA-RUS1990MB.PDF> (Дата обращения: 20.07.2015).
12. Навигационная морская карта США, адмиралтейский номер 16190 «Bering Strait North». [Электронный ресурс]. — Режим доступа: <http://www.charts.noaa.gov/PDFs/16190.pdf> (Дата обращения: 25.07.2015).
13. Коньшев В. Н. Арктика в международной политике: сотрудничество или соперничество? / В. Н. Коньшев, А. А. Сергунин. — М.: РИСИ, 2011. — 194 с.
14. CANADA. Territorial Sea Geographical Coordinates (Area 7) Order. SOR/85-872 DORS. Current to February 27, 2014. [Электронный ресурс]. — Режим доступа: <http://laws-lois.justice.gc.ca/eng/index.html> (Дата обращения: 05.06.2015).
15. ГИС-проект границ исключительных экономических зон прибрежных государств мира. FLANDERS MARINE INSTITUTE. [Электронный ресурс]. — Режим доступа: http://marineregions.org/eezdetails.php?eez_id=170 (Дата обращения: 05.06.2015).
16. GSHHG - A Global Self-consistent, Hierarchical, High-resolution Geography Database. [Электронный ресурс]. — Режим доступа: <http://www.ngdc.noaa.gov/mgg/shorelines/gshhs.html> (Дата обращения: 15.07.2015).
17. User Guide for GeoCap 7.0 Geocap AS. — Oslo, Norway, 2013. — 324 p. [Электронный ресурс]. — Режим доступа: <http://www.geocap.no> (дата обращения: 05.06.2015).
18. Программа «PCTrans». [Электронный ресурс]. — Режим доступа: <https://www.defensie.nl/english/topics/hydrography/contents/nautical-products/nautical-software-programs/pctrans> (Дата обращения: 10.06.2015).
19. Фирсов Ю. Г. Цифровые модели рельефа дна и анализ батиметрических профилей для формирования внешней границы континентального шельфа России в Арктике / Ю. Г. Фирсов // Сборник материалов VI Международного научного конгресса «ГЕО-Сибирь-2011». — Новосибирск: СГГА, 2011. — С. 153–162.
20. Maritime jurisdiction and boundaries in the Arctic region. Durham University. International Boundary Research Unit, 2015. [Электронный ресурс]. — Режим доступа: https://www.dur.ac.uk/resources/ibru/resources/ibru_arctic_map_27-02-15.pdf (Дата обращения: 15.09.2015). <https://www.dur.ac.uk/resources/ibru/resources/Arcticmap04-08-15.pdf> (Дата обращения: 15.09.2015). https://www.dur.ac.uk/resources/ibru/resources/ArcticmapRussianonlyclaims05_08_15.pdf (Дата обращения: 15.09.2015).
21. Funk M. K. Arctic land grab / M. K. Funk, J. Vessels // National Geographic. — 2009. — Т. 215. — № 5. — С. 107–121.
22. Barrett P. Inside Shell's Extreme Plan to Drill for Oil in the Arctic. A global oil glut has tanked prices and cut profits — so why won't Shell give up on the north? / P. Barrett, B. Elgin // Bloomberg Business. — August 5, 2015. [Электронный ресурс]. — Режим доступа: <http://www.bloomberg.com/news/features/2015-08-05/inside-shell-s-extreme-plan-to-drill-for-oil-in-the-arctic> (Дата обращения: 06.08.2015).

GEODETTIC ASPECTS OF THE MARITIME DELIMITATION WITH THE USA AND THE PARTIAL REVISED SUBMISSION OF RUSSIA IN RESPECT OF THE CONTINENTAL SHELF IN THE ARCTIC OCEAN

The study examines the eastern boundary of Russian Arctic water areas in the context of the Partial Revised Submission of the Russian Federation to the Commission on the Limits of the Continental Shelf in respect of the continental shelf of the Russian Federation in the Arctic Ocean.

The historical issues concerning the Russian - U.S. maritime boundary are briefly covered. The majority of publications covering this problem discuss the issues of the maritime boundary in the Bering Sea.

The numerical value of the maritime boundary meridian 168°49'30" W (in the WGS-84 coordinate system) stated in the agreement between the United States of America and the Union of Soviet Socialist Republics on the Maritime Boundary in the Chukchi and Bering Seas (1990) as a result of datum transformation from the value: 168°58'49.4"W (Krasovsky ellipsoid) which was approved by the Decree of the Presidium of the Supreme Council of

the USSR No. 8908 (1979) is justified. The most northern point of the possible maritime boundary between Russia and the U.S. in the Arctic Ocean, based on the mentioned agreement according with the international maritime legislation practice is calculated and commented upon.

The areas along the sectorial line stated in the mentioned agreement which were formed by the median line between Russia and the U.S are calculated. The use of the median line boundary in the Chukchi Sea is stated as more favorable for Russia. Finally it is mentioned that the observed technicalities would be the subject-matter of negotiations with the U.S. as an essential preliminary stage before the Russian Federation Partial Revised Submission examination at the UN Commission on the Limits of the Continental Shelf.

Keywords: maritime boundary, maritime spaces delimitation, Krasovsky ellipsoid, WGS-84 coordinate system, sectorial line, median line, international maritime legislation, United Nations Convention on the Law of the Sea, Commission on the Limits of the Continental Shelf, Chukchi Sea, Beaufort Sea.

REFERENCES

1. Partial Revised Submission of the Russian Federation to the Commission on the Limits of the Continental Shelf in respect of the continental shelf of the Russian Federation in the Arctic Ocean. Executive Summary. 2015: 37 p. Web. 25 August 2015
<http://www.un.org/Depts/los/clcs_new/submissions_files/rus01_rev15/2015_08_03_Exec_Summary_English.pdf>
2. Valegjanin, Alexander. "20 let "vremennogo primenenija" Soglashenia mejdu SSSR i SSHA o linii razgranishenia morskikh prostranstv." *Vestnik MGIMO-universiteta* 2010: 1-10.
3. Palamar, N. G. "Nekotorye aspekty pogranichnogo razgranichenija mejdu Rossiskoi Federaziei i Soedinennimi Shtatami Ameriki." *Informacionni Gumunitarni portal "Znanie, Ponimanie, Umenie"* 6 (2009). Web. 26 July 2015 <http://www.zpu-journal.ru/e-zpu/2009/6/Palamar_Boundary_Differentiation/index.php?sphrase_id=4718>.
4. Politika Rossii v Arktike: kak izbejat novoi holodni vojni. Doklad grantopoluchatelei Mejdunarodnogo diskusionnogo kluba "Valdai". 2014: 118 p. Web. 25 July 2015 <<http://valdaiclub.com/publication/72820.html>>.
5. Konyshchev, Valery, and Alexander Sergunin. "Russia's Policies on the Territorial Disputes in the Arctic." *Journal of International Relations and Foreign Policy* 2.1 (2014): 55-83.
6. Russko-amerikanskaja Konvensia ot 30 marta 1867 g. – "Sobranie zakonov Soedinennih Shtatov", (Statutes at Large, ofisialnoe izdanie zakonov i rezoluzii, priinatih Kongressom SSHA): cobranie zakonov za period s 1789 po 1875 godi, tom 15 (1867-1875, dokumenti 41 Kongrassa). 539 p. Web. 17 July 2015 <<http://memory.loc.gov/ammem/amlaw/lwslink.html>>.
7. Barziz, I. N. "O pravovom statuse possiskogo arlitcheskogo sektora." *Pravo i Politika* 12 (2000): 23.
8. *Dokumenty vneshnei politiki SSSR*. M.: Politizdat, 1964: 228.
9. Ukaz Prezidiuma Verhovnogo Soveta SSSR. № 8908-IX ot 21 fevralia 1979 g.
10. *Users Handbook on Datum Transformations involving WGS – 84, 3rd Edition (IHO Publication S-60)*. Monaco: International Hydrographic Bureau, 2003: 112.
11. Agreement between the United States of America and the Union of Soviet Socialist Republics on the maritime boundary, 1 June 1990. 5 p. Web. 20 July 2015 <<http://www.un.org/Depts/los/LEGISLATIONANDTREATIES/PDFFILES/TREATIES/USA-RUS1990MB.PDF>>.
12. Navigasionnaja morskaja karta SSHA, admiralteisky nomer 16190 «Bering Strait North». Web. 25 July 2015 <<http://www.charts.noaa.gov/PDFs/16190.pdf>>.
13. Konyshchev, Valery, and Alexander Sergunin. *Arktika v mejdunarodni politike: sotrudnichestvo ili sopernichestvo*. M.: RISI, 2011:194.
14. CANADA. Territorial Sea Geographical Coordinates (Area 7) Order. SOR/85-872 DORS. Current to February 27, 2014. Web. 05 June 2015 <<http://laws-lois.justice.gc.ca/eng/index.html>>.
15. GIS –proekt graniz iskluchitel'nykh ekonomicheskikh zon gosudarstv mira. FLANDERS MARINE INSTITUTE. Web. 05 June 2015 <http://marineregions.org/eezdetails.php?eez_id=170>.
16. GSHHG - A Global Self-consistent, Hierarchical, High-resolution Geography Database. Web. 15 July 2015 <<http://www.ngdc.noaa.gov/mgg/shorelines/gshhs.html>>.
17. User Guide for GeoCap 7.0 Geocap AS. Oslo, Norway, 2013: 324. Web. 05 June 2015 <<http://www.geocap.no>>.

18. Programa «PCTrans». Web. 10 June 2015 <<https://www.defensie.nl/english/topics/hydrography/contents/nautical-products/nautical-software-programs/pctrans>>.

19. Firsov, Y. G. “Zifrovie modeli relief dna i analiz batimetricheskikh profilei dlia formirovaniia vneshnei granizi kontinentalnogo shelfa Rossii v Arktike.” *Zbornik materialov VI Mejdunarodnogo nauchnogo kongresa “GEO-Sibir-2011”*. Novosibirsk: SGGA, 2011: 153-162.

20. Maritime jurisdiction and boundaries in the Arctic region. Durham University. International Boundary Research Unit, 2008. Web. 15 September 2015 <https://www.dur.ac.uk/resources/ibru/resources/ibru_arctic_map_27-02-15.pdf>. <<https://www.dur.ac.uk/resources/ibru/resources/Arcticmap04-08-15.pdf>> <https://www.dur.ac.uk/resources/ibru/resources/ArcticmapRussianonlyclaims05_08_15.pdf>

21. Funk, M. K., and J Vessels. “Arctic land grab.” *National Geographic* 215.5 (2009): 107-121.

22. Barrett, Paul, and Benjamin Elgin. “Inside Shell’s Extreme Plan to Drill for Oil in the Arctic. A global oil glut has tanked prices and cut profits—so why won’t Shell give up on the north?” *Bloomberg Business* August 5, 2015. Web. 06 August 2015 <<http://www.bloomberg.com/news/features/2015-08-05/inside-shell-s-extreme-plan-to-drill-for-oil-in-the-arctic>>.

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРЕ

Фирсов Юрий Георгиевич –
кандидат технических наук, доцент.
ФГБОУ ВО «ГУМРФ имени
адмирала С. О. Макарова»
gidrograph@mail.ru

INFORMATION ABOUT THE AUTHOR

Firsov Yury Georgievich –
Candidate of Engineering, associate professor.
Admiral Makarov State University for Maritime
and Inland Shipping
gidrograph@mail.ru

УДК 656.61.052

С. В. Ермаков

ОСОБЕННОСТИ ОПРЕДЕЛЕНИЯ ФАКТИЧЕСКОЙ ДАЛЬНОСТИ ВИДИМОСТИ ОГНЕЙ МАЯКОВ ПО УКАЗАННОЙ НА КАРТЕ ВЕЛИЧИНЕ

Рассмотрены различные виды многообразного понятия «дальность видимости», используемые в целях судовождения: географическая, оптическая, стандартная, номинальная, метеорологическая, фактическая. Описаны правила, используемые при указании дальности видимости маяка на морской навигационной карте, различные для российских и иностранных маяков. Рассмотрены и проанализированы алгоритмы определения фактической дальности видимости огней российских маяков по указанной на карте величине. Выявлены особенности этих алгоритмов и их ограничения, не позволяющие в отдельных случаях определить фактическое значение исследуемой характеристики маяка при указании на карте географической дальности видимости для высоты глаза, равной 5 м. Предложено изменить содержание указанной на карте информации о российских маяках посредством использования предложенной Международной ассоциацией маячных служб (МАМС) и используемой на картах и в пособиях для иностранных маяков номинальной оптической дальности видимости вместо географической и стандартной, и включения в эту информацию высоты маяка.

Ключевые слова: маяки, дальность видимости, морская навигационная карта.



ИНФОРМАЦИЯ, которую должен принимать во внимание судоводитель при планировании и безопасном осуществлении перехода, должна включать среди прочего дальности открытия и закрытия огней маяков, которые встречаются на пути следования судна [1], [2]. Один из способов определения дальности открытия (закрытия) $D_{\text{факт}}$ основан на использовании дальности видимости $D_{\text{к}}$, указанной на морской навигационной карте в числе характеристик огней маяков. Однако даже первичных знаний о навигации достаточно, чтобы по-

нять — дальность D_k является лишь некоторой оценочной величиной для $D_{\text{факт}}$, в общем случае не совпадает с ней и служит только базой для определения этой дальности.

Указанная на карте дальность видимости может быть географической или оптической — стандартной или номинальной [3] – [6]. Географическая дальность видимости — дальность видимости маяков для Земли-шара (геометрическая дальность) с учетом земной рефракции. Она зависит от высоты e глаза, высоты h маяка и коэффициента K земной рефракции [7], [8]. Оптическая дальность видимости огня — наибольшее расстояние, с которого освещенность, создаваемая на зрачке глаза наблюдателя источником света, становится равной пороговой освещенности (достигает границы между воспринимаемыми и невоспринимаемыми освещенностями). Номинальная дальность видимости $D_{\text{ном}}$ — оптическая дальность видимости огня в однородной атмосфере при коэффициенте прозрачности, равном 0,74. Стандартная дальность видимости $D_{\text{ст}}$ отличается от номинальной только коэффициентом прозрачности, которая здесь равна 0,80. Как номинальная, так и стандартная дальности видимости позволяют известными способами (например, по номограмме 2.5 МТ-2000) определить оптическую дальность видимости $D_{\text{опт}}$ огней. Однако для этого необходимо знать еще одну дальность видимости — метеорологическую $D_{\text{мет}}$.

Под метеорологической дальностью видимости понимается наибольшее расстояние, на котором при существующей дальности атмосферы и нормальном дневном свете теряется видимость эталонного объекта. Метеорологическая дальность видимости является по своей сути безотносительной к силе огней маяка характеристикой видимости в конкретном районе плавания для строго определенного времени плавания. Она определяется специальными методами и приборами и сообщается в гидрометеорологических прогнозах [9].

До недавнего времени на английских картах указывалась географическая дальность видимости для высоты глаза 15 футов. На современных морских навигационных картах на иностранные воды (как на отечественных, так и на зарубежных) указывается номинальная дальность видимости, введенная по инициативе МАМС. Те же самые значения содержатся и в отечественных пособиях «Огни», и в адмиралтейских «Admiralty List of Lights and Fog Signals». В разделе «Special Remarks» («Специальные замечания») последних перечисляются государства, которые в отношении своих маяков используют на картах дальность видимости иную, чем номинальная. Одним из таких государств является Российская Федерация. Для российских маяков как на отечественных, так и на зарубежных картах указывается меньшая из двух величин: либо стандартная дальность видимости, либо географическая для высоты глаза 5 м. Однако при этом не конкретизируется — какая именно дальность видимости указывается. Для того чтобы определить вид дальности видимости, сначала необходимо, используя известную формулу [10],

$$D_r = 2,1(\sqrt{h} + \sqrt{e}), \quad (1)$$

определить географическую дальность видимости для высоты глаза 5 м

$$D_5 = 2,1(\sqrt{h} + \sqrt{5}) = 2,1\sqrt{h} + 4,7, \quad (2)$$

и сравнить ее с указанной на карте величиной. Если вычисленная по формуле (2) дальность будет совпадать с указанной на карте, то последняя является географической дальностью видимости для высоты глаза 5 м $D_k = D_5$. В противном случае на карте указана стандартная дальность видимости $D_k = D_{\text{ст}}$.

Для примера по формуле (2) рассчитаем географическую дальность видимости D_5 для двух маяков, расположенных на российском побережье южной части Балтийского моря — для маяка Обзорный ($h = 54$ м; $D_k = 20$ миль) и маяка Щукинский ($h = 50$ м; $D_k = 8$ миль). Для первого из них географическая дальность видимости равна 20,1 мили и практически совпадает с указанной на карте величиной. Следовательно, именно географическая дальность видимости маяка для высоты глаза 5 м указана на карте для маяка Обзорный. В свою очередь, для маяка Щукинский указана стандартная дальность видимости, так как величина, представленная на карте и равная 8 милям, значительно отличается от рассчитанной (19,5 миль).

Для определения фактической дальности видимости огней маяка (дальности открытия или закрытия) в случае, если на карте указана географическая дальность видимости D_5 , необходимо учесть фактическую высоту глаза наблюдателя, используя очевидную формулу [10]:

$$D_{\text{факт}} = D_{\text{к}} + 2,1\sqrt{e} - 4,7. \quad (3)$$

Однако во многих учебниках и учебных пособиях формула (3) по умолчанию распространяется на дальность видимости, указанную на карте, безразлично к виду этой дальности. И только в некоторых источниках указано, что если на морской навигационной карте указана стандартная дальность, то поправкой за высоту глаза наблюдателя ее исправлять не следует. Вместе с тем, для подтверждения или опровержения правомерности такого категоричного и одновременно интуитивного утверждения (гипотезы) необходимо провести некоторый анализ.

Рассмотрим ситуацию, когда оптическая дальность видимости маяка, полученная по указанной на карте стандартной, меньше дальности видимости горизонта с высоты маяка $D_{\text{гор}} = 2,1\sqrt{h}$, т. е. $D_{\text{опт}} < D_{\text{гор}}$ (рис. 1).

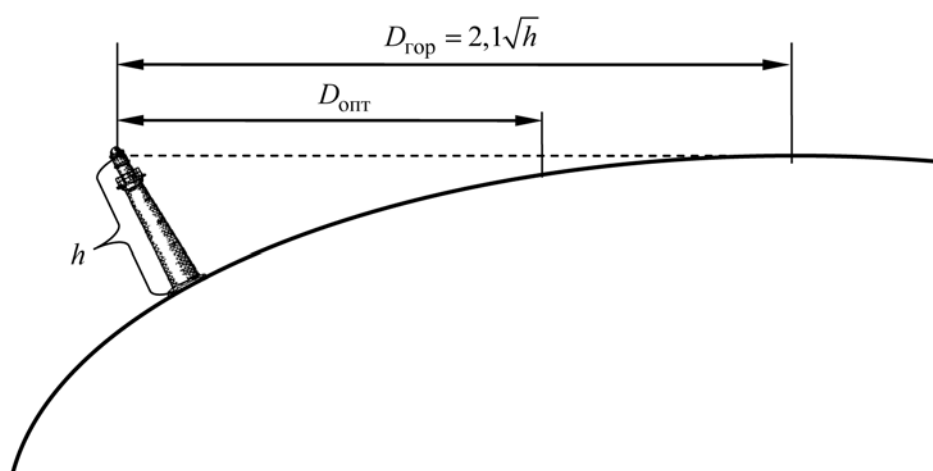


Рис. 1. Оптическая дальность видимости меньше дальности видимости горизонта с высоты маяка (высота глаза не учитывается)

Из рис. 2, построенного без учета кривизны земной поверхности, очевидно, что на заявленной дальности видимости маяк откроется только в случае, если его высота и высота глаза наблюдателя будут равны. В противном случае фактическая дальность видимости (дальность открытия или закрытия) будет определяться формулой

$$D_{\text{факт}} = \sqrt{D_{\text{опт}}^2 - (h - e)^2}. \quad (4)$$

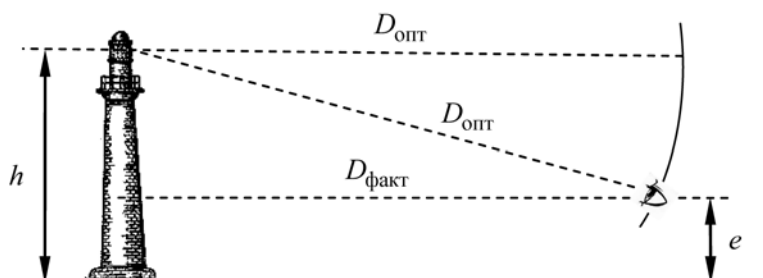


Рис. 2. Оптическая дальность видимости меньше дальности видимости горизонта с высоты маяка (к анализу необходимости учета высоты глаза наблюдателя)

Для оптической дальности видимости, равной 2 милям, разности $h - e = 100$, получим фактическую дальность видимости огней маяка, лишь в четвертом знаке отличающуюся от оптической.

Таким образом, с практической точки зрения действительно можно пренебрегать высотой глаза наблюдателя при расчете фактической дальности по дальности стандартной. Тем более нельзя использовать формулу (3), что является наиболее распространенной ошибкой.

В случае, когда оптическая дальность видимости маяка, полученная по указанной на карте стандартной, больше дальности видимости горизонта с высоты маяка, т.е. $D_{\text{опт}} > D_{\text{гор}}$, огни маяка откроются для наблюдателя на расстоянии $D_{\text{опт}}$, только если высота глаза будет больше некоторого критического значения $e_{\text{кр}}$, определяемого формулой

$$e_{\text{кр}} = \left(D_{\text{опт}} / 2,1 - \sqrt{h} \right)^2. \quad (5)$$

Например, для некоторого маяка А высотой 25 м и $D_{\text{опт}} = 14$ миль ($D_{\text{опт}} > D_{\text{гор}} = 2,1\sqrt{25} = 10,5$ мили) критическое значение высоты глаза будет равно 2,78 м. В противном случае ($e < e_{\text{кр}}$) фактическая дальность $D_{\text{факт}}$ видимости огней будет меньше $D_{\text{опт}}$ (рис. 3) на величину, равную

$$\Delta D = 2,1 \left(\sqrt{e_{\text{кр}}} - \sqrt{e} \right), \quad (6)$$

и, по сути, будет являться географической. Иными словами, даже указание на карте стандартной дальности видимости не освобождает судоводителя от обязанности определять вместе с оптической и географическую дальность видимости, а из них уже выбирать наименьшую.

Конечно, ситуация, когда высота глаза наблюдателя меньше 5 м, для современного судовождения являются редкостью, но исключать из анализа эту ситуацию нельзя.

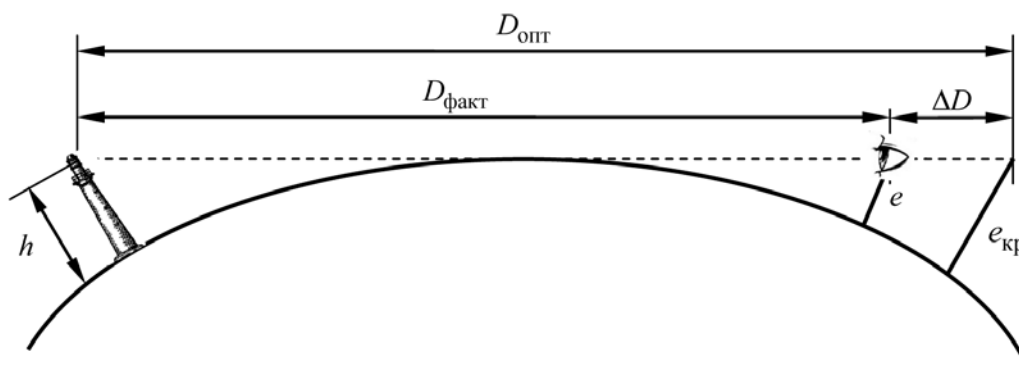


Рис. 3. Соотношение стандартной и фактической дальностей видимости при высоте глаза меньше критической

Так, для того же маяка А в случае фактической высоты глаза $e = 2,4 \text{ м} < e_{\text{кр}}$, получим:

$$\Delta D = 2,1 \left(\sqrt{2,78} - \sqrt{2,4} \right) = 0,5 \text{ мили}; D_{\text{факт}} = 14 - 0,5 = 13,5 \text{ мили}.$$

Очевидно, что при выполнении условия $D_{\text{опт}} > D_{\text{гор}}$ на карте указывается стандартная дальность видимости только тогда, когда критическое значение высоты глаза, соответствующее стандартной дальности, будет меньше 5 м. В противном случае ($e_{\text{кр.ст}} > 5 \text{ м}$) стандартная дальность видимости больше географической, рассчитанной для высоты глаза 5 м, и на карте указывается последняя. Однако это совсем не означает, что для перехода к фактической дальности видимости во всех случаях можно использовать формулу (3). Из этой же формулы, как и из геометрических построений, следует, что с увеличением высоты глаза увеличивается и географическая дальность видимости маяка. Вместе с тем, при превышении фактической высоты глаза рассмотренного выше критического значения $e_{\text{кр}}$ географическая дальность видимости $D_{\text{г}}$, рассчитанная по формуле (3), будет больше оптической дальности видимости $D_{\text{опт}}$ (рис. 4). В этом случае, несмотря на то, что на карте будет указана географическая дальность видимости для высоты глаза 5 м, дающая возможность по формуле (3) получить географическую дальность видимости для фактического значения высоты глаза, огни маяка откроются на расстоянии, равном оптической дальности видимости.

Например, для некоего маяка Б высотой 20 м, у которого $D_{\text{опт}} = 16$ миль ($e_{\text{кр}} = 9,9$ м), на карте будет указана географическая дальность видимости для высоты глаза 5 м, которая равна 14 милям. Для высоты глаза 14 м по формуле (3) получаем $D_{\text{г}} = 17,2$ мили, но, очевидно, что огни маяка Б откроются только на расстоянии 16 миль.

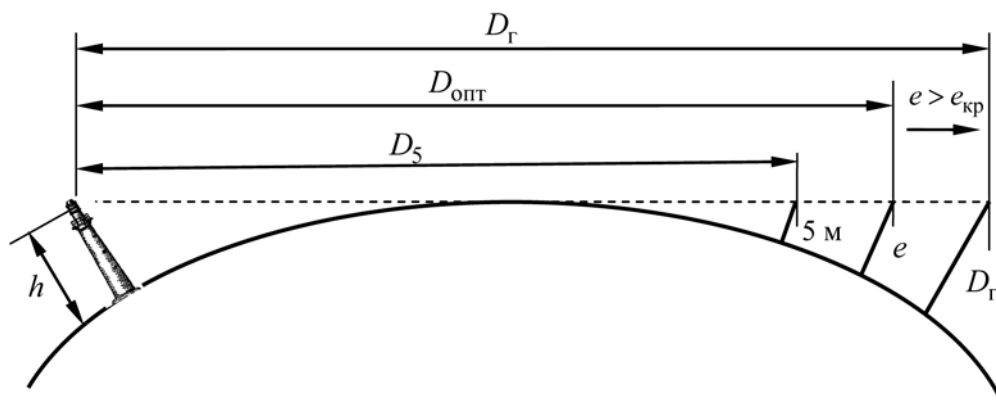


Рис. 4. Соотношение географической и оптической дальностей видимости при высоте глаза больше критической

Географическая дальность видимости $D_{\text{г}}$, указанная на карте, и оптическая дальность видимости $D_{\text{опт}}$ связаны соотношением

$$D_{\text{опт}} = D_{\text{г}} + 2,1\sqrt{e_{\text{кр}}} - 4,7. \quad (7)$$

Кроме того, метеорологическая (для одной и той же акватории) и, следовательно, оптическая (для огней одного и того же маяка) дальности видимости могут иметь различные значения. При этом реальная оптическая дальность видимости в разное время может быть как меньше географической дальности видимости (то есть определять фактическую дальность видимости), так и больше ее. Т. е., даже при указании на карте географической дальности видимости для высоты глаза 5 м фактическая дальность видимости может определяться оптической дальностью видимости. Однако в таком случае в распоряжении судоводителя информация об оптической дальности видимости маяка будет отсутствовать, так как ему не будет известна стандартная дальность видимости. В итоге судоводитель не будет иметь возможности определить фактическую дальность открытия или закрытия маяков.

Таким образом, возможны четыре случая:

1) стандартная дальность видимости меньше географической дальности видимости, рассчитанной для высоты глаза 5 м (на карте указана первая), а рассчитанная по стандартной оптической дальности видимости меньше дальности видимости горизонта с высоты маяка — для определения фактической дальности видимости необходимо использовать непосредственно стандартную дальность видимости без исправления ее на высоту глаза;

2) стандартная дальность видимости меньше географической дальности видимости, рассчитанной для высоты глаза 5 м (на карте указана первая), а рассчитанная по стандартной оптической дальности видимости больше дальности видимости горизонта с высоты маяка — для определения фактической дальности видимости необходимо рассчитать как оптическую дальность видимости, так и географическую дальность видимости и выбрать из них наименьшую;

3) стандартная дальность видимости больше географической дальности видимости, рассчитанной для высоты глаза 5 м (на карте указана последняя), а оптическая дальность видимости меньше географической, рассчитанной для фактической высоты глаза (фактическая высота глаза меньше критической) — для определения фактической дальности видимости необходимо использовать формулу (3);

4) стандартная дальность видимости больше географической дальности видимости, рассчитанной для высоты глаза 5 м (на карте указана последняя), а оптическая дальность видимости больше географической, рассчитанной для фактической высоты глаза (фактическая высота глаза больше критической) — фактическая дальность видимости определяется оптической, но вычислить последнюю не представляется возможным.

Таким образом, указанная на карте величина географической дальности видимости не дает судоводителю возможности различить третий и четвертый случаи и корректно определить фактическую дальность видимости маяка. Вместе с тем, очевидно, что открытие огней маяка на расстоянии, отличном от ожидаемого (рассчитанного) судоводителем может дезориентировать последнего и крайне негативного сказаться на навигационной безопасности плавания судна. Кроме того, существуют и иные проблемы, обусловленные неоднозначностью указанных на картах дальностей видимостью российских маяков. Так, многообразие номенклатуры используемых на картах дальностей видимости приводит к тому, что в пособиях или даже в пределах одной карты (практически для находящихся рядом маяков) указываются дальности видимости различного вида с разными алгоритмами расчета фактической дальности видимости. Это также может привести к грубой ошибке судоводителя при определении величины $D_{\text{факт}}$.

Единственным эффективным способом решения проблемы многообразия указанных на картах дальностей видимости является их унификация через указание для всех маяков номинальной дальности видимости. Тогда алгоритм расчета дальности видимости фактической становится простым и однозначным:

1) по номинальной дальности видимости с использованием объявленной метеорологической дальности видимости определяется оптическая дальность видимости;

2) по высоте маяка и высоте глаза наблюдателя определяется географическая дальность видимости;

3) из двух определенных величин наименьшая принимается за фактическую дальность видимости.

Здесь наиболее рациональным форматом записи дальности видимости видится формат, используемый на современных английских морских навигационных картах, где перед номинальной дальностью видимости указывается высота маяка. Это избавит процедуру определения фактической дальности видимости от необходимости обращения к пособиям и сделает его более оперативным.

Во всяком случае, пока для российских маяков дальности видимости на картах указываются по изложенным консервативным правилам, судоводитель при оценке или расчете фактической дальности видимости по указанной на карте величине должен обязательно принимать во внимание все описанные особенности. Также необходимо заметить, что при планировании перехода судоводитель не имеет точных сведений о метеорологической дальности видимости, а, значит, и не может точно определить фактическую дальность видимости огней маяков. Однако по данным лоций, метеорологических прогнозов он может приблизительно оценить эти величины и позже скорректировать их, приблизив к фактическим условиям плавания.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Новиков В. Е. Учет динамики океана при планировании и выборе маршрута перехода судна: дис. ... канд. техн. наук / В. Е. Новиков. — СПб.: ГМА им. С. О. Макарова, 2006.
2. Мироненко А. А. Формирование маршрута судна в автоматизированных навигационных комплексах: дис. ... канд. техн. наук / А. А. Мироненко. — Новороссийск: НГМА, 2002.
3. Никулин А. Н. Теоретические основы дальности видимости объекта в атмосфере / А. Н. Никулин // Научные проблемы транспорта Сибири и Дальнего Востока. — 2010. — № 2. — С. 165–169.
4. Репин А. И. Особенности прохождения оптического излучения через атмосферу / А. И. Репин, С. К. Лебедев, Л. В. Попова // Вестник Московского государственного университета приборостроения и информатики. Серия: Приборостроение и информационные технологии. — 2010. — № 29. — С. 39–46.

5. Махоткина Е. Л. Мониторинг прозрачности атмосферы: результаты измерений за последние десятилетия (обзор) / Е. Л. Махоткина, И. Н. Плахина // Труды Главной геофизической обсерватории им. А. И. Воейкова. — 2014. — № 572. — С. 57–88.

6. Дорофеев В. В. Наклонная дальность видимости в сложных метеорологических условиях: дис. ... д-ра техн. наук / В. В. Дорофеев. — Воронеж: Гидрометеорологический научно-исследовательский центр РФ, 2007.

7. Паршуков В. А. Оценка точности вычисления рефракции в атмосфере по данным высотных метеозмерений / В. А. Паршуков // Радиотехника и электроника. — 2009. — Т. 54. — № 2. — С. 172–176.

8. Гайкович К. П. Определение атмосферной рефракции при измерениях с различными трассами луча / К. П. Гайкович, М. Б. Черняева // Известия высших учебных заведений. Радиофизика. — 2000. — Т. 43. — № 4. — С. 304–309.

9. Кривошеин В. Н. Законы распределения значений метеорологической дальности видимости / В. Н. Кривошеин // Перспективы развития информационных технологий. — 2013. — № 16. — С. 60–66.

10. Дмитриев В. И. Навигация и лоция: учебник для вузов / В. И. Дмитриев, В. Л. Григорян, В. А. Катенин. — М.: Моркнига, 2009.

FEATURES OF DETERMINE THE ACTUAL RANGE OF LIGHTS VISIBILITY BY SHOWN ON THE MAP VALUE

Various kinds of diverse concepts of “range of visibility” used for the purpose of navigation: geographical, optical, standard, nominal, meteorological, actually were given. The rules used when specifying lights visibility on nautical charts and a variety of Russian and foreign lighthouses were described. Algorithms determine the actual range of visibility of lights Russian lighthouses by shown on the map value were analyzed.. The features of these algorithms and their limitations, are not allowed in some cases to determine the actual range of visibility by shown on the map a geographical range of visibility for the eye height of 5 m. It is proposed to change the content shown on the map information regarding the range of visibility Russian lighthouses by replacing the standard and geographical ranges of visibility on nominal range of visibility proposed by IALA and used on maps and manuals for foreign lighthouses, and the inclusion of this information to the height of the lighthouse.

Keywords: lighthouses, range of visibility, nautical chart.

REFERENCES

1. Novikov, V. E. “Uchet dinamiki okeana pri planirovanii i vybere marshruta perehoda sudna.” Candidate’s Dissertation in Technical Sciences. SPb.: GMA im. S.O. Makarova, 2006.

2. Mironenko, A. A. “Formirovanie marshruta sudna v avtomatizirovannyh navigacionnyh kompleksah.” Candidate’s Dissertation in Technical Sciences. Novorossiysk: NGMA, 2002.

3. Nikulin, A. N. “Theoretical foundations of the range of visibility in the atmosphere.” *Nauchnye problemy transporta Sibiri i Dalnego Vostoka* 2 (2010): 165-169.

4. Repin, A. I., S. K. Lebedev, and L. V. Popova. “Features of the optical radiation origin through the atmosphere.” *Vestnik Moskovskogo gosudarstvennogo universiteta priborostroenija i informatiki. Serija: Priborostroenie i informacionnye tehnologii* 29 (2010): 39-46.

5. Mahotkina, E. L., and I. N. Plahina. “Monitoring of the atmospheric transparency: results of the measurements during last decades.” *Trudy Glavnoj geofizicheskoy observatorii im. A.I. Voejkova* 572 (2014): 57-88.

6. Dorofeev, V. V. “Naklonnaja dalnost vidimosti v slozhnyh meteorologicheskikh usloviyah.” Doctoral Dissertation in Technical Sciences. Voronezh: Gidrometeorologicheskij nauchno-issledovatel'skij centr RF, 2007.

7. Parshukov, V. A. “Ocenka tochnosti vychislenija refrakcii v atmosfere po dannym vy-sotnyh meteozmerenij.” *Journal of Communications Technology and Electronics* 54.2 (2009): 172-176.

8. Gajkovich, K. P., and M. B. Chernyaeva. “Measurements of the atmospheric refraction using different ray paths.” *Radiophysics and Quantum Electronics* 43.4 (2000): 304-309.

9. Krivoshein, V. N. “Zakony raspredelenija znachenij meteorologicheskoy dalnosti vidimosti.” *Perspektivy razvitija informacionnyh tehnologij* 16 (2013): 60-66.

10. Dmitriev, V. I., V. L. Grigorjan, and V. A. Katenin. *Navigacija i locija: uchebnik dlja vuzov*. M.: Morkniga, 2009.

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРЕ

Ермаков Сергей Владимирович –
старший преподаватель.
«Балтийская государственная академия
рыбопромышленного флота» Федерального
бюджетного государственного образовательного
учреждения высшего профессионального
образования «Калининградский государственный
технический университет»
esv.klgd@mail.ru

INFORMATION ABOUT THE AUTHOR

Ermakov Sergey Vladimirovich –
Senior Lecturer.
«Baltic fishing fleet state academy»
of the federal state budgetary
educational institution of higher
professional education
«Kaliningrad state technical university»
(BFFSA)
esv.klgd@mail.ru

УДК 626.45

Т. Ю. Нычик

УПРАВЛЕНИЕ РИСКОМ АВАРИЙ И ТРАНСПОРТНЫХ ПРОИСШЕСТВИЙ В СУДОХОДНЫХ ШЛЮЗАХ

Процесс управления риском охватывает различные аспекты работы: от идентификации и анализа до оценки его допустимости и определения потенциальных возможностей снижения посредством выбора, реализации и контроля соответствующих управляющих действий. В данной статье рассмотрены вопросы управления риском аварий и транспортных происшествий в судоходных шлюзах, при этом в качестве основных критериев оптимизации рассматриваются вероятность возникновения аварии и ущерб, вызванный ее реализацией. Для решения поставленной задачи был использован метод целевой функции. В результате определено, что приоритетной остается задача выделения достаточных средств для снижения вероятности возникновения аварии перед материальными затратами на устранение последствий ущерба. Предложены мероприятия, направленные на повышение безопасности судопропуска, что позволит добиться эффективного снижения риска аварий.

Ключевые слова: судоходный шлюз, риск аварии, управление риском аварий.



ТОЧКИ зрения обеспечения безопасности плавания судов, зоны судоходных гидротехнических сооружений являются одними из наиболее сложных участков водных путей.

Опыт эксплуатации судоходных шлюзов показывает, что именно ворота в головах шлюза имеют наибольшую вероятность разрушения с последующим прорывом напорного фронта гидроузла (крупнейшие аварии на Пермском шлюзе 4 ноября 1994 г., на Константиновском шлюзе 1 ноября 2004 г. и др.). Таким образом, задача обеспечения безопасности плавания судов и составов в районе судопропускных гидротехнических сооружений приобретает в настоящее время весьма актуальное значение.

Согласно ст. 8 № 117-ФЗ от 23.07.1997 г. (с изм.) «О безопасности гидротехнических сооружений» [1], обеспечение безопасности гидротехнических сооружений (ГТС) осуществляется при помощи поддержания допустимого уровня риска аварий ГТС, что предполагает его периодическую оценку и анализ. В мультипликативном подходе риск R определяется как произведение вероятности Q реализации аварии и вероятного относительного ущерба M [2]:

$$R = Q \cdot M, \quad (1)$$

где R — количественная мера (степень) риска;

Q — вероятность возникновения аварии в шлюзе (определяется на основе анализа условий эксплуатации объекта или технической системы и обработки статистических данных об авариях [3]);

M — вероятный относительный ущерб от аварии.

Из формулы (1) следует, что риск аварии как критерий, характеризующий условия шлюзования, может быть оценен через вероятность возникновения аварийной ситуации или через относительный ущерб, вызванный их следствием.

Задача эффективного управления риском аварийной ситуации в судоходных шлюзах через ущерб может быть решена несколькими альтернативными способами. Рассмотрим некоторые из них:

- определение оптимального количества судопропусков при равных условиях шлюзования; при этом показатель риска оценивается через возможные потери средств, затраченных на шлюзование с учетом возможного ущерба в случае аварии или транспортного происшествия;
- определение оптимального размера судна, инициирующего аварию или транспортное происшествие с наименьшей вероятностью;
- определение минимально возможного числа шлюзований с максимальной загрузкой камеры шлюза.

Согласно данным источников [5] – [7], метод целевой функции является одним из наиболее корректных методов определения показателя риска при решении задач управления и позволяет достаточно точно учесть особенности ранее изложенных способов оптимизации.

В статической постановке целевая функция риска $L(r)$ рекомендована в работе [5] в следующем виде:

$$L(c) = \frac{c_0(1-W(c_k))}{S} + \frac{[(kM_v + gN_v) - m(c_1)] \cdot W(c_k)}{kM_{\max} + gN_{\max}}, \quad (2)$$

где c_0 — затраты на создание технической системы (объекта);

$W(c_k)$ — вероятность возникновения аварии или транспортного происшествия, значения которых определяются средствами c_k , затрачиваемыми на предотвращение их возникновения;

M_v — прогнозируемый ущерб материальным ценностям и окружающей природной среде;

N_v — прогнозируемые людские потери в размерности выбранных финансовых средств;

c_1 — затраты на обеспечение безопасности системы (снижение ожидаемого ущерба);

c_k — средства, выделяемые на предотвращение аварий и транспортных происшествий;

k, g — коэффициенты приведения стоимостных показателей ущерба и потери населения к единой мере;

$m(c_1)$ — функция предотвращенного ущерба, значение которой определяется выделяемыми средствами c_1 :

$$m(c_1) = km_v(c_m) + gn_v(c_N) \propto, \quad (3)$$

где $m_v(c_m)$ — предотвращенный материальный ущерб;

$n_v(c_N)$ — предотвращенный ущерб вследствие людских потерь;

$$c_1 = c_m + c_N; \quad (4)$$

S — потенциальная платежная способность собственника ГТС или лица, ответственного за принятие решения,

$$S \geq c_0 + c_m + c_N + c_k. \quad (5)$$

Вероятность негативного воздействия на среду обитания $W(c_k)$ может быть представлена в виде зависимости от надежности исследуемой технической системы:

$$W(c_k) = W(c_x) \cdot [1 - P(c_y)], \quad (6)$$

где $W(c_x)$ — вероятность развития аварии (отказа, поломки) технической системы или технологического процесса в чрезвычайную ситуацию, значение которой зависит от объема средств c_x , выделенных на локализацию аварии;

$P(c_y)$ — надежность (вероятность безотказной работы) технической системы или технологического процесса, значение которой зависит от средств c_y , выделенных на повышение надежности.

Допустим, что зависимость величины ущерба при аварии или транспортном происшествии в шлюзе, при шлюзовании n судов имеет квадратичную форму. Тогда целевую функцию риска можно представить в следующем виде:

$$L(r) = \frac{\left[1 - (1 - W_1)^{N/n} \cdot (nc + n^2 S) + c_c \frac{N}{n} \right]}{N(c + NS + c_c)}, \quad (7)$$

где $\frac{N}{n}$ — число шлюзований;

$c_c \frac{N}{n}$ — прямые затраты на шлюзование n судов.

Числитель целевой функции (7) характеризует вероятные потери средств, определяемые числом судов n определенного типа, а знаменатель — величину потенциально возможных затрат.

В формализованном виде задача состоит в выборе такого целочисленного n из числа возможных N , при котором значение функции риска (7) будет минимальным. Ограничения, накладываемые на аргументы целевой функции, очевидны.

Рассмотрим конкретный пример. Допустим, что в навигацию по шлюзованному водному пути необходимо пропустить N тыс. судов. Будем полагать, что речь идет о шлюзовании различных типов судов: судов грузоподъемностью 5 тыс. тонн, сухогрузных судов, нефтеналивных судов, составов судов, пассажирских судов. На шлюзование каждого судна затрачивается сумма c . В результате аварии или транспортного происшествия судно наносит конструкции судопропускного сооружения некоторый ущерб, который оценивается величиной S . Затраты на шлюзование одного судна составляют c_c и не зависят от числа шлюзующихся судов. Авария или транспортное происшествие в шлюзе, инициируемые судном, согласно [3], происходят со средней вероятностью Q .

Значение критерия риска (для рассматриваемого случая) будет соответствовать доле ожидаемых потерь от их максимально возможной величины. Следовательно, постановка задачи поиска минимума $L(r)$ адекватна минимизации доли возможных потерь в случае аварии в шлюзе или ее отсутствия. Принимая выражение средств в условных финансовых единицах: $c = 20$, $c_c = 15$, $S = 5000$, $N = 10\,000$, $Q = 0,00015$, получим следующие значения критерия риска в зависимости от количества судов при одном шлюзовании, приведенные в таблице и на рисунке.

Расчетные значения критерия риска, затрат на шлюзование и ожидаемых затрат на ликвидацию последствий аварий

Число одновременно шлюзуемых судов n	Число шлюзований N/n	Вероятность аварийной ситуации при шлюзовании Q	Показатель риска $L(r)$	Прямые затраты на пропуск одного судна	Затраты на ликвидацию последствий аварии
1	10000	0,00010	0,0000030	150000	5000000
2	5000	0,00040	0,0000015	150000	2500000
3-optimum	3333	0,00090	0,0000011	150000	1666667
4	2500	0,00160	0,0000009	150000	1250000
5	2000	0,00250	0,0000009	150000	1000000

Анализ целевой функции $L(r)$, при решении поставленной задачи позволяет сделать следующие выводы:

— при стремлении вероятности возникновения аварии к нулю величина функции риска стремится к затратам на создание и поддержание технической системы;

– при стремлении вероятности возникновения аварии к единице значение показателя риска определяется вторым слагаемым, т. е. относительным ущербом.

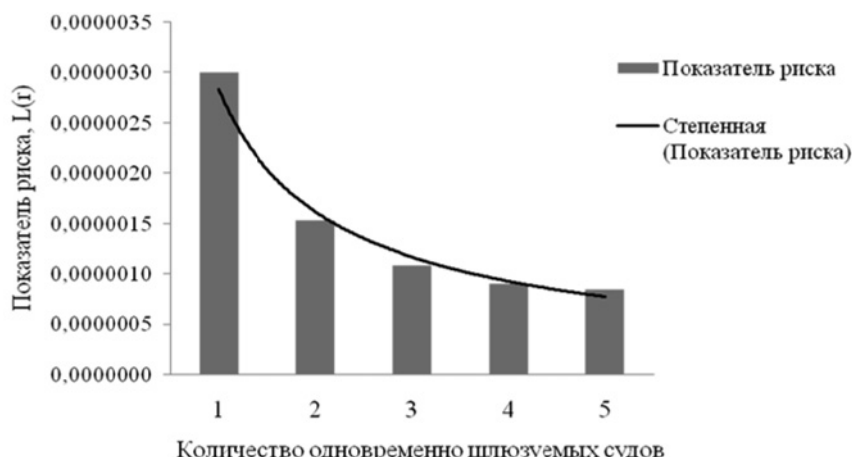


Диаграмма изменения показателя риска от числа одновременно шлюзуемых судов

Анализ целевой функции показал, что при одновременном шлюзовании нескольких судов будет обеспечиваться минимизация риска аварий и транспортных происшествий в судоходных шлюзах, а следовательно, снизится и количество средств, выделяемых на ликвидацию последствий аварийных ситуаций. Вместе с тем минимизации риска аварий в судоходных шлюзах может способствовать проведение следующих мероприятий общего и специального назначения, направленных на повышение безопасности судопропуска.

1. *Общие мероприятия, направленные на повышение надежности конструкций судоходных шлюзов:*

- проведение постоянного мониторинга оценки технического состояния элементов судопропускных сооружений гидроузлов [8];
- разработка организационно-технических решений, направленных на повышение надежности работы электрооборудования и систем автоматического управления процессами шлюзования [9];
- разработка методов оперативного манипулирования режимами открытия затворов с учетом допускаемых усилий и типоразмеров шлюзуемых судов [10], [11];
- привлечение инвестиций в сферу водного транспорта для возможности реализации мероприятий по повышению безопасности эксплуатации судопропускных гидротехнических сооружений [8].

2. *Специальные мероприятия, направленные на повышение безопасности судопропуска:*

- разработка технических решений, обеспечивающих защиту конструкций ворот шлюзов, повреждение которых связано с навалами судов [12];
- создание различных систем регулирования движения судов, исключающих навалы судов на конструкции сооружения [13];
- обеспечение флота России квалифицированными кадрами.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. ФЗ от 21 июля 1997 г. № 117-ФЗ «О безопасности гидротехнических сооружений» (с изм.). — <http://base.consultant.ru/cons/cgi/online.cgi?req=doc;base=LAW;n=183024> (Дата обращения 25.09.2015 г.).
2. СТП ВНИИГ 210.02.НТ-04. Методические указания по проведению анализа риска аварий гидротехнических сооружений. — СПб., 2005. — 87 с.
3. Нычик Т. Ю. Анализ аварийных ситуаций при шлюзовании судов / Т. Ю. Нычик // Журнал университета водных коммуникаций. — 2011. — № 4. — С. 105–112.

4. Нычик Т. Ю. Навалы судов на ворота шлюзов / Т. Ю. Нычик // Труды II межвузовской науч.-практ. конф. студентов и аспирантов. — СПб.: СПбГУВК, 2010. — С. 25–32.
5. Спицын Ю. Г. Оценка риска в социально-экономической и техногенной сферах / Ю. Г. Спицын, В. В. Яковлев. — СПб.: Нестор, 2000. — 60 с.
6. Яковлев В. В. Экологическая безопасность, оценка риска: монография / В. В. Яковлев. — СПб.: СПбГПУ, 2007. — 399 с.
7. РД 03-418-01. Методические указания по проведению анализа риска опасных производственных объектов. — СПб., 2002.
8. Злобин И. Н. Целевые индикаторы и ресурсное обеспечение мероприятий по повышению безопасности судоходных гидротехнических сооружений в рамках ФЦП «Развитие транспортной системы Российской Федерации (2010 – 2015 гг.) / И. Н. Злобин, Т. А. Пантина, Н. Ф. Цанева // Безопасность речных судоходных сооружений: материалы междунар. науч.-практ. конф., посвящ. 100-летию гидротехн. лаб. им. проф. В. Е. Тимонова. — СПб.: СПбГУВК, 2005. — С. 70–80.
9. Муравьев В. Обеспечение безопасного функционирования судоходных гидротехнических сооружений / В. Муравьев // Речной транспорт (XXI век). — 2005. — № 1. — С. 61–63.
10. Рахматулин Н. М. Натурные, теоретические и лабораторные исследования волнового движения воды в судоходных сооружениях: автореф. дис. ... д-ра техн. наук: указать номер спец. / Н. М. Рахматулин. — Новосибирск, 1974. — 41 с.
11. Расчеты рациональных графиков подъема затворов для шлюзов ББК: отчет о НИР: 75-952 / Ленингр. ин-т водного транспорта; рук. В. А. Раев; исполн.: В. А. Раев [и др.]. — Л., 1975. — 45 с. — № ГР 75043333.
12. Колосов М. А. Локализация аварийных ситуаций и ликвидация последствий аварий на судоходных гидротехнических сооружениях: выписка из науч.-техн. отчета / М. А. Колосов. — СПб.: СПбГУВК, 2003. — 45 с.
13. Колосов М. А. Информационно-предупредительная система защиты ворот от навала судов / М. А. Колосов, В. Несветаев // Доклады и сообщения на науч.-практ. конф. «Обеспечение безопасности и надежности судоходных гидротехнических сооружений». — Ростов н/Д, 2008. — С. 119–122.

RISK MANAGEMENT OF ACCIDENTS AND TRAFFIC EVENTS IN NAVIGATION LOCK

The process of risk management covers various aspects of the work from identification and analysis to assess of its admissibility and determination of the potential of reduction using selection, implementation and monitoring of appropriate control actions. This article describes how to manage the risk of accidents and accidents in the navigation locks. At the same time the probability of an accident and damage caused by its implementation are considered as the main criteria of optimization. To solve this problem we used the method of objective function. As a result, it is determined that the task of allocating of sufficient resources to reduce the probability of an accident before the material costs for eliminating of the consequences of the damage remains foreground. The actions directed on increase of safety of locking that will allow to achieve effective decrease in risk of accidents are offered

Keywords: navigation lock, accident risk, risk management.

REFERENCES

1. Russian Federation. Federal law № 117. 23 July 1997. “O bezopasnosti gidrotehnicheskikh sooruzhenij” (with changes) — <http://base.consultant.ru/cons/cgi/online.cgi?req = doc;base = LAW;n=183024> (date of the application 25.09.2015 г.).
2. Russian Federation. Standard of enterprise “VNIIG” № 210.02.NT-04. Metodicheskie ukazaniya po provedeniju analiza riska avarij gidrotehnicheskikh sooruzhenij. SPb., 2005.
3. Nychik, T. Ju. “Analysis of accidents when locking.” *Zhurnal universiteta vodnykh kommunikacij* 4 (2011):105–112.
4. Nychik, T. Ju. “Navaly sudov na vorota shljuzov.” *Trudy II mezhvuzovskoj nauchno-prakticheskoy konferencii studentov i aspirantov*. SPb.: FGOU VPO SPGUVK, 2010: 25–32.
5. Spicyn, Ju. G., and V. V. Jakovlev. *Ocenka riska v socialno-jekonomicheskoy i tehnogennoj sferah*. SPb.: Nestor, 2000.

6. Jakovlev, V. V. *Jekologicheskaja bezopasnost, ocenka riska: monografija*. SPb.: SPbGPU, 2007.
7. Russian Federation. Regulatory Document RD 03-418-01. Metodicheskie ukazaniya po provedeniju analiza riska opasnyh proizvodstvennyh objektov. SPb., 2002.
8. Zlobin, I.N., T. A. Pantina, and N. F. Caneva. "Celevyje indikatory i resursnoe obespechenie meroprijatij po povysheniju bezopasnosti sudohodnyh gidrotehnicheskikh sooruzhenij v ramkah FCP «Razvitie transportnoj sistemy Rossijskoj Federacii (2010- 2015 gg.).»" *Bezopasnost rechnyh sudohodnyh sooruzhenij: materialy mezhdunarodnoj nauchno- prakticheskoy konferencii, posvjashhennoj 100-letiju gidrotehnicheskoy laboratorii im. professora V.E. Timonova*. SPb.: SPGUVK, 2005: 70–80.
9. Muravev, V. "Obespechenie bezopasnogo funkcionirovaniya sudohodnyh gidrotehnicheskikh sooruzhenij." *River transport (XXIst century)* 1 (2005): 61–63.
10. Rahmatulin, N. M. Naturnye, teoreticheskie i laboratornye issledovaniya volnovogo dvizheniya vody v sudohodnyh sooruzhenijah: avtoreferat na soiskanie uchenoj stepeni doktora tehnikeskikh nauk. Novosibirsk, 1974.
11. Raev, V. A., M. I. Erpichev, A. M. Kovalenko, V. V. Balanin, and P. B. Gorodenskij. *Raschety racional'nyh grafikov podema zatvorov dlja shljuzov BBK: pod. ruk. Raeva V.A. Otchet po nauchno – issledovatel'skoj teme №75 – 952. L.: LIVT, 1975.*
12. Kolosov, M. A. *Lokalizacija avarijnyj situacij i likvidacija posledstvij avarij na sudohodnyh gidrotehnicheskikh sooruzhenijah: vypiska iz nauchno–tehnikeskogo otcheta*. SPb.: SPGUVK, 2003.
13. Kolosov, M. A., and V. Nesvetaev. "Informacionno-predupreditelnaja sistema zashhity vorot ot navala sudov." *Doklady i soobshhenija na nauchno-prakticheskoy konferencii «Obespechenie bezopasnosti i nadezhnosti sudohodnyh gidrotehnicheskikh sooruzhenij»*. Rostov-na-Donu, 2008: 119–122.

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРЕ

Нычик Татьяна Юрьевна – аспирант.
ФГБОУ ВО «Государственный университет
морского и речного флота
имени адмирала С.О. Макарова»
Научный руководитель:
Колосов Михаил Александрович, доктор
технических наук, профессор
tatyana-nychik@mail.ru

INFORMATION ABOUT THE AUTHOR

Nychik Tatiana Yurevna —
postgraduate student.
The Admiral Makarov state university
of maritime and inland shipping
Supervisor:
Kolosov Mikhail Aleksandrovich —
Doctor of Engineering, professor
tatyana-nychik@mail.ru

СУДОСТРОЕНИЕ И СУДОРЕМОНТ

УДК 625.12:539.4

А. Б. Красюк,
В. Б. Чистов

ДЕФЕКТАЦИЯ И РЕМОНТ ЛИСТОВ ЛЕДОВОГО ПОЯСА ЛЕДОКОЛОВ РЕЧНОГО ФЛОТА

Статья посвящена поиску резервов использования несущей способности пластин обшивки ледового пояса ледоколов, эксплуатирующихся с классом Российского речного регистра. В процессе эксплуатации речных ледоколов на отдельных листах бортовой обшивки отмечен повышенный местный износ, что вызывает необходимость замены данных листов и существенно увеличивает стоимость ремонта.

В статье обосновано использование расчетных значений допускаемых остаточных толщин листов ледового пояса по критериям общего износа и местного износа вместо допускаемых значений, рекомендуемых Правилами Российского Речного Регистра. Использование при дефектации расчетных допускаемых остаточных толщин предусматривает также изменения подхода к дефектации корпуса судна. Применение разработанной методики определения допускаемых толщин расчетным путем позволит существенно сократить затраты на ремонт и способствует более полному использованию несущей способности пластин бортовой обшивки.

Ключевые слова: судно, корпус, ледокол, ледовый пояс, местный износ, общий износ, остаточная толщина.

НА ледоколах смешанного плавания отмечен повышенный износ ледового пояса в узкой зоне, шириной до 0,5 м, и судовладельцу предлагается заменить этот пояс по длине средней части судна, так как толщина его меньше допускаемой остаточной толщины $[t_{\text{ост}}]$ для всего листа ледового пояса [1] – [3]. Правила освидетельствования судов в эксплуатации (ПОСЭ) [1] устанавливают допускаемую остаточную толщину на отдельном участке листа $[t_{\text{ост}}^{\text{м}}]$.

Определим остаточную толщину листа на участке с повышенным износом, при котором разрушение на этом участке не будет происходить. Дефектуемый лист и схема разрушения наиболее изношенных участков показаны на рис. 1.

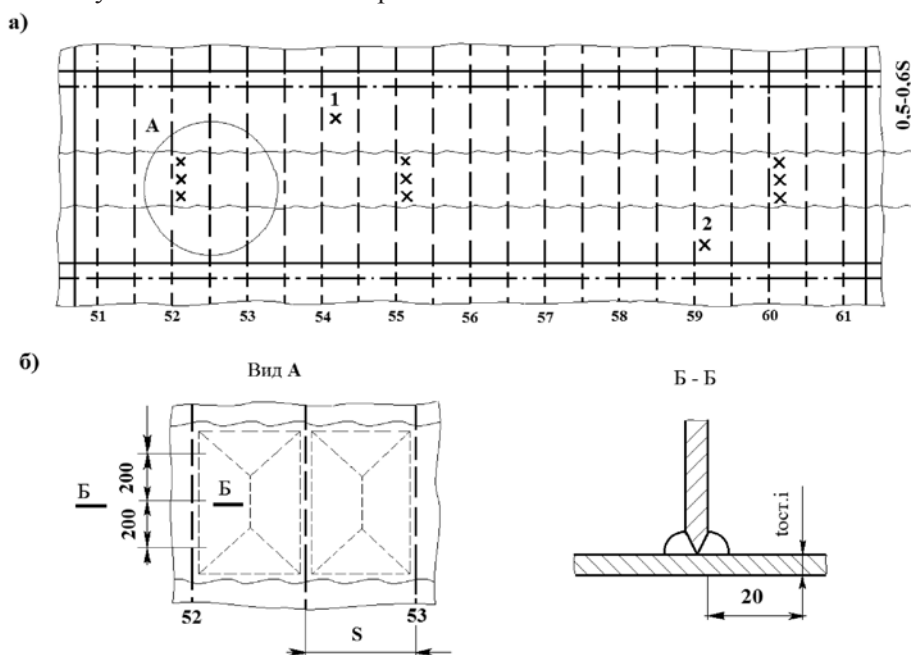


Рис. 1. Дефектуемый лист и схема разрушения наиболее изношенных участков:

а — дефектуемый лист; б — схема разрушения наиболее изношенных участков;

— граница наиболее изношенной части листа; × — точки измерения остаточной толщины листа

Предельная равномерно-распределенная нагрузка для такой схемы разрушения предложена профессором Л. М. Беленьким [4] и определяется по формуле

$$q_0 = \alpha \cdot \frac{M_0}{a^2} \text{ (кг/см}^2\text{)}, \quad (1)$$

где $\alpha = \frac{48}{(\sqrt{v^2 + 3} - v)^2}$ — безразмерный коэффициент; $v = \frac{a}{b}$ — отношение короткой стороны прямоугольника к длинной; $M_0 = \sigma_t \cdot \frac{t^2}{4}$ — предельный изгибающий момент на 1 см длины пластического шарнира; σ_t — предел текучести материала, кг/см²; t — толщина обшивки, см.

После перевода в систему СИ получим

$$q_0 = \alpha \cdot R_{eH} \cdot \frac{t^2}{4} \cdot \frac{1}{a^2}, \text{ МПа}, \quad (2)$$

где t — толщина обшивки, м; a — длина короткой стороны пластины, м; R_{eH} — предел текучести материала, МПа.

Для ледоколов по Правилам постройки судов внутреннего плавания РРР (ПСВП) [2], расчетное давление на обшивку ледового пояса в носовом районе, МПа:

$$p_n = 1,4 + 0,004D^{1/4} \cdot P^{1/3}, \quad (3)$$

где D — водоизмещение судна при осадке по конструктивную ватерлинию, кН; P — суммарная мощность на гребных валах, кВт.

Расчетное давление льда на обшивку ледового пояса, МПа:

– в среднем районе

$$p_c = 0,60 \cdot p_n; \quad (4)$$

– в кормовом районе

$$p_k = 0,75 \cdot p_n. \quad (5)$$

Толщина обшивки ледового пояса в соответствии с ПСВП [2], [5] должна быть, мм, равна

$$t = 720s \sqrt{\frac{p}{R_{eH}}}, \quad (6)$$

где p — расчетное давление льда, МПа, по (3), (4) или (5); s — расстояние между балками набора, м.

Допускаемая толщина отдельного листа в эксплуатации определяется по [1]

$$[t_{\text{ост}}] = 0,8t. \quad (7)$$

Допускаемая толщина на участке листа с повышенным износом, определяемая также по [1], составит

$$[t_{\text{ост}}^M] = 0,85[t_{\text{ост}}]. \quad (8)$$

Допускаемую остаточную толщину на участке с повышенным износом (мм) найдем из условия, что расчетное давление на обшивку ледового пояса по (3), (4) или (5) равно предельному, определенному по формуле (2) с учетом запаса на износ на период между освидетельствованиями. С учетом сказанного получим

$$[t_{\text{ост}}] = 10^3 s \sqrt{\frac{4p}{\alpha \cdot R_{eH}}} + C_p \cdot \Delta T, \quad (9)$$

где $[t_{\text{ост}}]$ — допускаемая средняя остаточная толщина на участке с местным износом, мм; C_p — расчетная скорость изнашивания на участке ледового пояса с повышенным износом, ΔT — период времени в годах между освидетельствованиями листа.

Допускаемую остаточную толщину на участке с повышенным местным износом можно представить в виде

$$[t_{\text{ост}}^{\text{м}}] = t_{\text{пред}}^{\text{м}} + C_p \cdot \Delta T, \quad (10)$$

а предельную местную остаточную толщину как

$$t_{\text{пред}}^{\text{м}} = \frac{b}{s} \sqrt{\frac{4}{\alpha}} \cdot 10^3 \cdot s \cdot \sqrt{\frac{p}{R_{eH}}} \quad \text{при } b > s. \quad (11)$$

Предельную местную остаточную толщину найдем из условия, что при действии расчетной нагрузки P (МПа) разрушение на участке пластины шириною b не будет происходить ранее, чем от этой нагрузки будет разрушаться вся пластина. Схема разрушения пластины на отдельных участках размером $b \times s$, где s — меньшее расстояние между балками набора пластины, b — пространство участка разрушения вдоль длинной стороны пластины, показана на рис. 2, а.

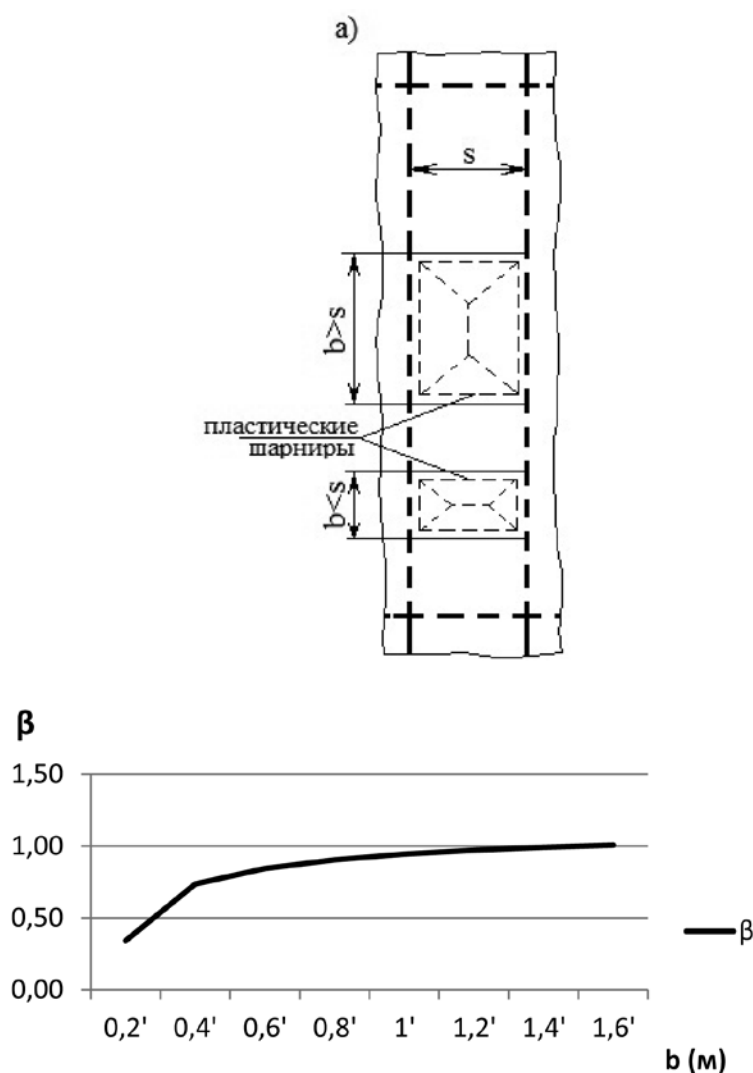


Рис. 2. Разрушение пластины на отдельных участках при действии предельной нагрузки q_0 :
а — возможные схемы разрушения; б — значения коэффициента уменьшения допускаемой толщины на участке, где может произойти разрушение

Используя выражения (7), (10) и (11) можно представить зависимость для определения предельной местной остаточной толщины, при которой не будет происходить разрушение на отдельном участке до того, как наступит предельное состояние во всей пластине.

$$t_{\text{пред}}^{\text{м}} = \beta ([t_{\text{ост}}^{\text{м}}] - C_p \cdot \Delta T); \quad (12)$$

$$\beta = \sqrt{\frac{\alpha_{\text{пл}}}{\alpha_{\text{м}}}} \quad \text{при } b > s; \quad \beta = \frac{b}{s} \sqrt{\frac{\alpha_{\text{пл}}}{\alpha_{\text{м}}}} \quad \text{при } b < s, \quad (13)$$

где $\alpha_{\text{пл}}$ и $\alpha_{\text{м}}$ — безразмерные коэффициенты из формулы (1) для всей пластины и для отдельного ее участка.

Значения коэффициента уменьшения допускаемой остаточной толщины на участке, где может произойти разрушение, при длине пластины 1,5 м показаны на рис. 2, б.

При дефектации листа определение его остаточной толщины выполняется следующим образом [6] — [8]:

- измеряется остаточная толщина листа в двух точках вне зоны с повышенным износом в середине поля пластины, как это показано на рис. 1, а (точки 1 и 2);
- измеряются остаточные толщины в зоне с повышенным износом, по три точки у трех шпангоутов, как показано на рис. 1, б;
- определяется средняя остаточная толщина $t_{\text{ост}}$ по формуле

$$t_{\text{ост}} = \frac{1}{3} \left(t_{\text{изм.1}} + t_{\text{изм.2}} + \frac{1}{9} \sum_{i=3}^{11} t_{\text{изм.}i} \right); \quad (14)$$

- определяется средняя остаточная толщина в зоне с повышенным износом $t_{\text{ост}}^{\text{м}}$ по формуле

$$t_{\text{ост}}^{\text{м}} = \frac{1}{9} \sum_{i=3}^{11} t_{\text{изм.}i}. \quad (15)$$

Лист ледового пояса наружной обшивки в средней части ледокола считается годным и не требует ремонта, если выполняются два условия (16) и (17):

$$t_{\text{ост}} \geq 0,8 t_{\text{пр}}. \quad (16)$$

Средняя толщина листа, определенная по формуле (14), больше допускаемой, определенной по формуле (7).

$$t_{\text{ост}}^{\text{м}} \geq 0,85 [t_{\text{ост}}]. \quad (17)$$

При ширине пояса с повышенным износом, определенным по графику на рис. 2, не более $b = 0,7$ м.

$$t_{\text{ост}}^{\text{м}} \geq 0,5 t_{\text{пр}}. \quad (18)$$

При ширине пояса с повышенным износом, определенным по графику на рис. 2, не более $b = 0,2$ м.

Значения допускаемой остаточной толщины в зависимости от ширины пояса с повышенным износом показаны в табл. 1.

Таблица 1

Допускаемая остаточная толщина в зоне с повышенным износом

b	0,2	0,3	0,4	0,5	0,6	0,7
$[t_{\text{ост}}^{\text{м}}]$	$0,5 t_{\text{пр}}$	$0,52 t_{\text{пр}}$	$0,58 t_{\text{пр}}$	$0,64 t_{\text{пр}}$	$0,67 t_{\text{пр}}$	$0,68 t_{\text{пр}}$

Для ледокола «Капитан Крутов» допускаемую остаточную толщину пластины или ее части можно определить по формуле (9), используя следующие данные [9] – [11]:

- основные размерения: длина между перпендикулярами $L = 71$ м; ширина $B = 16,3$ м; осадка $T = 3,5$ м; водоизмещение $D = 2463$ т;
- мощность силовой установки $N = 3 \cdot 1440$, кВт;
- расстояние между основными и промежуточными шпангоутами $s = 0,3$ м;

- предел текучести материала корпуса в зонах ледовых усилений $R_{eH} = 315$ МПа;
- проектная толщина обшивки ледового пояса $t_{пр} = 12,5$ мм;
- скорость изнашивания листов ледового пояса наружной обшивки C_p принимается по зависимостям Правил РРР [2]

$$C_p = (1 + 1,65\gamma)C = (1,0 + 1,65 \cdot 0,40) \cdot 0,10 = 0,166, \text{ мм/год.}$$

Причем, коэффициент вариации составляет $\gamma = 0,51 - 1,06C = 0,40$.

Средняя скорость изнашивания по табл. 2.1.16 (ПССП часть I «Корпус») равна $C = 0,10$, мм/год.

Полученная расчетом $C_p = 0,166 > C_{max} = 0,13$, мм/год, зафиксированной при дефектации корпуса на участках с повышенным износом.

Расчетное давление на пластину ледового пояса в средней части судна по Правилам РРР (зависимость 3) равно

$$P_c = 0,60 (1,4 + 0,004 (9,81 \cdot 2463)^{1/4} (3 \cdot 1440)^{1/3}) = 1,327, \text{ МПа.}$$

После подстановки данных по л/к «Капитан Крутов» в зависимости (9), (10) и (11) получим значения допускаемой остаточной толщины всего листа и значения допускаемой остаточной толщины листа на отдельных участках ледового пояса в средней части. В табл. 2 приведены значения допускаемых остаточных толщин для всего листа и для участков с повышенным износом.

Таблица 2

Остаточные толщины листов ледового пояса ледокола «Капитан Крутов»

Остаточная толщина	Допускаемая по расчету, мм	Допускаемая ПОСЭ, мм	Минимальное фактическое значение в 2011 г. (2015 г.)*, мм
Средняя для листа	9,5	10,0	10,0 (9,6)
На участке при $b \leq 0,5$ м	7,8	8,5	8,3 (7,9)
На участке при $b \leq 0,3$ м	6,5	8,5	8,3 (7,9)

* значения остаточных толщин в 2015 г. определены расчетным путем с учетом возможного износа с момента последней дефектации в 2011 г.

Из табл. 2 видно, что остаточные толщины ледового пояса ледокола «Капитан Крутов» удовлетворяют требованиям Правил РРР, а использование рассчитанных нормативов дает возможность продлить эксплуатацию корпуса без замены участков с повышенным износом не только до следующего очередного освидетельствования, но и на пять лет после него.

Заключение

Предложенное обоснование допустимой остаточной толщины листов ледового пояса показало, что она может быть существенно уменьшена. Данное уменьшение допустимой остаточной толщины позволит еще длительное время эксплуатировать ледоколы без замены участков листов ледового пояса с повышенным износом.

Это позволяет получить только по ледоколу «Капитан Крутов» экономию материала в размере 3,7 т (в сумме 131 673 тыс. руб.), труда 804,5 норм. час. Общая экономия затрат на ремонт корпуса ледокола, представляющая собой часть стоимости ремонтных работ, связанная исключительно с заменой листов ледового пояса с повышенным износом, равна 347 163 тыс. руб. При расчетах трудоемкости, себестоимости и стоимости ремонтных работ были использованы данные ЗАО «Канонерский судоремонтный завод». В расчетах себестоимости не были учтены расходы, связанные с использованием судоподъемного сооружения (дока), так как стоимость услуг дока зависит от общего количества суток докования и нет прямой связи между данным показателем и объемами замены участков ледового пояса с повышенным износом.

Тем не менее, если определяющим фактором в объеме ремонтных работ по ледоколу будет именно замена листов ледового пояса, то следует ожидать также и снижения экономических потерь судовладельца от простоя судна и оплаты судоподъемного сооружения.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Российский речной регистр: в 4 т. / Правила освидетельствования судов в эксплуатации (ПОСЭ). — М.: Изд-во «По Волге», 2008. — Т. 1. — 112 с.
2. Российский речной регистр: в 4 т. / Правила классификации и постройки судов внутреннего плавания (ПСВП). — М.: Изд-во «По Волге», 2008. — Т. 2, Ч. I. «Корпус». — 452 с.
3. Российский речной регистр: в 4 т. / Правила классификации и постройки судов смешанного (река-море) плавания (ПССП). — М.: Изд-во «По Волге», 2008. — Т. 4. — 317 с.
4. Беленький Л. М. Расчет судовых конструкций в пластической стадии / Л. М. Беленький. — Л: Судостроение, 1983. — 448 с.
5. Барышников С. О. Об оптимальном сроке службы корпуса судна / С. О. Барышников, А. Б. Березина, В. Б. Чистов // Научно-технические ведомости СПбГПУ. — 2011. — № 1 (117). — С. 234–244.
6. Чистов В. Б. Анализ влияния погрешностей при определении остаточных толщин на прочностные характеристики пластин обшивок и настилов корпусов судов / В. Б. Чистов, А. Б. Красюк, М. Г. Пеликова // Журнал университета водных коммуникаций. — 2013. — № 2. — С. 58–66.
7. Красюк А. Б. Методологические основы дефектации стальных корпусов судов / А. Б. Красюк, В. Б. Чистов // Журнал университета водных коммуникаций. — 2013. — № 3 (19). — С. 87–93.
8. Красюк А. Б. Влияние погрешностей в определении остаточных толщин элементов корпусных конструкций на общую прочность корпуса судна / А. Б. Красюк // Вестник Государственного университета морского и речного флота имени адмирала С. О. Макарова. — 2013. — № 2 (21). — С. 70–77.
9. Расчет прочности и определение допустимых остаточных толщин корпуса л/к «Капитан Крутов» (класс «ХМ-СП 3,5 (ледокол) А»). — № 1105/КК/11-01: отчет о НИР. — СПб.: СПГУВК, 2011.
10. Расчет прочности л/к «Капитан Крутов» (класс «ХМ-СП 3,5 (ледокол) А»). — № 1105/КК/11.09-02: отчет о НИР. — СПб.: СПГУВК, 2011.
11. Ремонт и расчет элементов ледового пояса корпуса л/к «Капитан Крутов» при его эксплуатации в классе «ХМ-СП 3,5 (ледокол) А». — № 1105/КК/11-02: отчет о НИР. — СПб.: СПГУВК, 2011.

DEFECT DETECTION AND REPAIR OF ICE BELT SHEETS FOR INLAND WATER ICEBREAKERS

The article is devoted to the search for reserves of using the bearing capacity of the ice belt plating of icebreakers operated with the class of the Russian River Register. In the operation of river icebreakers on separate plates the side shell is marked increased local wear, which causes the need to replace these plates and significantly increases the cost of repair.

The article substantiates the use of the calculated values of permissible residual thickness of the ice belt sheets according to the criteria of local and general wear, instead of allowed values recommended by the Rules of the Russian River Register. Using while inspecting the calculated permissible residual thickness also provides for changes in approach to defect detection of the ship hulls elements. Using of the developed method of determining the permissible thickness by calculation will significantly reduce maintenance costs and enhances the use of the bearing capacity of the side shell plates.

Keywords: ship, ship's hull, icebreaker, ice belt, local wear, general wear, the residual thickness.

REFERENCES

1. The Russian River Register / Rules for the inspection of operation (CSE) / Volume 1. M.: On the Volga, 2008: 112 p.
2. The Russian River Register / Rules for classification and construction of inland waterway vessels (PSVP) / Volume 2, Part I «housing». M.: On the Volga, 2008: 452 p.
3. The Russian River Register / classification rules and construction of mixed (river-sea) (OADs) / Volume 4. M.: On the Volga, 2008: 317 p.
4. Belenky, L. *Calculation of ship structures in the plastic stage*. L: Shipbuilding, 1983: 448 p.
5. Baryshnikov, S. O., A. B. Berezina, and V. B. Tchistov. "On the optimal service life of the hull." *Scientific and technical statements STU* 1(117) (2011): 234–244.

6. Tchistov, V. B., A. B. Krasnyuk, and M. G. Pelikova. "Analysis of errors impact on the strength characteristics of the ship's hull plates and decks in determination of residual thickness." *Journal of University of Water Communications* 2 (2013): 58–66.
7. Krasnyuk, A. B., and V. B. Tchistov. "Methodological outlines of the defect detection of the vessels steel hulls." *Journal of University of Water Communications* 3(19) (2013): 87–93.
8. Krasnyuk, A. B. "Influence of errors in the determination of the residual thickness of elements of hull structures on the total strength of the ship's hull." *Vestnik gosudarstvennogo universiteta morskogo i rechnogo flota imeni admirala S. O. Makarova* 2 (21) (2013): 70–77.
9. The calculation of the strength and determination of the permissible residual thickness of the hull structures for the icebreaker «Captain Krutov» (class «XM-SP 3.5 (ice-breaker) A»). №1105 / СК / 11-01. St. Petersburg: SPGUVK, 2011. (research report).
10. The calculation of the strength of the icebreaker «Captain Krutov» (class «XM-SP 3.5 (ice-breaker) A»). №1105 / СК / 11-09-02. St. Petersburg: SPGUVK, 2011. (research report).
11. Repair and calculation of elements of the ice belt for the icebreaker «Captain Krutov» at its operation in the class «XM-SP 3.5 (ice-breaker) A». №1105 / СК / 11-02. St. Petersburg: SPGUVK, 2011. (research report).

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

Красюк Алла Борисовна —
кандидат технических наук, доцент.
ФГБОУ ВО «ГУМРФ имени
адмирала С. О. Макарова»
krasyuk_a_b@mail.ru
Чистов Валентин Борисович —
доктор технических наук, профессор.
ФГБОУ ВО «ГУМРФ имени
адмирала С. О. Макарова»
ChistovVBgumrf.ru

INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Krasyuk Alla Borisovna —
Candidate of Engineering,
associate professor.
Admiral Makarov State University
of Maritime and Inland Shipping
krasyuk_a_b@mail.ru
Tchistov Valentin Borisovitch —
Doctor of Engineering, professor.
ChistovVBgumrf.ru

УДК 629.12

М. П. Лебедева,
А. Б. Васильева,
Т. Н. Инютина

ГИДРОДИНАМИЧЕСКИЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ КОРПУСА СУДНА С ПЛОСКОЙ ВЕРТИКАЛЬНОЙ СТЕНКОЙ

В работе приводятся результаты анализа экспериментального исследования сил и моментов взаимодействия модели голого корпуса судна и плоской вертикальной стенки. Эти данные необходимы для решения задач управления судном в процессе швартовки и при движении в узкости.

Экспериментальное исследование гидродинамических характеристик было выполнено в начале 1990-х гг. в циркуляционном бассейне ЦНИИ им. акад. А. Н. Крылова. Тогда работа была приостановлена за неимением технических средств. Как показал обзор литературы, несмотря на то, что с момента выполнения исследований прошло более 20 лет, новой информации по вопросу о взаимодействии корпуса судна со стенкой не появилось. Ввиду того, что задача о динамике движения судна в узкости по-прежнему остается актуальной и по-прежнему ее корректное решение невозможно из-за отсутствия данных о гидродинамических характеристиках, приостановленная работа была продолжена. Обработанные данные и результаты их анализа, дающие возможность оценить количественно силы и моменты на голом корпусе судна, обусловленные влиянием плоской вертикальной стенки, приведены в статье.

Ключевые слова: гидродинамическое взаимодействие, эксперимент, модель судна, плоская стенка, угол разворота.

ВВЕДЕНИЕ

Эффект «присасывания» пришвартованного судна или при прохождении около стенки известен. Возникновение этой силы из-за отсутствия времени и возможности ее парирования может привести к катастрофическим последствиям. Для прогнозирования поведения судна в экстремальных условиях необходимо знать силы и моменты взаимодействия (гидродинамические характеристики взаимодействия).

Экспериментальные исследования гидродинамических характеристик взаимодействия начались во второй половине XX в. Выяснилось, что указанная сила определяется большим количеством параметров, к числу которых относятся наклон стенки, расстояние от стенки, глубина фарватера, направление движения судна. К числу первых работ можно отнести работы [1] – [4]. Во всех работах диаметральной плоскости остается параллельной стенке. Введение дополнительного параметра, определяющегося как угол разворота диаметральной плоскости относительно стенки, существенно увеличивает объем испытаний. Между тем, судно может оказаться развернутым на произвольный угол и при этом двигаться параллельно стенке. Например, в случае швартовки судна в условиях ветра или при проходе судна у стенки на малых скоростях.

В настоящее время, в связи с развитием вычислительных средств и появления судовых тренажеров, а также для прогнозирования параметров движения появилась необходимость в достоверном описании гидродинамических характеристик взаимодействия. Анализ результатов экспериментального исследования гидродинамических характеристик взаимодействия при произвольных углах разворота модели относительно стенки стал целью настоящей работы.

1. ПОСТАНОВКА ЗАДАЧИ

Задача об определении гидродинамических характеристик взаимодействия выполнялась в квазистатической постановке, что типично для задач о движении водоизмещающих судов. Силы и моменты взаимодействия определялись как разность полной силы и момента, измеряемых на корпусе модели вблизи стенки, и соответствующих им значений на изолированной модели. В условиях опытового бассейна стенку удобнее выполнять в виде плоской пластины и буксировать ее вместе с моделью судна. Результаты эксперимента будут соответствовать натурному судну при его маневрировании в условия течения. Распространить этот результат на случай маневрирования около неподвижной стенки можно при предположении о малой толщине пограничного слоя на стенке по сравнению с величиной зазора между судном и стенкой.

Другой особенностью рассматриваемой задачи является введение в качестве дополнительного параметра угла ϑ между диаметральной плоскостью модели и стенкой. Угол ϑ совпадает по величине с углом дрейфа модели, если вектор скорости перемещения центра тяжести судна параллелен стенке. Одновременная буксировка модели и стенки автоматически обеспечивает условие параллельности вектора скорости и стенки. Таким образом, результат определения гидродинамических характеристик применим для случая $V_y \ll V_x$.

При анализе результатов необходимо помнить, что диапазон возможных значений углов ϑ зависит от расстояния центра тяжести модели от стенки.

2. МОДЕЛЬ И МЕТОДИКА ПРОВЕДЕНИЯ ЭКСПЕРИМЕНТА

Экспериментальное исследование гидродинамических характеристик было выполнено в начале 1990-х гг. в циркуляционном бассейне ЦНИИ им. акад. А. Н. Крылова. Тогда работа была приостановлена за неимением технических средств. Довести работу до конца оказалось возможным только в настоящее время. Эксперимент выполнялся на комплексе, состоящем из модели судна и плоской пластины, имитирующей стенку. Моделью судна была схематизированная модель танкера. Моделью стенки была вертикальная пластина, жестко прикрепленная к кабине поворотного буксировочного устройства (ПБУ). Модель устанавливалась на внешнем по отношению к центру ПБУ радиусе. Измерения выполнялись с помощью трехкомпонентного динамометра. Главные размеры модели:

Длина, м	$L = 1,98$
Ширина, м	$B = 0,397$
Осадка, м	$T = 0,117$
Коэффициент общей полноты	$C_b = 0,764$

Эскиз корпуса модели приведен на рис. 1.

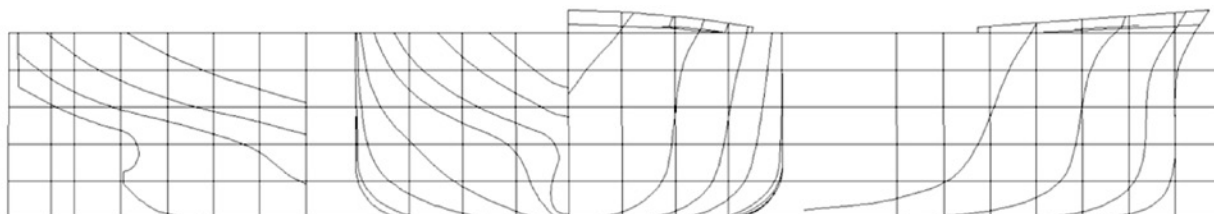


Рис. 1. Эскиз корпуса модели

Длина плоской пластины вдвое превышала длину модели. Заглубление пластины под свободную поверхность в четыре раза превышало осадку модели. Радиус буксировки составлял 30 м (14,5 длин корпуса модели), что позволяло считать параметры движения соответствующими прямому курсу. Несмотря на то, что траектория буксировки имела малую кривизну, при обработке результатов выполнялась их корректировка, позволяющая исключить влияние кривизны траектории полностью. По условиям прочности и с целью снижения волнообразования плоской пластины скорость буксировки модели была снижена до $V = 0,6$ м/с при углах разворота модели ($-45^\circ \leq \vartheta \leq +45^\circ$), что соответствовало числу Фруда $Fn = 0,14$ и до $V = 0,4$ м/с при углах разворота модели ($-50^\circ \leq \vartheta \leq +130^\circ$). Для парирования масштабного эффекта, обусловленного малыми значениями числа Рейнольдса, была искусственно увеличена шероховатость поверхности корпуса модели [5] — [7].

3. СИСТЕМА КООРДИНАТ

Измерения сил и моментов и их анализ выполнялись в поточной системе координат (рис. 2).

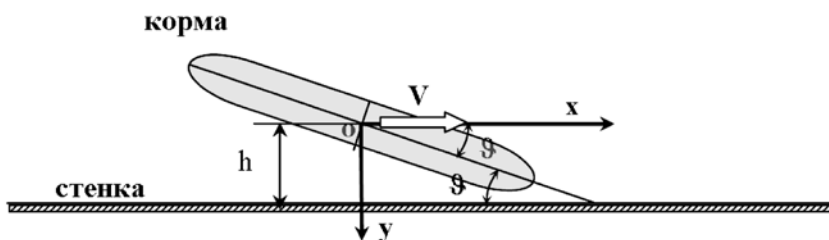


Рис. 2. Система координат

Положительными считались (см. рис. 2): ось X , направленная вдоль стенки в правую сторону, если смотреть на палубу модели сверху; ось Y , направленная в сторону стенки; момент, разворачивающий модель по часовой стрелке, если смотреть на палубу модели сверху. Силы на корпусе считались положительными, если они действовали в направлении координатных осей. Момент, действующий по часовой стрелке, считался положительным, если смотреть на палубу модели сверху. Угол ϑ между диаметральной плоскостью модели и стенкой, равный углу между осью X и диаметральной плоскостью, считался положительным при отсчете от оси X в сторону диаметральной плоскости. Поскольку комплекс модель-стенка был жестко связан с буксировочной тележкой, угол дрейфа модели и угол ее разворота относительно стенки совпадали.

Область определения гидродинамических характеристик была разделена на две подобласти: подобласть малых и подобласть больших углов дрейфа. К области малых углов дрейфа относи-

лись углы, при которых модель была развернута на угол, не превышающий $\pm 45^\circ$ от направления вектора скорости. Остальные положения модели относились к области больших углов дрейфа. Необходимость такого разделения была обусловлена различными требованиями к точности измерений. За поперечное расстояние модели h принималось расстояние между центром тяжести модели и стенкой. Относительное расстояние между центром тяжести модели и стенкой определялось как отношение $\bar{h} = h / B$. Величина h варьировалась от 2,5 до 0,5 ширины корпуса. Диапазоны значений изменяемых параметров изменялись в зависимости от расстояния до стенки (табл. 1).

Таблица 1

Диапазоны значений параметров буксировки

$\bar{h}$	Носом вперед	Носом к стенке	Кормой вперед	Кормой к стенке	Носом вперед
	диапазоны значений углов дрейфа				
2,5	$0^\circ \leq \vartheta \leq 45^\circ$	$50^\circ \leq \vartheta \leq 130^\circ$	$135^\circ \leq \vartheta \leq 225^\circ$	$230^\circ \leq \vartheta \leq 310^\circ$	$315^\circ \leq \vartheta \leq 360^\circ$
2,1	$0^\circ \leq \vartheta \leq 25^\circ$	—	$155^\circ \leq \vartheta \leq 205^\circ$	—	$335^\circ \leq \vartheta \leq 360^\circ$
1,6	$0^\circ \leq \vartheta \leq 15^\circ$	—	$165^\circ \leq \vartheta \leq 195^\circ$	—	$345^\circ \leq \vartheta \leq 360^\circ$
1,3	$0^\circ \leq \vartheta \leq 10^\circ$	—	$170^\circ \leq \vartheta \leq 190^\circ$	—	$350^\circ \leq \vartheta \leq 360^\circ$
0,93	$0^\circ \leq \vartheta \leq 5^\circ$	—	$175^\circ \leq \vartheta \leq 185^\circ$	—	$355^\circ \leq \vartheta \leq 360^\circ$
0,62	$\vartheta = 0^\circ$	—	$\vartheta = 180^\circ$	—	—

Как видно из таблицы, при значении $h_0 / B = 2,1$ и меньше диапазон возможных значений углов разворота модели уменьшается вследствие возникновения физического контакта между корпусом модели и стенкой.

4. СИЛЫ И МОМЕНТЫ НА ИЗОЛИРОВАННОМ КОРПУСЕ

Гидродинамические характеристики изолированной модели определялись в системе координат, связанной с моделью. Для определения сил и моментов при малых углах дрейфа использовались экспериментальные данные, полученные для той же модели танкера. Значения сил и моментов приводились к безразмерному виду по следующим формулам:

$$\sum C_x = \frac{X}{0,5\rho V^2 L T}; \quad (1)$$

$$\sum C_y = \frac{Y}{0,5\rho V^2 L T}; \quad (2)$$

$$\sum C_m = \frac{M}{0,5\rho V^2 L^2 T}; \quad (3)$$

где X , Y , M продольная и боковая составляющие сил, измеряемых во время эксперимента, V — скорость буксировки модели, ρ — плотность воды.

Значения безразмерных гидродинамических характеристик аппроксимировались полиномами вида (4) – (6) [8]:

– продольная составляющая силы

$$C_{xbh} = C_{xbh}^0 + C_{xbh}^{\bar{\omega}} \bar{\omega} + C_{xbh}^{\beta} \beta + C_{xbh}^{\bar{\omega}\bar{\omega}} \bar{\omega}^2 + C_{xbh}^{\beta\beta} \beta^2 + C_{xbh}^{\beta\bar{\omega}} \beta \bar{\omega} + C_{xbh}^{\beta\bar{\omega}^2} \beta \bar{\omega}^2 + C_{xbh}^{\bar{\omega}\bar{\omega}^2} \bar{\omega}^3 + C_{xbh}^{\beta\bar{\omega}\bar{\omega}^2} \beta \bar{\omega}^3; \quad (4)$$

– боковая составляющая силы

$$C_{ybh} = C_{ybh}^0 + C_{ybh}^{\bar{\omega}} \bar{\omega} + C_{ybh}^{\beta} \beta + C_{ybh}^{\bar{\omega}\bar{\omega}} \bar{\omega}^2 + C_{ybh}^{\beta\beta} \beta^2 + C_{ybh}^{\beta\bar{\omega}} \beta \bar{\omega} + C_{ybh}^{\beta\bar{\omega}^2} \beta \bar{\omega}^2 + C_{ybh}^{\bar{\omega}\bar{\omega}^2} \bar{\omega}^3 + C_{ybh}^{\beta\bar{\omega}\bar{\omega}^2} \beta \bar{\omega}^3; \quad (5)$$

– момент

$$C_{mbh} = C_{mbh}^0 + C_{mbh}^{\bar{\omega}} \bar{\omega} + C_{mbh}^{\beta} \beta + C_{mbh}^{\bar{\omega}\bar{\omega}} \bar{\omega}^2 + C_{mbh}^{\beta\beta} \beta^2 + C_{mbh}^{\beta\bar{\omega}} \beta \bar{\omega} + C_{mbh}^{\beta\bar{\omega}^2} \beta \bar{\omega}^2 + C_{mbh}^{\bar{\omega}\bar{\omega}^2} \bar{\omega}^3 + C_{mbh}^{\beta\bar{\omega}\bar{\omega}^2} \beta \bar{\omega}^3; \quad (6)$$

где $C^{\bar{\omega}}$, ..., $C^{\beta\bar{\omega}\bar{\omega}}$ — коэффициенты полиномов, рассчитанные по результатам аппроксимации экспериментальных данных; β — угол дрейфа модели; $\bar{\omega}$ — относительная кривизна траектории. Значения коэффициентов приведены в табл. 2.

Таблица 2

Значения коэффициентов для танкера

Коэффициенты полиномов	C_x	C_y	C_m
C^0	-0,0006	0	0
$C^{\bar{\omega}}$	-0,004	0,004	-0,042
C^{β}	-0,000175	0,00445	0,00275
$C^{\bar{\omega}\bar{\omega}}$	0,016	0,032	-0,032
$C^{\beta\beta}$	0,000001	0,0000484	0,000005
$C^{\beta\bar{\omega}}$	-0,00016	-0,0003	-0,00102
$C^{\beta\beta\bar{\omega}}$	0	0,00003	-0,00014
$C^{\beta\bar{\omega}\bar{\omega}}$	0	0,0044	-0,0014
$C^{\beta\beta\bar{\omega}\bar{\omega}}$	0	-0,00012	0,000192

Расчет гидродинамических характеристик при малых углах дрейфа выполнялся для постоянного значения относительной кривизны траектории буксировки модели $\bar{\omega} = 0,07$. Для определения гидродинамических характеристик изолированной модели при больших углах дрейфа использовалась методика Р. Я. Першица, изложенная в справочнике по теории корабля [1]. Соответствующие составляющие для гидродинамических сил на изолированном корпусе пересчитывались в поточную систему координат. Формулы для расчета имели вид

$$C_{Xbh} = C_{Xbh} \cdot \cos\theta + C_{Ybh} \cdot \sin\theta; \quad (7)$$

$$C_{Ybh} = C_{Xbh} \cdot \sin\theta - C_{Ybh} \cdot \cos\theta. \quad (8)$$

Расчет по методике [1] влияние кривизны не учитывал. Значения сил и моментов, определенные в поточной системе координат, показаны на рис. 3 – 5. Красными точками показаны значения для малых углов дрейфа, Синими точками показаны значения гидродинамических характеристик для больших углов дрейфа. Приведенные значения сил и моментов на корпусе изолированной модели использовались при определении силы и момента взаимодействия со стенкой.

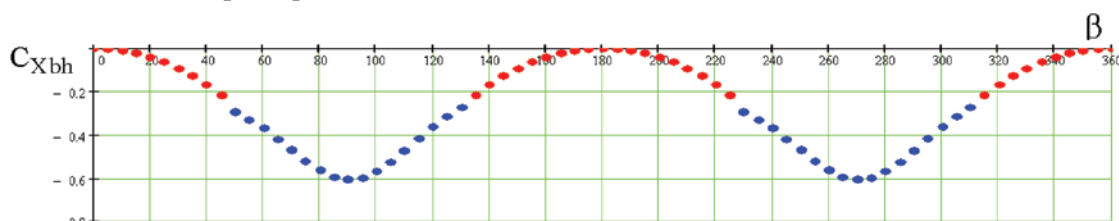


Рис. 3. Продольная составляющая силы на голом корпусе. Изолированная модель

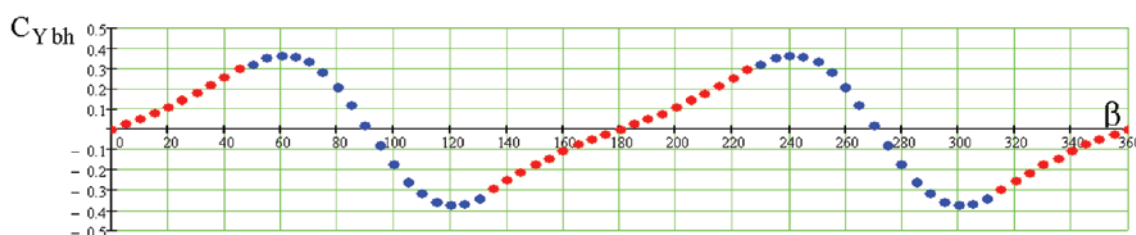


Рис. 4. Поперечная составляющая силы на голом корпусе. Изолированная модель

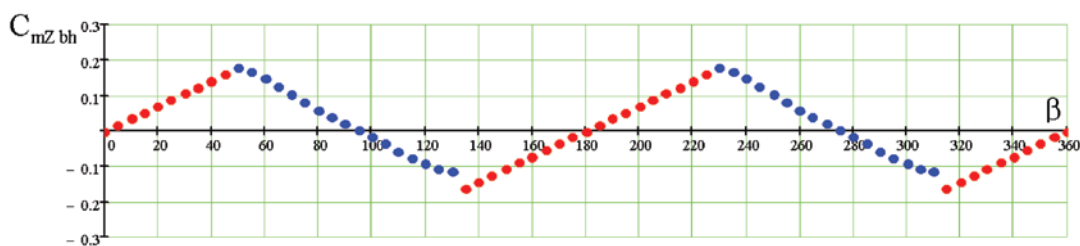


Рис. 5. Гидродинамический момент на голом корпусе. Изолированная модель

5. СИЛЫ И МОМЕНТЫ ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ

5.1. Влияние угла дрейфа на величину гидродинамических характеристик взаимодействия

Гидродинамические характеристики взаимодействия определялись формулами (9) – (11) как разность соответствующих компонентов, измеренных на изолированной модели и модели, расположенной вблизи стенки, т. е.

$$C_{Xin} = \sum C_X - C_{Xbh}; \quad (9)$$

$$C_{Yin} = \sum C_Y - C_{Ybh}, \quad (10)$$

$$C_{mZin} = \sum C_{mZ} - C_{mZbh}, \quad (11)$$

где $\sum C_X$, $\sum C_Y$, $\sum C_{mZ}$ — безразмерные продольная и боковая составляющие силы и безразмерный момент, определяемые по результатам измерений при буксировке модели со стенкой; C_{Xbh} , C_{Ybh} , C_{mZbh} — безразмерная продольная и боковая составляющие гидродинамической силы и безразмерный гидродинамический момент на изолированном корпусе.

Продольная составляющая силы взаимодействия (см. рис. 6). Из графика следует, что продольная составляющая силы взаимодействия знакопеременна, в отличие от продольной составляющей силы на изолированной модели (см. рис. 3). В диапазоне малых углов разворота она отрицательна, т.е. увеличивает продольную составляющую силы. В диапазоне больших углов разворота она положительна, и уменьшает значение продольной силы. Максимальные значения продольной силы при больших углах разворота находятся в тех же точках, что и для изолированной модели, и наблюдаются при движении носом к экрану — на 90° , и при движении кормой к экрану — на 270° . Максимальная величина безразмерной силы взаимодействия составляет $0,15 - 0,18$, что соответствует продольной силе на корпусе при угле дрейфа 30° .

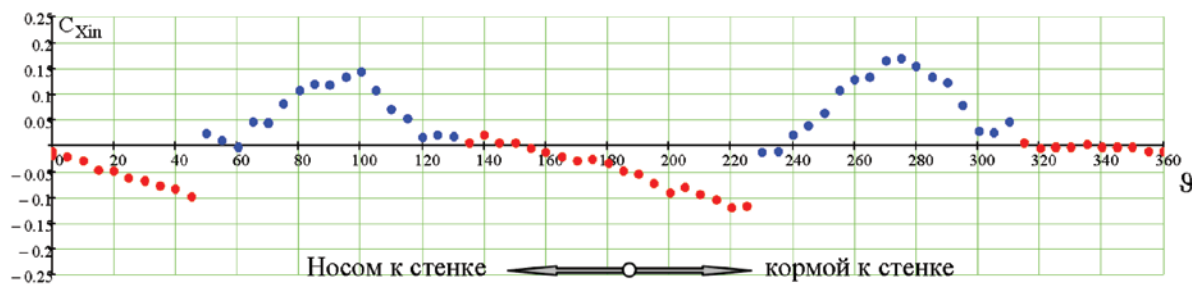


Рис. 6. Продольная составляющая силы на голом корпусе. Модель у стенки

Поперечная составляющая силы взаимодействия (рис. 7). Поперечная составляющая силы взаимодействия также знакопеременна. Однако если на изолированной модели поперечная

сила обращается в ноль при углах 90° , 180° , 270° (см. рис. 4), то на корпусе модели, расположенной вблизи стенки при углах 90° и 270° существуют локальные экстремумы. При малых углах разворота из-за влияния стенки возникает поперечная сила, отталкивающая модель от стенки. При углах разворота появляется сила «присасывания». По величине сила «присасывания» сопоставима с поперечной силой на изолированном корпусе при угле дрейфа 20° .

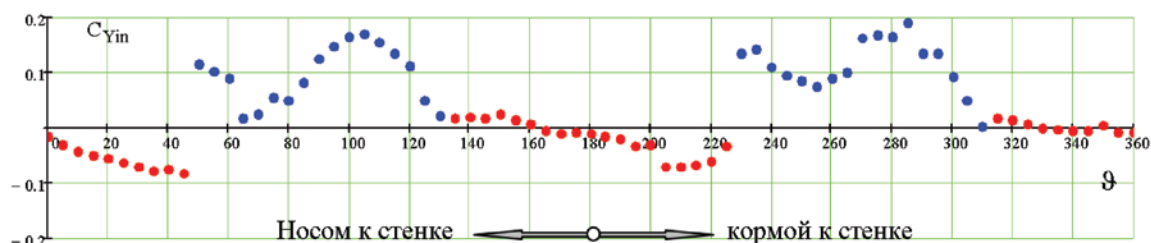


Рис. 7. Боковая составляющая силы на голом корпусе. Модель у стенки

Гидродинамический момент взаимодействия (рис. 8). Гидродинамический момент взаимодействия знакопеременен и имеет на промежутке $0^\circ - 360^\circ$ четыре экстремума.

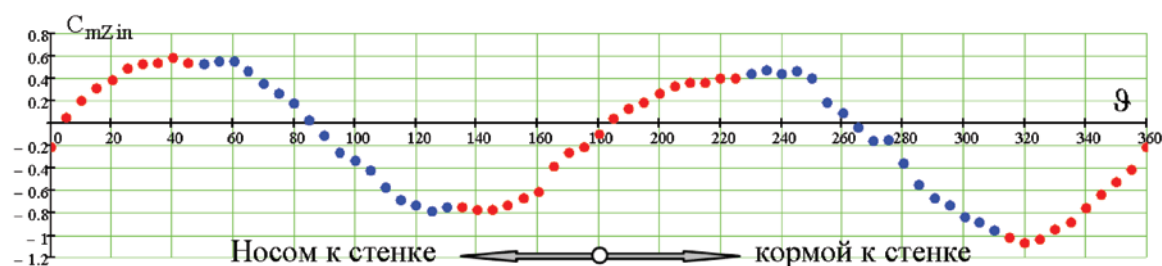


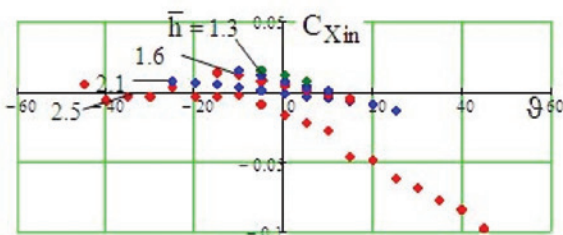
Рис. 8. Момент взаимодействия на голом корпусе. Модель у стенки

Максимальные значения безразмерного гидродинамического момента превосходят соответствующие значения гидродинамического момента на изолированной модели в два-четыре раза. Существенное увеличение момента наблюдается в момент, когда диаметральной плоскостью оказывается развернутой под углом 45° к экрану. Физическую причину столь резкого увеличения момента взаимодействия необходимо исследовать.

5.2. Влияние расстояния до стенки на величину гидродинамических характеристик взаимодействия

Влияние расстояния до стенки исследовалось только при малых углах разворота модели, что было обусловлено физическими ограничениями (рис. 9 – 11).

а)



б)

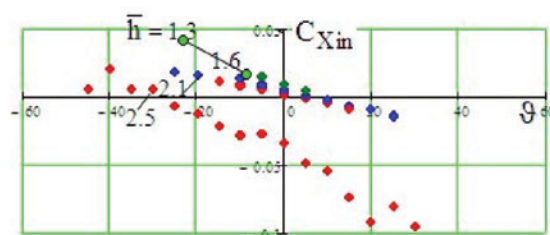
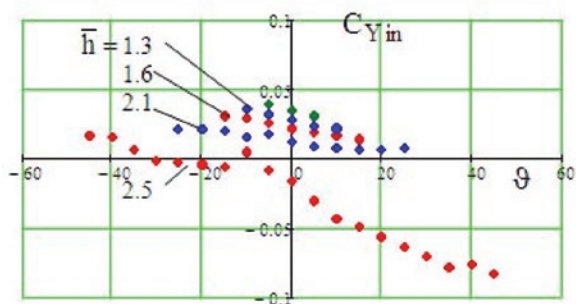


Рис. 9. Изменение продольной силы в зависимости от угла разворота модели при изменении расстояния до стенки:
а) носом вперед; б) кормой вперед

а)



б)

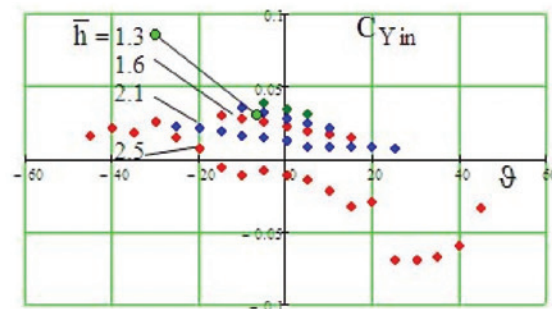
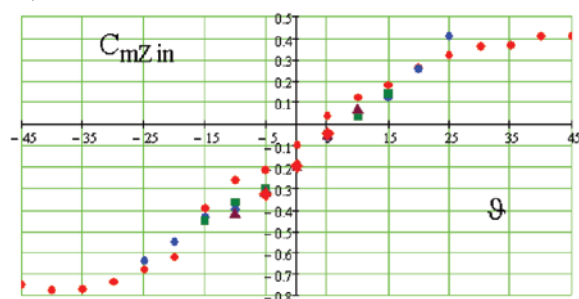


Рис. 10. Изменение поперечной силы в зависимости от угла разворота модели при изменении расстояния до стенки:
а) носом вперед; б) кормой вперед

а)



б)

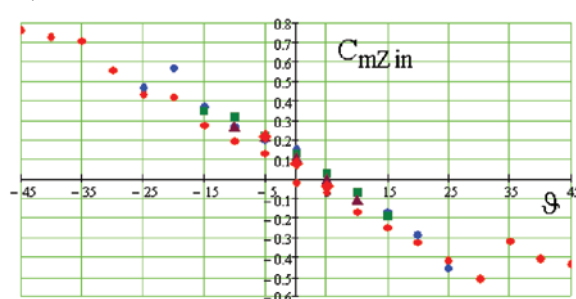


Рис. 11. Изменение гидродинамического момента в зависимости от угла разворота модели при изменении расстояния до стенки:
а) носом вперед; б) кормой вперед

Продольная и поперечная составляющие силы взаимодействия. С уменьшением расстояния до стенки и продольная, и поперечная составляющие силы взаимодействия увеличиваются. Качественный характер зависимости сохраняется как при движении судна носом вперед, так и кормой вперед. Влияние угла дрейфа по мере приближения к стенке увеличивается. На величину гидродинамического момента взаимодействия уменьшение расстояния до стенки существенного влияния не оказывает. Влияние угла дрейфа стенки практически не зависит.

Влияние расстояния от центра тяжести модели до стенки при постоянных значениях угла разворота, представленные на рис. 12 — 14, позволяют заключить, что гидродинамические характеристики не принимают бесконечно больших значений вблизи стенки, как это утверждалось ранее [2].

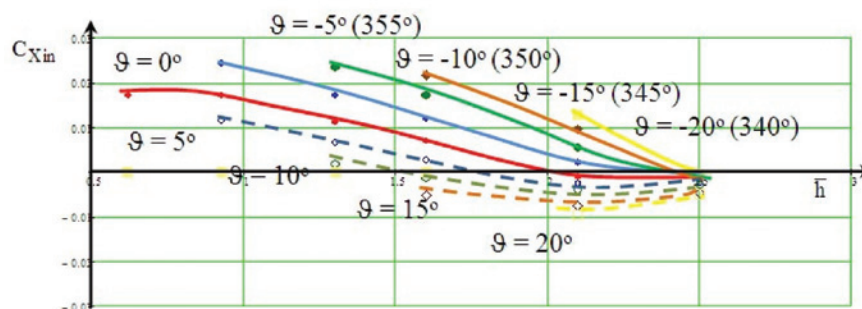


Рис. 12. Изменение продольной силы в зависимости от изменения расстояния до стенки при различных углах разворота модели

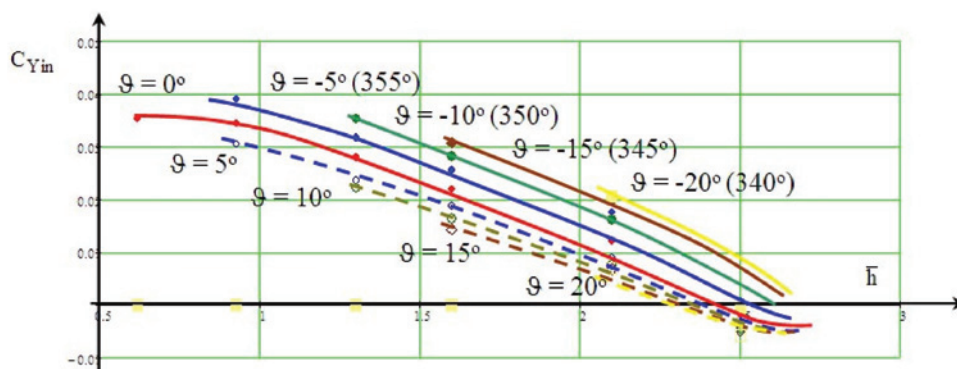


Рис. 13. Изменение поперечной силы в зависимости от изменения расстояния до стенки при различных углах разворота модели

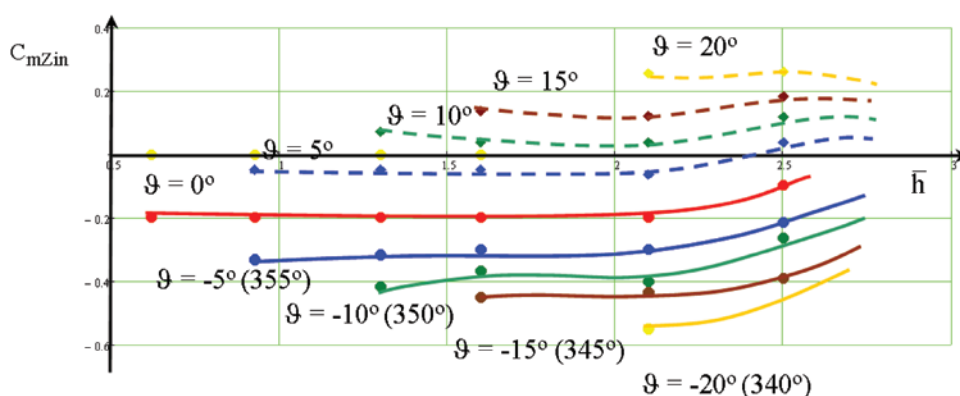


Рис. 14. Изменение момента взаимодействия в зависимости от изменения расстояния до стенки при различных углах разворота модели

При удалении центра тяжести модели от стенки на расстояние, превышающее три ширины корпуса, гидродинамические характеристики стремятся к нулю.

ВЫВОДЫ

1. При удалении от стенки на 2,5 ширины корпуса гидродинамические характеристики взаимодействия знакопеременны и имеют локальные экстремумы. Максимальные значения составляющих силы взаимодействия соответствуют силе на голом корпусе изолированной модели при углах дрейфа 5° — 10° . Максимальные значения момента взаимодействия в несколько раз превосходят соответствующие значения на голом корпусе изолированной модели.
2. По мере приближения к стенке составляющие гидродинамической силы взаимодействия растут, достигая на границе области определения конечных значений. Влияние угла дрейфа по мере приближения к стенке увеличивается.
3. По мере приближения к стенке гидродинамический момент взаимодействия растет, достигая на границе области определения конечных значений. При расстояниях от стенки, меньших $2B$, влияние угла дрейфа по мере приближения к стенке не изменяется.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Справочник по теории корабля: в 3-х т. — Л.: Судостроение, 1985. — Т. 3. — 542 с.
2. Мاستушкин Ю. М. Гидродинамическое взаимодействие судов при встречах и обгонах / Ю. М. Мاستушкин. — Л.: Судостроение, 1987. — 123 с.
3. Dand I. W. Some measurements of Interaction of Interaction induced by Surface-Piercing and Flooded Banks / I. W. Dand. — Feltham: National Maritime Institute, 1981. — 90 p.

4. Manoeuvring Technical Manual. Group of experts edited by Capt. Dipl.-Ing. J. Brix. – Hamburg, 1993.
5. Лебедева М. П. Масштабный эффект при оценке управляемости судна по результатам модельных испытаний / М. П. Лебедева, Е. П. Николаев // Вопросы судостроения. Серия: Проектирование судов. — 1984. — № 41. — С. 86–89.
6. Лебедева М. П. Масштабный эффект при определении гидродинамических характеристик судов с полными обводами в циркуляционном опытовом бассейне / М. П. Лебедева, Е. П. Николаев // Труды Российского НТО судостроителей им. акад. А. Н. Крылова. — 1982. — № 363.
7. Лебедева М. П. Особенности отрывного течения около корпуса судна, движущегося по криволинейной траектории / М. П. Лебедева, Е. П. Николаев, В. М. Пашин // Труды VIII Сибирской школы по моделям механики сплошной среды. — 1985.
8. Лебедева М. П. Математическая модель неустановившегося движения судна / М. П. Лебедева, Т. Н. Инютина // Труды международного симпозиума по гидродинамике судна памяти А. М. Басина. — 1995.
9. Басин А. М. «Гидродинамика судов на мелководье / А. М. Басин, И. О. Веледницкий, А. Г. Ляховицкий. — Л.: Судостроение, 1976. — 320 с.
10. Афремов А. Ш. Решение проблем управляемости кораблей в циркуляционном и маневренно-мореходном бассейнах / А. Ш. Афремов // Труды ЦНИИ им. акад. А. Н. Крылова. — 2009.

THE SHIP FLAT WALL INTERACTION HYDRODYNAMICAL CHARACTERISTIC

The analyses of experimental data of ship model flat wall interaction hydrodynamic characteristic are under consideration. The investigations of interaction hydrodynamic characteristic were fulfilled at early 90-th in circular tank of KSRI. The work was not completed then because of absence of needing technical equipment. As it followed from literature review the new information about ship wall interaction force is absent. As the problem of ship motion near the wall is still important, but the interaction hydrodynamic characteristic are not defies as yet, the old problem appears under consideration again.

The experimental data and their analyses results allowing to define ship wall interaction force are under consideration.

Keywords: hydrodynamic interaction, experiment, ship model, flat wall, the model wall angle.

REFERENCES

1. Spravochnik po teorii korablja: v 3 t. Т. 3. Л.: Судостроение, 1985.
2. Mastushkin, Ju. M. *Gidrodinamicheskoe vzaimodejstvie sudov pri vstrechah i obgonah*. Л.: Судостроение, 1987.
3. Dand, I. W. *Some measurements of Interaction of Interaction induced by Surface-Piercing and Flooded Banks*. Feltham: National Maritime Institute, 1981.
4. Manoeuvring Technical Manual. Group of experts edited by Capt. Dipl.-Ing. J.Brix. Hamburg, 1993.
5. Lebedeva, M.P., and E. P. Nikolaev. “Masshtabnyj jeffekt pri ocenke upravljaemosti sudna po rezul’tatam model’nyh ispytaniy.” *Voprosy sudostroenija, Serija: Proektirovanie sudov* 41 (1984): 86-89.
6. Lebedeva, M. P., and E. P. Nikolaev. “Masshtabnyj jeffekt pri opredelenii gidrodinamicheskikh harakteristik sudov s polnymi obvodami v cirkuljacionnom opytovom bassejne.” *Trudy NTO im. akad. A. N. Krylova* 363 (1982).
7. Lebedeva, M. P., E. P. Nikolaev, and V. M. Pashin. “Osobennosti otrivnogo techenija okolo korpusa sudna, dvizhushhegosja po krivolinejnoj traektorii.” *Trudy VIII Sibirskoj shkoly po modeljam mehaniki sploshnoj sredy* (1985).
8. Lebedeva, M. P., and T. N. Injutina. “Matematicheskaja model neustanovivshegosja dvizhenija sudna.” *Trudy mezhdunarodnogo simpoziuma po gidrodinamike sudna pamjati A.M. Basina* (1995).
9. Basin, A. M., I. O. Velednickij, and A. G. Ljahovickij. *Gidrodinamika sudov na melkovode*. Л.: Судостроение, 1976.
10. Afremov, A. Sh. “Reshenie problem upravljaemosti korablej v cirkuljacionnom i manevrenno-morehodnom bassejnah.” *Trudy Centralnogo Nauchno issledovatel'skogo instituta im. Akademika A. N. Krylova* (2009).

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

Лебедева Марина Петровна –
кандидат технических наук,
старший научный сотрудник.
ФГБОУ ВО «ГУМРФ имени
адмирала С. О. Макарова»
lmp45@yandex.ru
Васильева Анастасия Борисовна –
ассистент.
ФГБОУ ВО «ГУМРФ имени
адмирала С. О. Макарова»
Инюткина Татьяна Николаевна

INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Lebedeva Marina Petrovna –
Candidate of Engineering,
Senior Research Fellow.
Admiral Makarov State University
of Maritime and Inland Shipping
lmp45@yandex.ru
Vasileva Anastasija Borisovna —
assistant.
Admiral Makarov State University
of Maritime and Inland Shipping
Injutina Tatjana Nikolaevna

УДК 629.122

С. С. Метелица

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ РАСХОДА ГАЗА ДЛЯ СОЗДАНИЯ ВОЗДУШНОЙ КАВЕРНЫ НА ДНИЩЕ КАТАМАРАНОВ

Показан один из путей значительного снижения гидродинамического сопротивления движению скоростного судна. Выявлены наиболее существенные факторы, влияющие на величину сопротивления движению судов на воздушной каверне (СВК). Одним из существенных факторов, влияющих на экономичность эксплуатации СВК, является минимально возможный расход энергии, затрачиваемой на подачу воздуха и поддержание избыточного давления в камере каверны. В связи с этим была сформулирована и опытным путем решена задача по поиску оптимального расхода газа для создания каверны. Приведена методика проведения эксперимента по нахождению оптимального расхода газа для создания каверны. Показаны результаты решения экспериментальной задачи по нахождению оптимальной величины расхода воздуха Q для создания воздушной каверны на днище высокоскоростного катамарана. Приведены зависимости расхода газа при различных скоростях движения и различных водоизмещениях судна. Проведен сравнительный анализ величины буксировочного сопротивления изолированного корпуса катамарана, оборудованного воздушной каверной, и корпуса высокоскоростного катамарана.

Ключевые слова: воздушная каверна, оптимизация расхода газа, зона автомоделности, буксировочное сопротивление, высокоскоростной катамаран.

Введение

Быстроходные суда — суда на подводных крыльях (СПК), глиссеры, суда с малой площадью ватерлинии, суда на воздушной подушке (СВП), экранопланы — важный показатель технического прогресса. В условиях стремительно развивающихся технологий сокращение времени морских перевозок является одной из важнейших задач современного судостроения.

Способом повышения скорости судов длительное время являлось улучшение формы их обводов (например, использование бульбов в носовой оконечности, уменьшение угла входа носовых ватерлиний), а также совершенствование энергетической установки. Кардинального снижения сопротивления удалось достичь за счет применения гидроаэродинамической разгрузки, приводящей к выходу из воды либо всего корпуса, либо его части. Разгрузка может достигаться за счет использования подводных крыльев, воздушной подушки, воздушных крыльев и глиссирования корпуса. Такие суда получили общее название — суда с динамическими принципами поддержания (далее — СДПП). Вследствие выхода корпуса СДПП из воды уменьшаются волновое сопротивление и сопротивление трения. При этом волновое сопротивление в крейсерском режиме практически

исчезает. При выходе на крейсерский режим волновое сопротивление может быть существенным и определяющим для выбора энергетической установки скоростного судна.

В настоящее время одним из перспективных путей развития скоростного флота является применение динамических принципов поддержания на многокорпусных судах. Особенностью скоростных многокорпусных судов, сочетающих гидростатическое и гидродинамическое поддержание, является многообразие применяемых при их создании технических решений в части принципиальных проектной, конструктивной и гидродинамической компоновок и их возможных сочетаний [1] — [3].

Одним из возможных направлений создания высокоскоростных многокорпусных судов, позволяющего добиться существенного снижения сопротивления воды движению, является применение воздушной каверны [4]. Наличие на днище судна воздушной прослойки, подчиняющейся закономерностям развитой кавитации, т. е. искусственной каверны, позволяет изолировать от трения о воду его участок, покрытый каверной, что приводит к снижению сопротивления трения [5]. Для снижения величины полного гидродинамического сопротивления воды движению судна необходимо создать на его днище такую каверну, которая обеспечила бы снижение составляющей трения, существенно превышающее вызываемое наличием каверны возможное увеличение остаточного сопротивления.

Следует заметить, что в течение продолжительного периода времени работы по применению воздушной каверны на днище проводились исключительно с однокорпусными судами [6]. Многочисленные эксперименты и создание опытных образцов скоростных судов подтвердили эффективность применения воздушных каверн для снижения гидродинамического сопротивления. Так, для глиссирующих катеров со скоростями хода $Fr_D > 3,0$ удалось достичь снижения величины гидродинамического сопротивления на величину до 30 %. С учетом работы нагнетателей для поддержания избыточного давления в каверне можно снизить значение мощности силовой установки до 12 % [7], [8].

Постановка задачи

Применение воздушной каверны на высокоскоростных катамаранах открывает перспективу снижения гидродинамического сопротивления не только за счет сопротивления трения, но и за счет уменьшения волнового сопротивления вследствие благоприятной интерференции волновых систем корпусов катамарана. Задачей данного исследования стало определение оптимальной величины расхода газа, подаваемого для создания каверны. В данном случае под оптимальным значением понимается такое значение расхода газа, при котором достигается максимальное снижение величины буксировочного сопротивления при минимальных затратах мощности, идущих на создание каверны. Помимо этого были поставлены задачи исследования зависимости необходимого расхода газа от скорости и от водоизмещения.

Методика проведения экспериментального исследования

Модельные испытания рассматриваемых буксируемых моделей проводились в опытовом бассейне ОАО «ЦКБ по СПК им. Р. Е. Алексеева». Опытный бассейн имеет следующие характеристики:

- длина, $L = 74,5$ м;
- ширина, $B = 4,0$ м;
- глубина, $T = 0,7 - 0,9$ м.

Максимальная скорость буксировочной тележки может достигать 11 м/с.

Одной из особенностей бассейна является наличие специального автоматизированного измерительного комплекса, обеспечивающего измерения параметров движения моделей с воздушной каверной на днище в условиях спокойной и взволнованной поверхности воды, изучение колебательных процессов на неустановившихся режимах движения и физических явлений, происходящих в воздушной каверне, и т. п. В состав автоматизированного измерительного комплекса входят

датчики замеров регистрируемых параметров, первичные преобразователи, устанавливаемые на моделях и буксировочной тележке, а также автоматизированная система измерений «МОДЕРН», состоящая из блока автоматики «КАМАК» и компьютера со встроенной платой согласования, расположенной на пульте управления.

Система выполнена на базе современной вычислительной компьютерной техники и отечественных технологий. При этом используется пакет прикладных программ MultiPet, работающих в операционной системе Windows при использовании драйверов: wsg1d; wsg32d; hPool; hFlood; Grader собственной разработки, а также пакетов стандартных программ Microsoft Excel, Microsoft Word и Corel. Система позволяет одновременно по 16 каналам проводить измерения, сбор, регистрацию параметров модельных испытаний в реальном масштабе времени, их длительное хранение, экспресс-обработку с построением графических зависимостей параметров, замеряемых в ходе эксперимента, а также выполнять окончательную обработку результатов и получение машинописного текста.

Во время испытаний также проводилось визуальное наблюдение за колебательными процессами и брызгообразованием, происходящими при движении модели, с использованием видеосистемы, созданной на базе виброустойчивой видеокамеры, и установленного на буксировочной тележке видеоконтрольного устройства.

Технологическая последовательность проведения экспериментальных работ в опытовом бассейне по отработке гидродинамических компоновок многокорпусных судов с воздушной каверной на днище состояла из следующих основных этапов:

– разработка теоретических и рабочих чертежей буксируемой модели с воздушной каверной на днище и ее изготовление. Основной задачей на данном этапе был правильный выбор судна, близкого по своим характеристикам к требованиям технического задания на проект, и возможности более рационального размещения камеры для воздушной каверны;

– основная программа испытаний по исследованию необходимого расхода газа для создания воздушной каверны. Кроме проведения стандартных калибровок основных параметров движения модели на данном этапе испытаний определялся один из главных элементов судна с воздушной каверной на днище — расход воздуха, идущего на создание воздушной каверны. Для этого на предполагаемой расчетной скорости движения модели V исследовалось в широком диапазоне количество расходуемого воздуха и оценивалось его влияние на величину сопротивления: момент, когда количество расходуемого воздуха не оказывает влияния на величину сопротивления, является началом зоны автомодельности, а количество расходуемого воздуха Q — оптимальным, рекомендуемым для использования на проектируемом судне. При этом количество воздуха рассчитывалось по формуле

$$Q_{\text{нат}} = m^{5/2} \cdot Q,$$

где m — масштаб модели; $Q = 3600 \pi D^2 \sqrt{P_{\text{ст}}}$, м³/ч, где $P_{\text{ст}}$ — статическое давление во всасывающем коллекторе вентилятора, мм вод. ст; D — внутренний диаметр всасывающего коллектора вентилятора, м.

Важной составляющей этой части испытаний являлась оценка смоченной поверхности судна на различных режимах движения, функционирование воздушной каверны. Установленные на своде камеры воздушной каверны и по бортам модели контактные датчики измерительного комплекса с достаточной степенью точности определяли границы смоченной поверхности. При этом смоченная поверхность свода камеры воздушной каверны по своему физическому состоянию разделяется на три зоны [1].

I зона — собственно воздушная каверна, где свод камеры находится в воздухе.

«Основная зона, обеспечивающая эффективность воздушной каверны за счет уменьшения смоченной поверхности, как следствие, существенного снижения сопротивления трения»;

II зона — зона пульсации воздушно-водяной эмульсии.

«Резервная зона, обеспечивающая, пусть незначительную, но дополнительную, порой крайне необходимую, скорость»;

III зона — зона смоченной поверхности, где днище находится в контакте с водой.

Схема буксируемой модели и оборудования, необходимого для проведения испытаний, приведена на рис. 1.

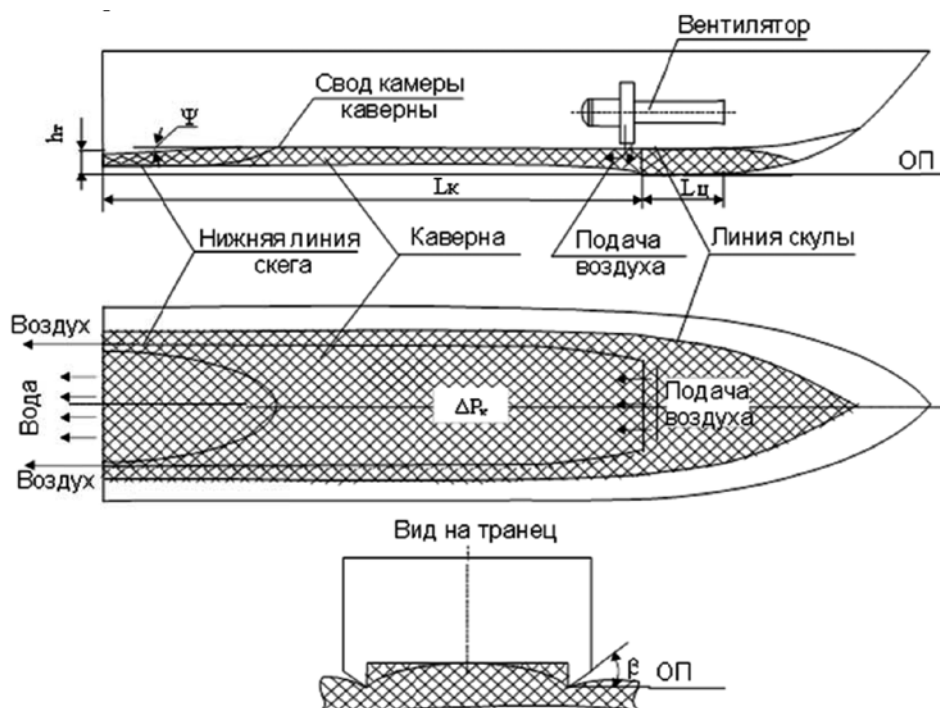


Рис. 1. Схема подачи воздуха для создания каверны на буксируемой модели

Замер расхода воздуха производится с помощью трубки Пито, смонтированной во всасывающем патрубке коллектора электровентилятора. Схема установки представлена на рис. 2.

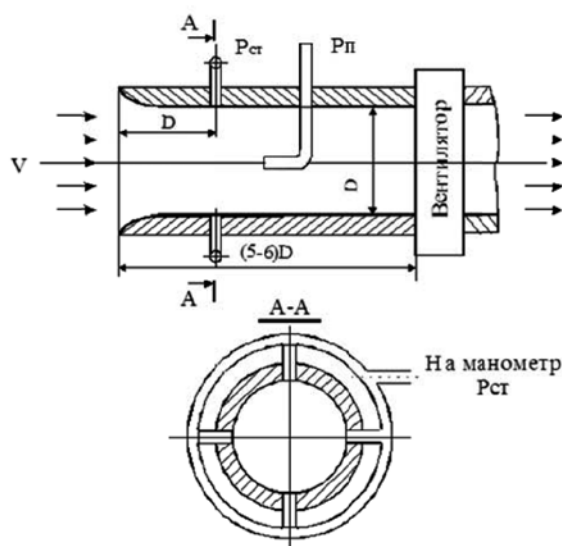


Рис. 2. Всасывающий коллектор вентилятора

Программа испытаний

Исследования расхода газа проводились с буксируемой моделью изолированного корпуса катамарана, оборудованного воздушной каверной. Проекция «Корпус» теоретического чертежа изолированного корпуса буксируемой модели представлена на рис. 3.

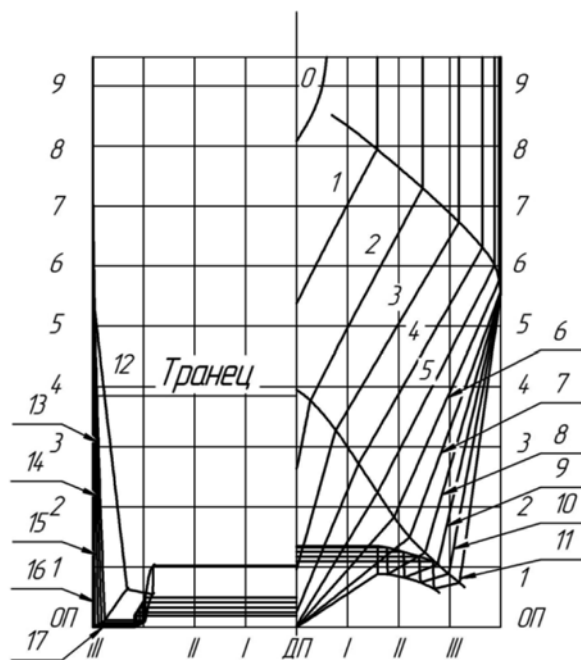


Рис. 3. Проекция «Корпус» буксируемой модели изолированного корпуса катамарана, оборудованного воздушной каверной

Буксируемая модель изолированного корпуса имела следующие основные характеристики:

- длина по ватерлинии, $L_{\text{квл}} = 2,76$ м;
- ширина, $B = 0,276$ м;
- коэффициент полноты КВЛ, $\alpha = 0,472$.

Испытания проводились с моделью изолированного корпуса при трех значениях водоизмещения, которое было выражено через безразмерный коэффициент статической нагрузки C_B и вычислено по формуле

$$C_B = \frac{D}{B^3}, \quad (1)$$

где D — объемное водоизмещение, м^3 ; B — ширина наибольшая, м; $B_{\text{ст}}$ — максимальная ширина корпуса по скуле, м.

Значения C_B были приняты $C_B = 1,40; 1,19; 1,06$.

Завершающим этапом испытаний были сравнительные испытания модели катамарана, оборудованного воздушной каверной, и высокоскоростного катамарана с обводами, спроектированными для переходного режима в диапазоне скоростей чисел Фруда по водоизмещению

$$\text{Fr}_D = \frac{V}{\sqrt{g^3 D / \rho_{\text{в}}}} < 3,0 \quad (\text{где } V — \text{скорость судна, м/с; } D — \text{массовое водоизмещение судна, т; } \rho_{\text{в}} = 1 —$$

плотность воды, т/м^3 ; $g = 9,81$ — ускорение свободного падения, м/с^2).

Результаты испытаний

Результаты проведенных испытаний позволили ответить на основные вопросы, которые стояли перед началом исследования о возможности создания эффективной каверны для корпусов с большим удлинением и влиянии скорости и статической нагрузки на изменение величины расхода газа, необходимого для создания каверны.

Испытания показали, что вне зависимости от значений скорости и водоизмещения на всех режимах можно выделить зону автомодельности, что ранее можно было наблюдать и при испытаниях однокорпусных судов. Вместе с тем, сравнение полученных результатов с испытаниями

моделей однокорпусных судов схожего водоизмещения [9], [10] показало, что создание воздушной каверны на днище изолированного корпуса катамарана требует большего расхода газа нежели создание каверны на днище однокорпусных судов такого же водоизмещения. Это связано с тем, что корпус катамарана имеет большее относительное удлинение L/B , вследствие чего каверна должна иметь большую длину.

Также следует заметить, что рост водоизмещения не приводит к значительному смещению начала зоны автомодельности. Так, на скорости $V = 4$ м/с (соответствовало для модели числу Фруда $Fr_D = 1,6$) зона автомодельности по расходу газа для представленных трех случаев статической нагрузки начиналась со значения $Q = 20$ м³/ч. График зависимости изменения обратного качества $\varepsilon = R/D$ от подаваемого в камеру каверны расхода газа Q при различных случаях статической нагрузки приведен на рис. 4.

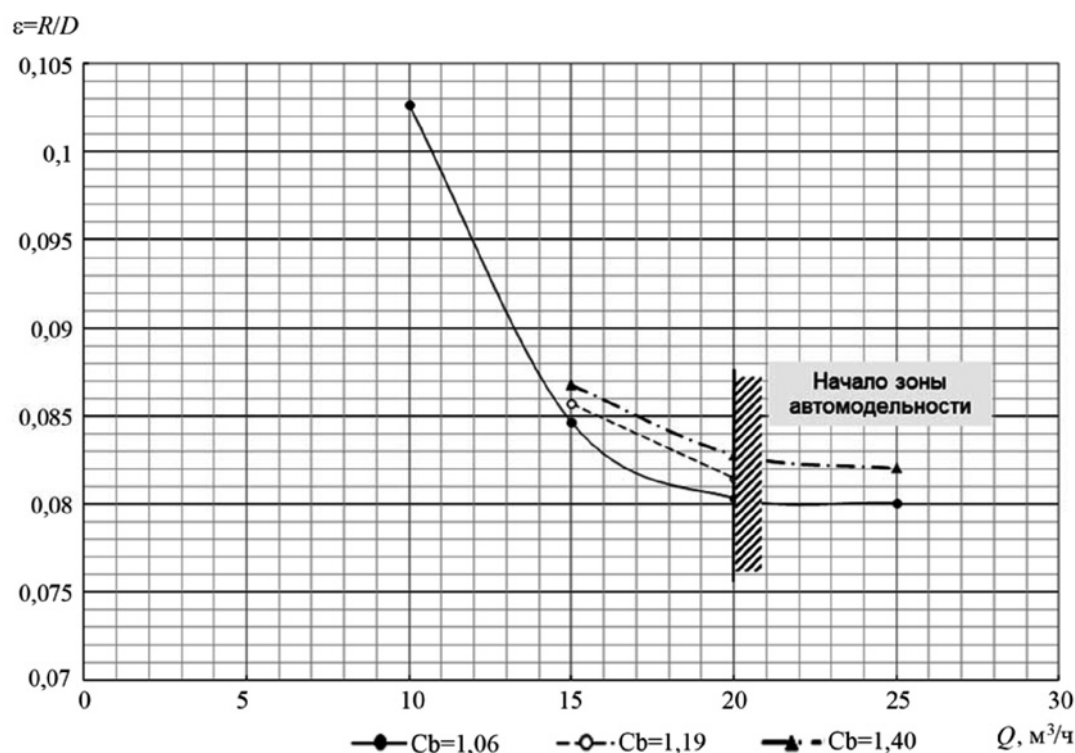


Рис. 4. Зависимость величины обратного гидродинамического качества ε от расхода газа Q (м³/ч) при различных случаях статической нагрузки C_B

Напротив, рост скорости судна приводит к увеличению расхода газа, необходимого для насыщения каверны и создания в ней избыточного давления p_k . Таким образом, с ростом скорости зона автомодельности наступает при больших значениях расхода газа Q . Графически зависимость изменения обратного качества $\varepsilon = R/D$ от подаваемого в камеру каверны расхода газа Q на различных скоростях изображена на рис. 5.

Приведенные результаты свидетельствуют о том, что при росте расхода Q величина $\varepsilon = R/D$ монотонно снижается, а давление в каверне монотонно растет. Увеличение скорости приводит к росту давления в камере каверны.

Сравнение результатов данных испытаний с буксировочными испытаниями изолированного корпуса скоростного катамарана равного водоизмещения [6] дает право говорить о возможности эффективного применения воздушной каверны на судах с большими удлинениями корпусов L/B , какими являются катамараны. Так, при скорости хода $Fr_D = 1,5$ выигрыш в сопротивлении по сравнению со своим «традиционным» аналогом составил $\delta = 12,9$ %, на скорости $Fr_D = 2,0$ – $\delta = 18,8$ %, а при $Fr_D = 2,5$ – $\delta = 24,8$ %.

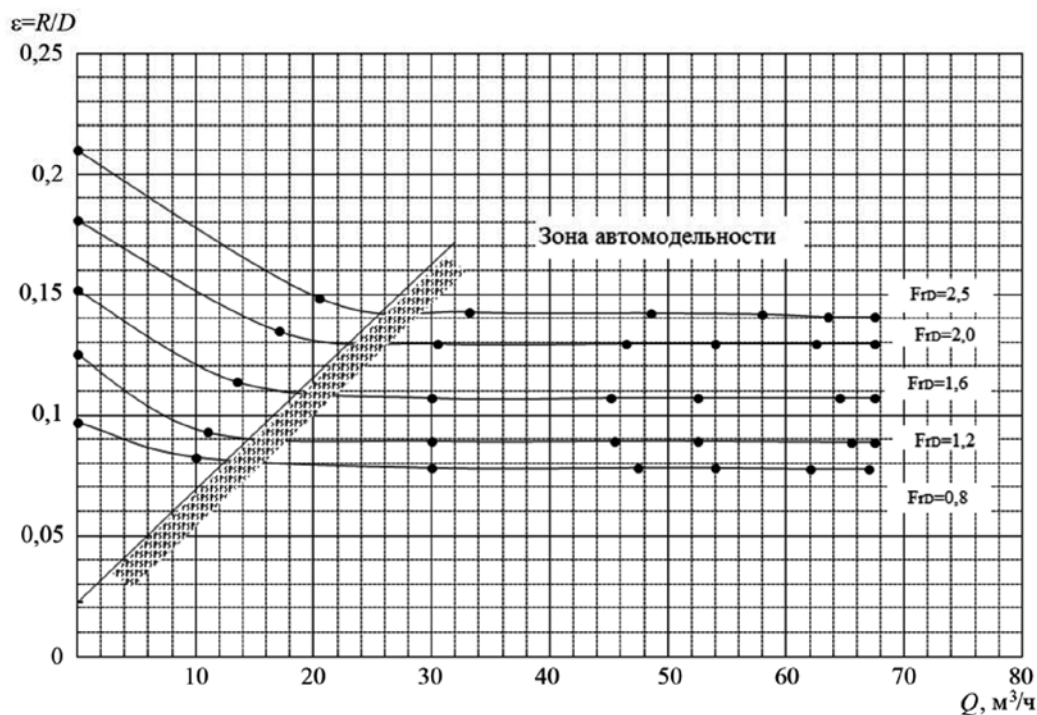


Рис. 5. Зависимость величины обратного гидродинамического качества ε от расхода газа Q (м³/ч) при различных скоростях движения

Результаты сравнения представленного исследования и буксировочных испытаний изолированного корпуса высокоскоростного катамарана представлены на рис. 6.

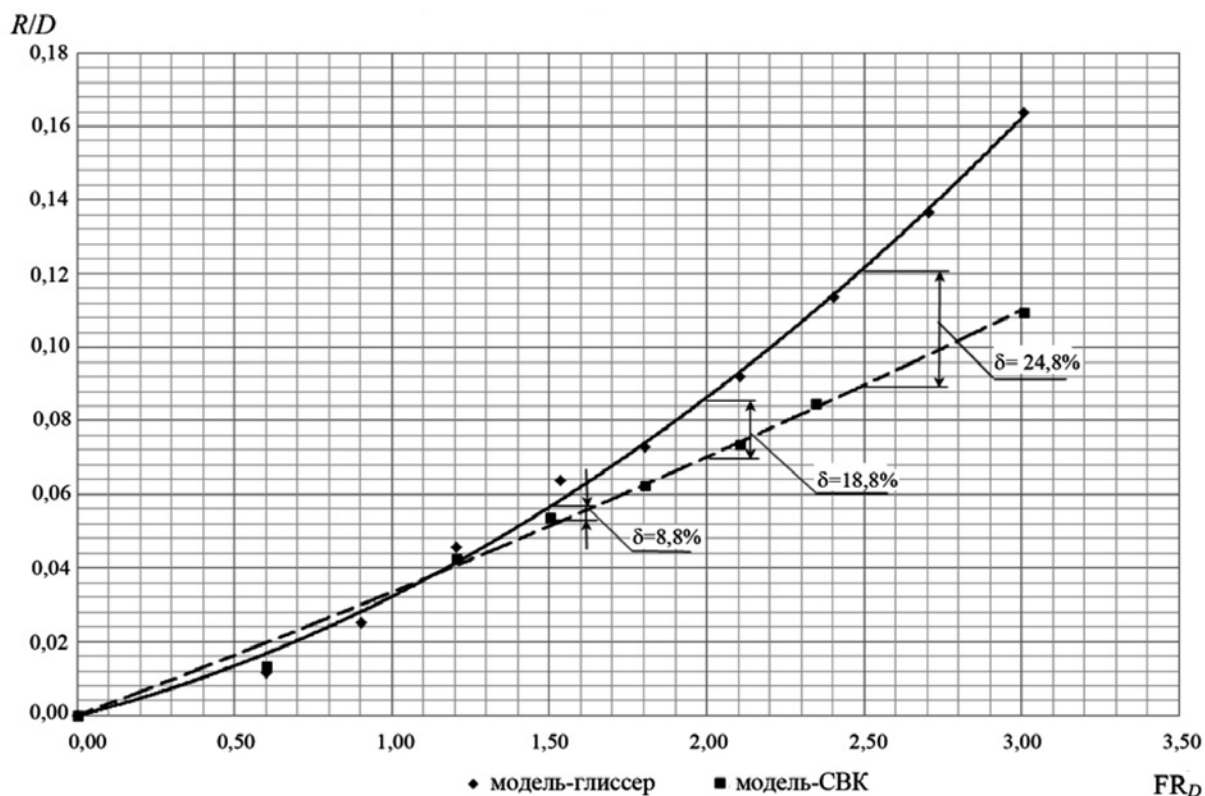


Рис. 6. Сравнительный график гидродинамического сопротивления для высокоскоростного катамарана и катамарана, оборудованного воздушной каверной

Заключение

В данной статье представлены методика и результаты экспериментальных исследований по выбору оптимального расхода газа, необходимого для создания воздушной каверны на днище высокоскоростных катамаранов.

На основе предложенной в настоящей работе методики удалось количественно оценить картину насыщения искусственной каверны для высокоскоростных катамаранов и предсказать появление зоны автомодельности по расходу газа Q . Были установлены зависимости обратного гидродинамического качества $\varepsilon=R/D$ от расхода газа Q при изменении скорости V и статической нагрузки, представленной в виде безразмерного коэффициента C_B .

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Гидродинамика и проектирование судов на воздушной каверне / В. М. Пашин, А. Н. Иванов, В. Г. Калужный [и др.] // 6-я междунар. конф. по судостроению, судоходству, оборудованию морских платформ и обеспечивающих их работу плавсредств, морская техника для освоения океана и шельфа. — СПб., 2001. — С. 127–129.
2. Крыжевич Г. Б. Новые конструкции реданов высокоскоростных судов / Г. Б. Крыжевич // Труды ЦНИИ им. акад. А. Н. Крылова. — 2013. — № 75 (359). — С. 180–186.
3. Пустошный А. В. Искусственная кавитация и опыт ее применения в отечественном судостроении / А. В. Пустошный, А. А. Русецкий // Труды ЦНИИ им. акад. А. Н. Крылова. — 2013. — № 73 (357). — С. 5–16.
4. Основные направления улучшения гидродинамических характеристик речных судов / А. В. Пустошный, А. А. Русецкий, В. А. Мацкевич [и др.] // Морской вестник. — 2007. — № 4. — С. 85–90.
5. Пустошный А. В. Исследование влияния параметров функций давления на широкополосный спектр / А. В. Пустошный, А. А. Коваль // Труды ЦНИИ им. акад. А. Н. Крылова. — 2013. — № 73 (357). — С. 121–132.
6. Сверчков А. В. Экспериментальные исследования и проектные проработки по применению воздушных каверн на судах смешанного плавания / А. В. Сверчков, А. В. Пустошный, Ю. Н. Горбачев // Труды ЦНИИ им. акад. А. Н. Крылова. — 2012. — № 69. — С. 23–38.
7. Влияние выбора модели турбулентности на точность расчета вязкостного сопротивления транспортных судов / Д. М. Денисихина, М. П. Лобачев, А. В. Пустошный [и др.] // Морской вестник. — 2008. — № 3. — С. 95–100.
8. Аносов В. Н. Влияние характеристик бортовых искусственных каверн на сопротивление движению быстроходных судов / В. Н. Аносов // Судостроение. — 2008. — № 3. — С. 23–26.
9. Dubrovskiy V. A. Multi-Hull Ships / V. A. Dubrovskiy, A. G. Lyakhovitsky. — USA: Backbone Publishing Co., 2001. — 495 p.
10. Ляховицкий А. Г. Скоростные пассажирские суда: проектные характеристики и тенденции развития / А. Г. Ляховицкий, Тхун Йин // Морской вестник. — 2008. — № 2. — С. 19–22.

EXPERIMENTAL RESEARCH OF THE INFLUENCE OF THE GAS FLOW FOR CREATION OF THE AIR CAVITY ON THE BOTTOM OF CATAMARANS

It is shown one of the ways of the immense letdown shock wave drag to the displacement of a high speed vessel. It is elicited quintessential factors, affecting on the magnitude of vessels' traveling resistance on an airy blowing hole (VABH). One of the significant factors affecting the efficient operation of the VABH, is the minimum possible consumption of energy expended on air delivery and maintenance of overpressure in the chamber cavity. In this regard, was formulated and empirically solved the problem of finding the optimal gas flow to create a cavity. Shown the technique of carrying out of experiment on finding the optimal gas flow to create a cavity. Shows the experimental results of solving the problem of finding the optimal value of the flow Q to create an air cavity on the bottom of the high-speed catamaran. The dependences of the gas flow at different speeds and different displacements of the vessel. A comparative analysis of the magnitude of the towing resistance of the insulated housing of the catamaran, equipped with an air cavity, and the housing of the high-speed catamaran.

Key words: airy blowing hole optimization of gas flow, the zone of self-similarity, the towing resistance, high-speed catamaran.

REFERENCES

1. Pashin, V. M., A. N. Ivanov, V. G. Kaljuzhnyj, A. V. Sverchkov, A. G. Ljahovickij, and G. A. Pavlov. "Gidrodinamika i proektirovanie sudov na vozdušnoy kaverne." 6 *Mezhdunarodnaja konferencija po sudostroeniju, sudohodstvu, oborudovaniju morskikh platform i obespechivajushhih ih rabotu plavstredstv, morskaja tehnika dlja osvoenija okeana i shelfa (Neva 2001)*. SPb., 2001:127-129.
2. Kryzhevich, G. B. "New step structures for high-speed fast speeds vessels." *Trudy CNII im. akad. A. N. Krylova* 75(359) (2013): 180-186.
3. Pustoshnyj, A. V., and A. A. Ruseckij. "Artificial cavitation and experience of its application in domestic shipbuilding." *Trudy CNII im. akad. A. N. Krylova* 1.73(357) (2013): 5-16.
4. Pustoshnyj, A. V., A. A. Ruseckij, V. A. Mackevich, A. V. Sverchkov, and M. A. Mavljudov. "Basic trends in improving the hydrodynamic characteristics of river-type ships." *Morskoj vestnik* 4 (2007): 85-90.
5. Pustoshnyj, A. V., and A. A. Koval. "Studies of the effect of pressure function parameters on the broadband spectrum." *Trudy CNII im. akad. A. N. Krylova* 1.73(357) (2013): 121-132.
6. Sverchkov, A. V., A. V. Pustoshnyj, and Ju. N. Gorbachev. "Jeksperimentalnye issledovanija i proektnye prarabotki po primeneniju vozdušnyh kavern na sudah smeshannogo plavanija." *Trudy CNII im. akad. A. N. Krylova* 69 (2012): 23-38.
7. Denisihina, D. M., M. P. Lobachev, A. V. Pustoshnyj, and I. A. Chicherin. "Influence of a choice of a turbulence model on an accuracy of calculation of viscosity resistance of transport vessels." *Morskoj vestnik* 3 (2008): 95-100.
8. Anosov, V. N. "The influence of board artificial cavities on high-speed vessel running resistance." *Sudostroenie* 3 (2008): 23-26.
9. Dubrovskiy, V. A., and A. G. Lyakhovitsky. *Multi-Hull Ships*. USA: Backbone Publishing Co., 2001.
10. Ljahovickij, A. G., Thun Jin. "Fast passenger ships: design characteristics and tendencies of development." *Morskoj vestnik* 2 (2008): 19-22.

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРЕ

Метелица Сергей Сергеевич –
аспирант.
Нижегородский Государственный Технический
Университет им. Р. Е. Алексеева
Научный руководитель:
Грамузов Евгений Михайлович,
доктор технических наук, профессор
meteserg@yandex.ru

INFORMATION ABOUT THE AUTHOR

Metelitsa Sergei Sergeevich –
postgraduate student.
Nizhny Novgorod State Technical
University n.a. R.E. Alekseev
Supervisor:
Gramuzov Evgeniy Mihajlovich —
Doctor of Engineering, professor
meteserg@yandex.ru

УДК 631.717

В. А. Куликов

МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРОГРАММНЫМИ СРЕДСТВАМИ СЛУЧАЙНЫХ ПОГРЕШНОСТЕЙ ИЗМЕРЕНИЯ В СУДОСТРОЕНИИ

Размерный контроль деталей в судовом машиностроении в реальных условиях всегда сопровождается ошибками в разбраковке деталей, отрицательно сказывающимися как на качестве деталей и соединений, так и на экономической эффективности производства. Количественно эти ошибки характеризуются так называемыми параметрами разбраковки, значение которых определяется погрешностью измерения. Важно обнаружить и оценить случайную составляющую погрешности измерения. Стандарт

рекомендует оценивать эту составляющую погрешности измерения границами доверительного интервала. При этом доверительная вероятность теоретического распределения Стьюдента переносится на выборочное распределение в реальных условиях многократных измерений. Экспериментальная проверка достоверности определяемой таким образом погрешности при ограниченном объеме выборок практически невозможна. Цифровые компьютерные технологии позволяют смоделировать случайные выборочные распределения при измерениях величин с единственным значением и исследовать достоверность оценок погрешности.

Программными средствами из стандартизованного нормального распределения случайной величины получены две серии выборок, которые показали, что только 15 – 20 % из их числа воспроизводят доверительные границы моделируемого распределения. Следовательно, рассчитываемые по стандарту границы погрешности при ограниченных объемах выборки доверительными не являются. Показана целесообразность выполнения при измерениях двух выборок и проверки гипотетических значений параметров распределения и погрешности измерения с определенным уровнем значимости.

Ключевые слова: нормальное распределение, выборки, погрешность измерения, параметры распределения, статистические гипотезы, уровень значимости.

КАЧЕСТВО изделий судового машиностроения и эффективность производства во многом определяются погрешностями измерений в контрольных операциях при приемке деталей. На качество изделий влияет ошибочная приемка, а на эффективность производства ошибочная выбраковка деталей. Эти ошибки контроля обусловлены погрешностью измерений. В решении актуальной задачи оценки погрешности измерений особую сложность представляет задача оценки случайной составляющей погрешности.

На данном этапе отмечаются явные расхождения в суждениях о достоверности оценки случайной погрешности измерений. С одной стороны постулируется возможность оценки погрешности с заданной доверительной вероятностью [1] — [5], с другой стороны предлагается понятие неопределенности и в то же время приводятся оценки доверительной вероятности неопределенности [6]. Высказывается мнение о неприменимости понятия доверительной вероятности к выборочным распределениям [7]. Прежде всего, в математике существует понимание принципиальных различий в оценках погрешностей между теорией и практикой выборочных распределений. Представляет интерес исследование степени различий в статистических оценках. Экспериментальные исследования в этом направлении практически невозможны.

Цифровые компьютерные технологии дают возможность моделирования процесса измерения случайных величин и исследования этих вопросов [8]. Равномерное распределение случайных чисел воспроизводится испытаниями по схеме Бернулли и приводится в виде таблиц случайных чисел. Нормальное распределение воспроизводится квантованием теоретической совокупности на интервалы с равной вероятностью. Применение равномерно распределенных случайных чисел к нумерованным квантам нормального распределения воспроизводит выборки из нормальной совокупности заданного объема. Образуется генератор нормального распределения — идеальная цифровая модель процесса измерения в виде выборок заданного объема, открывающая возможность исследования закономерностей формирования результатов измерений на компьютере. Стандартные программные средства построения гистограмм наглядно демонстрируют воспроизводимость нормального распределения случайной величины в стандартизованном выражении в выборке на 10 тыс. точек этим способом, что невозможно экспериментально на практике.

В итоге получаем эталонное теоретическое распределение с математическим ожиданием μ , равным нулю, и средним квадратическим отклонением σ , равным единице. Выборка из этого распределения равносильна измерению с неограниченной точностью отсчета по шкале с ценой деления, равной единице. С вероятностью 0,95 доверительный интервал для показаний x_i составляет $\pm 2,0$, а для среднего $\bar{x}$ из пяти — $\pm 0,9$ (0,9, таким образом, — эталонная погрешность измерения).

Для исследования получено 20 выборок. В массиве цифровых данных представлен компьютерный вывод в виде матрицы чисел — показаний при измерении x_j , каждый столбец кото-

рой — выборка объема $n = 5$. Для каждой выборки рассчитаны и приведены в массиве цифровых данных:

$$\bar{x} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n x_i \text{ — среднее значение измеряемой величины, принимаемое за оценку измеряемой величины;}$$

мой величины;

$$s(\bar{x}) = \sqrt{\frac{1}{n(n-1)} \sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2} \text{ — среднее квадратическое отклонение оценки измеряемой}$$

величины;

— w — размах выборки;

$$\chi^2 = \sum_{i=1}^n x_i^2 \text{ (}\chi^2 \text{ — распределение);}$$

$$t = \frac{\bar{x}}{s(\bar{x})} \text{ — параметрический критерий Стьюдента, служащий для проверки статистиче-}$$

ской гипотезы о значении математического ожидания $\mu = 0$;

— $\mu = s(\bar{x}) \cdot t_{0,05}(n-1)$ — расчетная выборочная эмпирическая оценка доверительной границы случайной погрешности измерения [1].

Полученные данные по первым пяти величинам представляют интерес как результат тестирования модели. Эти данные свидетельствуют о том, что моделирование адекватно воспроизводит теоретическое распределение, а именно — с вероятностью 0,95 соблюдаются известные доверительные интервалы:

— для x_i — $\pm 2,0$;

— для $\bar{x}$ — $\pm 0,9$;

— $\chi^2 \leq 11,06$;

— $0,85 \leq w \leq 4,2$ [6], [9];

— $t \leq 2,776$.

В рамках настоящего исследования, обсуждая вопрос о погрешности измерения, будем различать:

— теоретическую погрешность как доверительную границу, рассчитанную по функции распределения для $\bar{x}$ при $n = 5$ и $P = 0,95$ — эталонное значение, равное 0,9;

— эмпирическую погрешность, определяемую по выборкам:

— симулированное на модели значение — $\Delta = \bar{x} - \mu = \bar{x}$;

— расчетное значение ε [1].

Из полученных данных становится возможным наблюдение случайной погрешности измерения Δ , определяемой как разность оценки величины $\bar{x}$ и истинного значения измеряемой величины; последнее изначально заложено в модель процесса как математическое ожидание $\mu = 0$; поэтому $\Delta = \bar{x}$ — для модели, а для реальных измерений правдоподобная оценка μ — это задача, решаемая по выборочным $\bar{x}$ и $s(\bar{x})$.

Моделирование показывает (что является существенным в приложениях для практики измерений), что «доверительные границы» погрешности измерений ε являются таковыми, т. е. $\Delta \leq \varepsilon$ лишь для данной выборки — результат вполне соответствует теории [10]. Из цифровых данных приведенного массива и диаграммы (рис. 1) следует, что от выборки к выборке границы погрешности изменяются более чем в четыре раза вследствие случайности $s(\bar{x})$. При этом в десяти выборках из 20-ти (с вероятностью 0,5) расчетная ε превышает эталонное значение, равное 0,9, достигая значения 1,88, в остальных десяти выборках ε меньше 0,9 — иногда в три раза. В двух выборках из 20-ти (выборки № 6 и № 17) $\Delta > \varepsilon$ и, как следствие, истинное значение $\mu = 0$ не попадает в расчетный доверительный интервал.

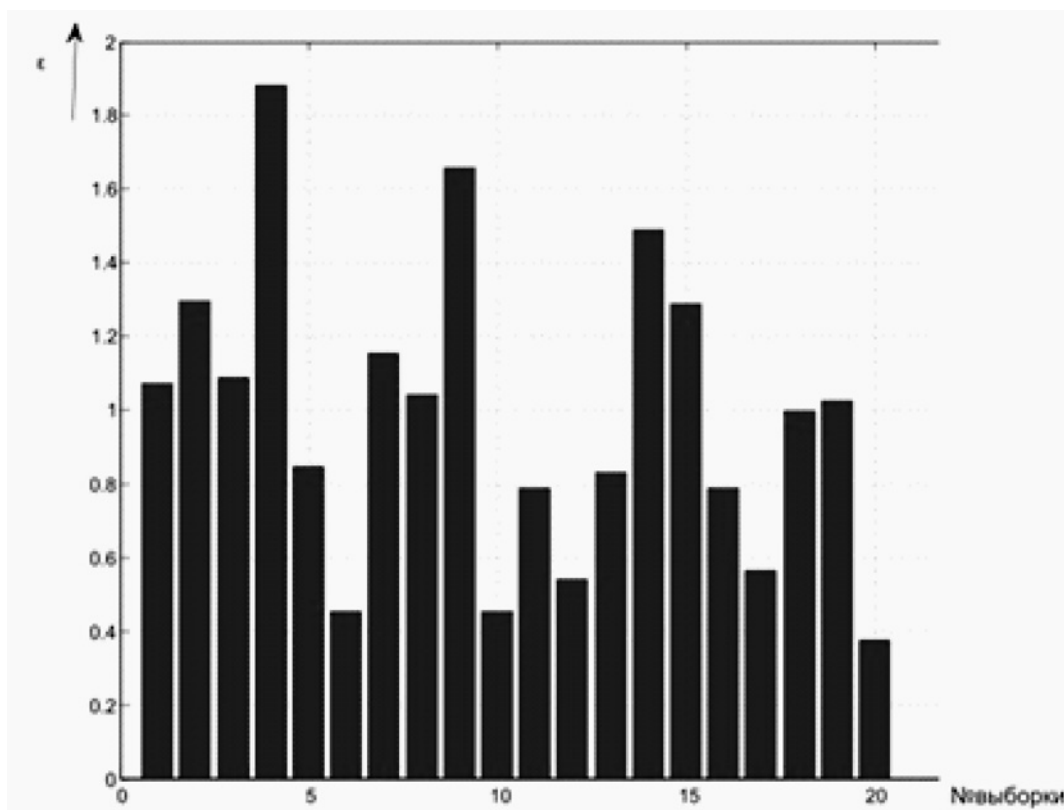


Рис. 1. Диаграмма распределения погрешности ϵ по выборкам

На рис. 2 представлена гистограмма распределения вероятности P для расчетной погрешности ϵ по представленным в таблице 20-ти выборкам. Выпадение первого интервала гистограммы из распределения типа одномодального обусловлено ограниченным числом выборок.

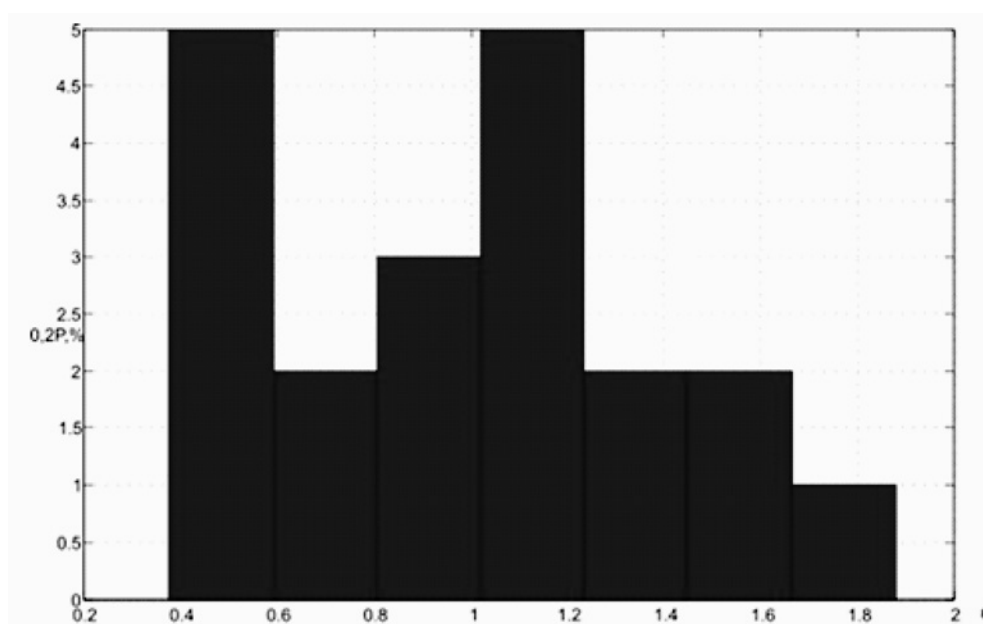


Рис. 2. Гистограмма распределения вероятности P по значениям ϵ для 20-ти выборок

На рис. 3 представлена гистограмма распределения вероятности P для расчетной эмпирической верхней границы доверительного интервала $\theta = (\bar{x} + \epsilon)$ по 100 выборкам того же объема.

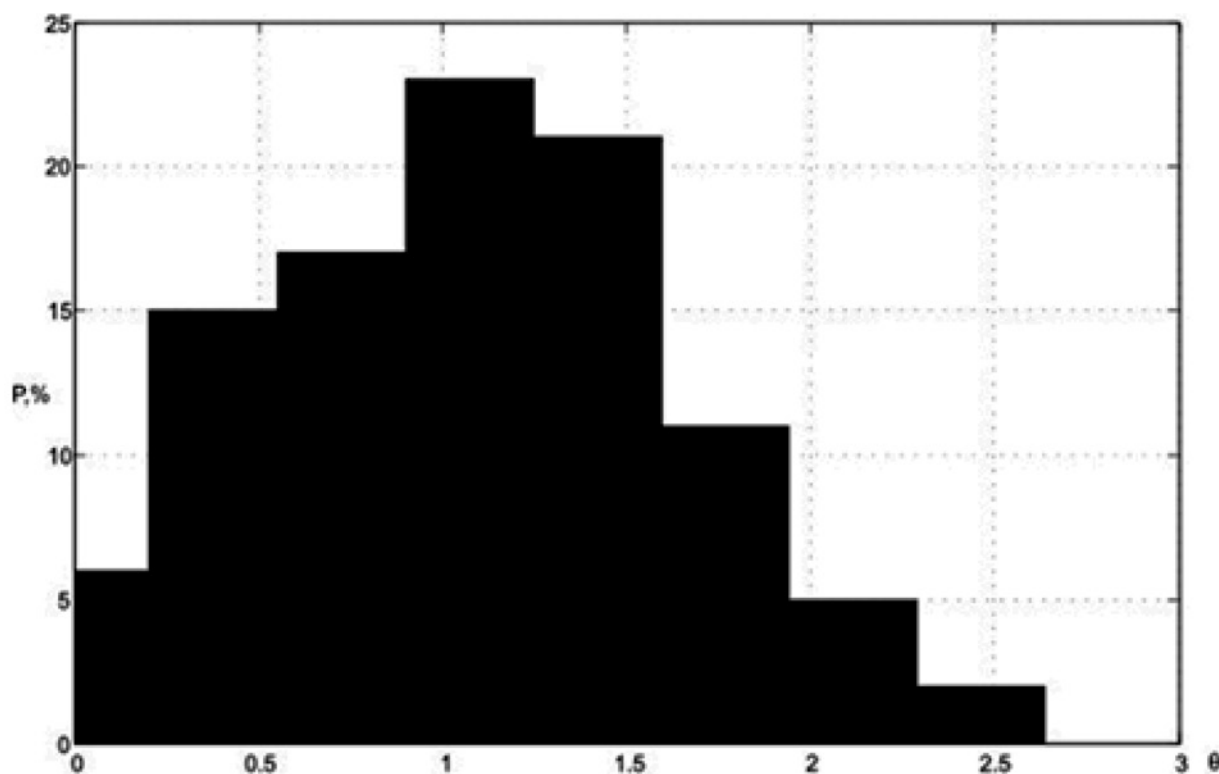


Рис. 3. Гистограмма распределения вероятности P по значениям θ для 100 выборок

Таким образом, ε и θ — это случайные величины, распределенные по законам, близким к нормальному. Гистограммы показывают, что лишь 15 — 20 % наблюдаемых выборок [10] воспроизводят эталонное значение ε и θ . Вопрос оценки доверительной границы по единственной выборке в практике измерений остается открытым.

Такие термины как «доверительный интервал», «доверительная вероятность» и «доверительные границы» применимы для теоретических распределений с известными математическим ожиданием μ и среднеквадратическим отклонением σ . В статистических исследованиях и в задачах обработки результатов измерений категоричность таких выражений и оценок вряд ли применима. По результатам единичных эмпирических выборок сделать вывод о доверительных границах невозможно [11], и именно это наблюдается на модели. В теории статистики аналогичные задачи решаются в терминах и выражениях теории проверки статистических гипотез. Возможны лишь суждения, что на данном уровне значимости отсутствуют возражения в принятии той или иной гипотезы о значении того или иного параметра распределения. А это уже совсем другое суждение, но более правильное. Поэтому представляется, что математическая обработка результатов измерений должна заключаться в оценке параметров распределения и в последующей проверке полученных гипотетических значений параметров на заданном уровне значимости. Для этого необходимы измерения в форме двух выборок [11] — по одной рассчитывается $\bar{x}$, как оценка математического ожидания μ , т.е. истинного значения измеряемой величины, и $s(x)$, как оценка среднего квадратического отклонения σ ; по другой выборке рассчитываются значения критерия Стьюдента и критерия χ^2 -распределения. На принятом уровне значимости по распределению Стьюдента находятся доверительные границы для критерия Стьюдента, по χ^2 -распределению — для критерия χ^2 -распределения и принимается решение о приемлемости гипотез — $\mu = \bar{x}$ и $\sigma = s(x)$. И вопрос об истинном значении измеряемой величины и о погрешности исчерпан — до новой выборки.

Ключевым моментом в статистических исследованиях является признание (или непризнание) того, что случайные $t_\alpha(f)$ и χ^2 — это статистики, выбранные в качестве критериев проверки

соответствующих гипотез, и их значение должно определяться по опытным данным, α — уровень значимости. В выражении для ε значение $t_{0,05}(n-1)$ принимается по теоретическому распределению.

Понятно стремление исследователей найти доверительную границу. Известна идея об использовании χ^2 -распределения для определения доверительных границ для $s(\bar{x})$, а в конечном счете и для погрешности измерения; но эта идея сталкивается с необходимостью оценки σ исходной совокупности. Иное означает безальтернативное принятие единственной выборки. Эта же идея для решения той же «хорошо известной статистической проблемы» используется в ГОСТ Р ИСО 5725-1-2002 [6]; однако расчетная неопределенность A , равная 0,69 для одной выборки объема $n = 5$, на компьютерной модели в нашем случае соблюдается лишь на 15-ти выборках из 20-ти, т.е. с вероятностью не 0,95 как предполагается, а 0,75. При этом верхняя граница расчетного интервала для $s(x)$ в трех выборках превышает истинное значение, равное 1, более чем в два раза.

Приводимая далее оценка результатов измерения и их трактовка по методам проверки статистических гипотез представляется более продуктивной и адекватной модели, а, следовательно, и реальности.

В массиве цифровых данных представлены значения статистик [11]:

$$t = \frac{\bar{x} - \mu}{s(\bar{x})};$$

$$\chi^2 = \frac{(n-1)s^2(x)}{\sigma^2},$$

где в качестве μ и σ (нулевая гипотеза H_0 в терминах теории) приняты соответственно $\bar{x}$ и $s(x)$ одной выборки, а $\bar{x}$ и $s^2(x)$ — по результатам второй, следующей за первой, выборки.

На уровне значимости 0,05 для двустороннего критерия Стьюдента $t_{0,025}(n-1) = 2,776$ [11]. При $|t| < 2,776$ нет оснований отвергать нулевые гипотезы в отношении μ .

На уровне значимости 0,05 по таблицам χ^2 -распределения для критерия χ^2 принимаем $\chi^2_{0,95}(4) = 9,49$ [11]. При $\chi^2 < 9,49$ нет оснований отвергать нулевую гипотезу в отношении σ .

В массиве цифровых данных полужирным шрифтом выделены пары выборок, в которых получены статистические оценки параметров распределения, отвергаемые на данном уровне значимости. Среди них выборки № 6 и № 17 с эталонным значением критерия t , значительно превышающим критическое значение 2,776, их расчетный доверительный интервал не охватывает истинное $\mu = 0$.

Проверка гипотез позволяет, таким образом, не претендуя на указание доверительных границ, выявить и исключить неверные результаты в оценке погрешности, которые допускает стандартный метод расчета.

Массив цифровых данных

Показания x_i и расчетные параметры распределения с точным отсчетом

$x_i =$

Выборки № 1 – № 14

0,6232	0,7990	0,9409	−0,9921	0,2120	0,2379	−1,0078	−0,7420	1,0823	−0,1315	0,3899
0,0880	−0,6355	−0,5596								
0,0000	−0,3179	1,0950	−1,8740	0,4282	0,8956	0,7310	0,5779	0,0403	0,6771	0,5689
−0,3775	−0,2959									
−1,6041	0,2573	−1,0565	1,4151	−0,8051	0,5287	0,2193	−0,9219	−2,1707	−0,0592	−1,0106
0,6145	0,5077	1,6924								
0,2944	−1,3362	0,7143	1,6236	−0,6918	0,8580	1,2540	−1,5937	−1,4410	0,5711	−0,3999
0,6900	0,8156	0,7119								
−0,4326	−1,6656	0,1253	0,2877	−1,1465	1,1909	1,1892	−0,0376	0,3273	0,1746	−0,1867
0,7258	−0,5883	2,1832								

Выборки № 15 – № 20

0,4437 –0,9499 **0,7812** 0,5690 –0,8217 –0,2656
 –1,4751 –0,2340 **0,1184** 0,3148 1,4435 –0,3510
 0,5913 –0,6436 **0,3803** –1,0091 –0,0195 –0,0482
 1,2902 0,6686 **1,1908** –1,2025 –0,0198 –0,1567
 –0,1364 0,1139 **1,0668** 0,0593 –0,0956 –0,8323

$\bar{x} =$

Выборки № 1 – № 14

–0,2238 –0,4527 0,3638 0,0921 –0,4006 **0,7422** 0,4771 –0,5435 –0,4323 0,2464 –0,1277
 0,3725 –0,0556 0,7464

Выборки № 15 – № 20

0,1427 –0,2090 **0,7075** –0,2537 0,0974 –0,3308

$w =$

Выборки № 1 – № 14

2,2273 2,4646 2,1515 3,4976 1,5747 **0,9530** 2,2618 2,1716 3,2530 0,8086 1,5795 0,9814
 1,4511 2,7428

Выборки № 15 – № 20

2,7654 1,6185 **1,0724** 1,7714 2,2652 0,7841

$\chi^2 =$

Выборки № 1 – № 14

3,2353 5,3653 3,7264 9,2174 2,6694 **3,2928** 4,5846 4,2758 8,0683 0,8360 1,6918 1,4535
 1,8155 8,5381

Выборки № 15 – № 20

4,4058 1,8313 **3,3250** 2,8906 2,7689 0,9134

$t =$

Выборки № 1 – № 14

–0,5793 –0,9716 0,9294 0,1359 –1,3113 **4,5247** 1,1494 –1,4528 –0,7239 1,5106 –0,4500
 1,9114 –0,1853 1,3918

Выборки № 15 – № 20

0,3077 –0,7359 **3,4896** –0,7079 0,2640 –2,4439

$\varepsilon =$

Выборки № 1 – № 14

1,0724 1,2933 1,0867 1,8802 0,8481 **0,4554** 1,1523 1,0385 1,6579 0,4529 0,7877 0,5410
 0,8328 1,4888

Выборки № 15 – № 20

1,2878 0,7883 **0,5628** 0,9949 1,0240 0,3757

Таким образом, по результатам программного моделирования на компьютере процесса измерения величин, в том числе и размеров деталей на производстве, со случайной погрешностью можно заключить, что:

- с заданной вероятностью истинное значение измеряемой величины находится в расчетных пределах, однако доверительными границами эти пределы не являются; только 15 – 20 % выборок объема $n = 5$ из числа наблюдаемых воспроизводят эталонное значение погрешности измерения;
- стандартный метод расчета погрешности измерения целесообразно и необходимо дополнить проверкой статистических гипотез о значении параметров измеряемого распределения и оценивать погрешность измерения на принятом уровне значимости.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. ГОСТ Р 8.736-2011. ГСИ. Измерения прямые многократные. Методы обработки результатов измерений. Основные положения. Дата введения — 2013-01-01.
2. Гармаш А. В. Метрологические основы аналитической химии / А. В. Гармаш, Н. М. Сорокина. — М.: Изд-во МГУ им. М. В. Ломоносова, 2005.
3. Яворский В. А. Планирование научного эксперимента и обработка экспериментальных данных / В. А. Яворский. — М.: Изд-во МФТИ, 2006.
4. Сергеев А. Метрология, стандартизация, сертификация / А. Сергеев, В. Терегеря, М. Латышев. — М.: ЛитРес, 2013.
5. Недавний О. И. Основы метрологии: учеб. пособие / О. И. Недавний, А. А. Метель, М. М. Богатырева. — Томск: Изд-во Томс. ГАСУ, 2013.
6. ГОСТ Р ИСО 5725-1-2002. Точность (правильность и прецизионность) методов и результатов измерений. Часть 1. Основные положения и определения.
7. Воицинин А. П. Задачи анализа с неопределенными данными — интервальность и/или случайность? / А. П. Воицинин // Интервальная математика и распространение ограничений: раб. совещания. — М.: Изд-во МКВМ, 2004. — С. 147—158.
8. Рабинович С. Г. О необходимости создания новых рекомендаций по оцениванию погрешностей и неопределенностей измерений / С. Г. Рабинович // Системы обработки информации. — 2010. — № 4. — С. 23—26.
9. Pearson E. S. The probability Integral of the Range in Samples of n Observations from a normal Population [Электронный ресурс] / E. S. Pearson. — Режим доступа <http://biomet.oxfordjournals.org/content/32/3> — 4.toc (дата обращения: 15.01.2012).
10. Куликов В. А. Наблюдаемость выборочных распределений при измерениях в судостроении / В. А. Куликов // Вестник Государственного университета морского и речного флота имени адмирала С. О. Макарова. — 2015. — № 4 (32). — С. 158—163.
11. Корн Г. Справочник по математике / Г. Корн, Т. Корн. — М.: Наука, 1974.

SIMULACION OF RANDOM MEASUREMENT ERRORS IN SHIPBUILDING PROGRAMMATICALLY

Dimensional control of details in the ship's engineering in the real world is always accompanied by errors in select parts, afflicting both the quality of parts and assemblies, and on the economic efficiency of production. Quantitatively this errors are characterized by the parameters whose value is determined by the measurement error.

It is important to detect and estimate the random component of measurement error. The standard recommends that evaluate this component of measurement error confidence interval boundaries. The confidence level of the theoretical Student's t-distribution is transferred to the sampling distribution of the multiple real-world measurements.

Experimental validation of defined thus errors with limited samples almost impossible. Digital computer technologies allow to simulate random sampling distributions when measuring values with a single value and to explore the reliability of estimates of error.

Through software we obtained two sets of samples from standardized normal distribution of random variable. They showed that only 15 ... 20% of them reproduce the trust boundary of the simulated distribution. Therefore, calculated according to the standard boundary errors in sampling small amounts of trust are not. The expediency of implementation when two samplings and measurements verify the hypothetical values for the parameters of the distribution and measurement error with a certain level of notability.

Keywords: Normal population, samples, random error, parameters of a distribution, statistic hypothesis, level of the significance.

REFERENCES

1. Russian Federation. GOST R 8.736-2011. GSI. Izmerenija prjamye mnogokratnye. Metody obrabotki rezul'tatov izmerenij. Osnovnye polozhenija. 01 Jan. 2013.

2. Garmash, A. V., and N. M. Sorokina. *Metrologicheskie osnovy analiticheskoy himii*. M.: Moskovskij gosudarstvennyj universitet im. M.V. Lomonosova, 2005.
3. Javorskij, V. A. *Planirovanie nauchnogo jeksperimenta i obrabotka jeksperimentalnyh dannyh*. M.: MFTI, 2006.
4. Sergeev, A., V. Teregerja, and M. Latyshev. *Metrologija, standartizacija, sertifikacija*. Litres, 2013.
5. Nedavnij, O. I., A. A. Metel, and M. M. Bogatyreva. *Osnovy metrologii. Ucheb. posobie*. Tomsk: Izd-vo Tom. gos. arhit.-stroit. un-ta, 2013.
6. Russian Federation. GOST R ISO 5725-1-2002. Tochnost (pravilnost i precizionnost) metodov i rezultatov izmerenij. Chast 1. Osnovnye polozhenija i opredelenija.
7. Voshhinin, A. P. "Zadachi analiza s neopredelennymi dannymi—intervalnost i/ili sluchajnost?" *Intervalnaja matematika i rasprostranenie ogranichenij: Rabochie soveshhanija*. — M.: MKVM, 2004: 147-158.
8. Rabinovich, S. G. "O neobходимosti sozdaniya novyh rekomendacij po ocenivaniju pogreshnostej i neopredelennostej izmerenij." *Sistemi obrobki informacii* 4 (2010): 23-26.
9. Pearson E. S. The probability Integral of the Range in Samples of n Observations from a normal Population. Web. 15 Jan. 2012 < <http://biomet.oxfordjournals.org/content/32/3> — 4.toc >.
10. Kulikov, V. A. "Observability sampling distributions when measuring in the marine engineering." *Vestnik Gosudarstvennogo universiteta morskogo i rechnogo flota imeni admirala S.O. Makarova* 4(32) (2015): 158-163.
11. Korn, G., and T. Korn. *Spravochnik po matematike*. M.: Nauka, 1974.

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРЕ

Куликов Валентин Александрович —
кандидат технических наук, доцент.
ФГБОУ ВО «ГУМРФ имени
адмирала С.О. Макарова»
valekulikov@yandex.ru

INFORMATION ABOUT THE AUTHOR

Kulikov Valentin Alexandrovich —
Candidate of Engineering, associate professor.
Admiral Makarov State University of Maritime
and Inland Shipping
valekulikov@yandex.ru

СУДОВЫЕ ЭНЕРГЕТИЧЕСКИЕ УСТАНОВКИ, СИСТЕМЫ И УСТРОЙСТВА

УДК 629.113

О. К. Безюков,
А. А. Денисова

МЕТОДЫ ОЦЕНКИ НАУЧНО-ТЕХНИЧЕСКОГО УРОВНЯ СУДОВ, ЭНЕРГЕТИЧЕСКИХ УСТАНОВОК И КОНТРОЛЬНО-ИЗМЕРИТЕЛЬНЫХ ПРИБОРОВ

В статье рассмотрены методы оценки технического уровня и качества судов, построенные с помощью теории подобия и анализа размерностей, а также квалитетических методов. Рассмотрены методы оценки научно-технического уровня и качества судовых энергетических установок и их главных элементов – дизельных и газотурбинных двигателей. Представлен обзор современных интегрированных информационно-управляющих комплексов, объединяющих функции судовождения и динамического позиционирования, систем управления главными и вспомогательными энергетическими установками, техническими средствами судов, грузовыми операциями и другим оборудованием судов. Рассмотрены существующие подходы к оценке технического уровня и качества контрольно-измерительных приборов (КИП), применяемых в судовой энергетике. Предложены этапы создания методики оценки научно-технического уровня, качества и конкурентоспособности контрольно-измерительных приборов для судостроения. Актуальность рассматриваемой проблемы обусловлена необходимостью совершенствования методов оценки научно-технического уровня, качества и выбора оптимальной номенклатуры КИП, что предполагается, в том числе, в рамках реализации Федерального закона № 261-ФЗ от 23.11.2009 г. «Об энергосбережении и энергоэффективности» и технических регламентов, направленных на обеспечение безопасности морского и внутреннего водного транспорта.

Ключевые слова: технический уровень, качество, квалитетическая оценка, контрольно-измерительный прибор, теория подобия и анализа размерностей, интегрированные информационно-управляющие комплексы, судовая энергетика.

«С» ТРАТЕГИЯ развития судостроительной промышленности на период до 2020 года и дальнейшую перспективу» (утв. приказом Министерства промышленности и энергетики РФ от 6 сентября 2007 г. № 354), ФЦП «Развитие гражданской морской техники на 2009 – 2016 годы» (утв. Постановлением Правительства Российской Федерации от 21 февраля 2008 г. № 103) предусматривают создание наукоемких и конкурентоспособных на российском и мировом рынках судов и судового оборудования путем сокращения общего научно-технического и технологического отставания России от передовых стран в приоритетных направлениях развития морской техники в результате разработки новых отечественных технологий в сфере судового машиностроения и приборостроения. Очевидно, что максимальный эффект в повышении конкурентоспособности продукции отечественного судостроения может быть достигнут только при комплексном подходе, направленном на повышение большинства технических показателей современного судна. Эта задача может быть выполнена в полной мере только в том случае, если будет разработана методика оценки научно-технического уровня, качества и конкурентоспособности судов, продукции судового машиностроения, систем автоматизации и приборостроения.

В настоящее время существуют методы квалитетической оценки эффективности модернизации флота [1], методы определения технического уровня и качества судов, построенные с помощью теории подобия и анализа размерностей [2], [3]. Например, в работе д-ра техн. наук, профессора П. А. Малого [2] показано, что эксплуатационно-технические свойства (эксплуатационные ходкость, энерговооруженность, материалоемкость, грузоподъемность и грузовместимость, при-

способностью к грузовым операциям, проходимость и надежность) в значительной мере определяют технический уровень теплохода в установленных условиях эксплуатации.

Перечисленные свойства характеризуются целым рядом частных показателей: удельные грузоподъемность и грузовместимость, коэффициенты утилизации, лючности, неравномерности размещения трюмов, пропульсивный КПД, удельное сопротивление и др. Наравне с самостоятельным значением этих показателей представляет практический интерес и определенное их сочетание в виде единого эксплуатационно-технического показателя, характеризующего технический уровень судна. В качестве одного из возможных показателей технического уровня, объединяющего все эксплуатационно-технические свойства, в работе [3] принято выражение работы, которую может выполнить единица мощности энергетической установки судна за время его эксплуатации при установленном сроке службы.

В ВУНЦ «Военно-морская академия имени адмирала Советского Союза Н. Г. Кузнецова», в Санкт-Петербургском государственном морском техническом университете и в ГУМРФ имени адмирала С. О. Макарова предложены методы оценки научно-технического уровня и качества судовых энергетических установок [4] и их главных элементов — дизельных [5], [6] и газотурбинных двигателей [7]. Так, д-р техн. наук, профессор Е. Н. Климов предложил следующий подход к системно-квалиметрическому анализу и сравнительной оценке качества судовой дизельной энергетической установки (СДЭУ) [4]:

- осуществляется системное выявление материально-структурных, функциональных и потенциально-системных свойств элементов и установки в целом;
- производится классификация единичных, групповых и интегральных показателей качества по различным признакам;
- определяется перечень значимых свойств и показателей качества;
- производится комплексирование показателей качества элементов и установки;
- обосновывается выбор измерительных шкал и методов количественной оценки показателей качества;
- выполняется сравнительный анализ качества элементов и установок в целом;
- определяются основные пути повышения качества рассматриваемого проекта СДЭУ.

Согласно исследованиям д-ра техн. наук, профессора В. Н. Темнова [8], целесообразно провести классификацию множества показателей СЭУ. Ключевыми, по его мнению, являются три основных признака классификации: по назначению, по отношению их к объекту и по способу измерения (рис. 1) [8].



Рис. 1. Классификация параметров СЭУ

Для оперативного контроля СЭУ предлагается рассматривать информационный показатель, отражающий такие факторы, как [8]:

- назначение получаемой информации;
- поддержание параметра в заданных пределах с помощью управляющих воздействий.

Для аварийного контроля главным является поддержание параметра в области значений, обеспечивающей безаварийную работу оборудования. В соответствии с целями получения информации при наблюдении за изменениями значений параметра критерии ценности информации для оперативного и аварийного контроля должны учитывать различные стороны происходящих процессов и, следовательно, будут отличаться.

Ценность информации о состоянии объекта, которую можно получить при наблюдении за параметром определяется тремя основными компонентами [8]:

- информационной ценностью параметра;
- целевой ценностью параметра;
- важностью контролируемого элемента.

В ВУНЦ «Военно-морская академия имени адмирала Советского Союза Н. Г. Кузнецова» д-ром техн. наук В. В. Барановским, канд. техн. наук А. А. Бабичевым предложена следующая процедура оценки корабельных газотурбинных двигателей [9]:

- выбор показателей качества для оценки;
- определение границ изменения показателей, соответствующих выбранному образцу;
- сопоставление оцениваемого образца по показателям с требованиями нормативно-технической документации или с показателями базового образца;
- формирование заключения с результатами оценки.

В связи с увеличением степени форсированности дизельных и газотурбинных двигателей, оптимальный выбор номенклатуры и типов контрольно-измерительных приборов, обладающих высоким научно-техническим уровнем и качеством, и сохранение их метрологических свойств в процессе эксплуатации приобретает большое значение в обеспечении эффективности и надежности СЭУ. Это становится особенно важным с учетом:

- увеличения объема автоматизации при переходе к безвахтенному обслуживанию СЭУ и сокращения численности машинной команды;
- расширения количества средств диагностирования при переходе от планово-предупредительных ремонтов элементов энергетических установок к ремонтам по их фактическому техническому состоянию.

В результате машинная команда имеет дело не столько с самими объектами судовой энергетической установки, сколько с показаниями контрольно-измерительных приборов, которые характеризуют состояние и параметры протекающих в СЭУ процессов.

Необходимым условием создания современной морской техники является интеграция систем управления и оборудования в единый взаимосвязанный функционально-технологический комплекс. Основой для этого должны стать современные интегрированные информационно-управляющие комплексы, объединяющие функции судовождения и динамического позиционирования, системы управления главными и вспомогательными энергетическими установками, техническими средствами судов, грузовыми операциями и другим оборудованием судов.

В начале 1990-х гг. при создании СУ ТС активно внедряется концепция АСУ. В 1993 г. разработан технический проект (ТП) микропроцессорной КСУ ТС «Утес» с элементами АСУ. Более полно функции АСУ реализованы в системе «Невод» (см. Научные проблемы корабельной энергетики / Захаров И. Г., Арефьев Я. Д., Воронович Н. А., Лейкин О. Ю. [Электронный ресурс]. — Режим доступа: <http://flot.com/science/sel.htm?print=Y#АСУ> (дата обращения: 03.08.2015)). В связи с этим, большую роль в обеспечении эффективности и надежности СЭУ играет научно-технический уровень средства автоматизации [14].

Выбор номенклатуры показателей, устанавливаемых в НТД по определению НТУ АСУ конкретного вида, включает [14], [15]:

- определение совокупности характеристик, оказывающих наибольшее влияние на достижение целей, поставленных при создании АСУ данного вида;

- исследование и выбор системы показателей для оценки и измерения выбранных характеристик АСУ;
- исследование взаимосвязи выбранных показателей и построение модели оценки их влияния на обобщенный показатель НТУ рассматриваемой системы (при необходимости);
- задание интервалов изменения показателей;
- выбор методов сбора данных и их обработки;
- выбор процедур преобразования шкал и получения обобщенных показателей;
- уточнение состава показателей НТУ с учетом требований нормативно-технических документов.

В настоящее время в ОАО «Концерн «НПО АВРОРА»» разработана автоматизированная система управления технологическими процессами (АСУ ТП) «АВРОЛОГ-СК», обеспечивающая автоматизацию систем и оборудования скоростных судов, таких как крыльевые устройства, устройства управления и стабилизации параметров движения, главная энергетическая установка, вспомогательная энергетическая установка, радиооборудование и навигационное оборудование, электрооборудование, вспомогательные механизмы и технические средства энергетических установок, общесудовые системы и противопожарные системы и средства [10], [11]. Примером успешной реализации указанных принципов является система «АРГУС-Д» производства ОАО ПКО «ТЕПЛООБМЕННИК», которая является цифровой системой управления дизельными двигателями и устанавливается на судах со средним водоизмещением ([Электронный ресурс]. — Режим доступа: <https://teploobmennik.ru/ru/2009-06-05-12-28-21/marine> (дата обращения: 03.08.2015)).

Круг задач, решаемых АСУ ТП судна, чрезвычайно широк и разнообразен. Состав конкретной АСУ ТП определяется, прежде всего, типом и целевым назначением судна, классом его автоматизации и специальными требованиями заказчика (в том числе необходимость соответствия требованиям определенных классификационных обществ и международным морским конвенциям) [10], [11]:

1. АСУ навигации и судовождения.
2. АСУ радиосвязи.
3. АСУ судовыми техническими средствами (АСУ ТС), в частности:
 - подсистема управления энергетическими процессами МО и общесудовыми системами;
 - управление ГД и ВРШ и их диагностика;
 - управление электроэнергетической установкой;
 - управление вспомогательными механизмами;
 - управление автономным оборудованием (котлоагрегатами, опреснительной установкой, компрессором и т.п.);
 - управление общесудовыми системами;
 - пожарная сигнализация;
 - сигнализация о наличии воды в помещениях;
 - управление средствами борьбы за живучесть судна;
 - аварийно-предупредительная сигнализация (АПС).

Система «АРГУС-Д» (рис. 2), реализующая эти принципы и предназначенная для защиты, управления режимом и реверсом двух главных двигателей — дизелей типа М533, контроля и аварийно-предупредительной сигнализации главных двигателей и систем, обеспечивающих их работу для судна на воздушной каверне «Меркурий», прошла межведомственные и государственные испытания в составе головного быстроходного таможенного катера «Меркурий» в г. Новороссийске и в г. Владивостоке, прошла процедуру сертификации Регистра Морского Судоходства России и продолжает успешно эксплуатироваться.

Аналогичные системы широко используются в зарубежной практике судостроения и эксплуатации флота. Так, интегрированная компьютерная сеть балкера «EDELWEISS» ([Электронный ресурс]. — Режим доступа: <http://www.shippingexplorer.net/ru/ship/edelweiss/126533> (дата обращения: 03.08.2015)) позволяет обеспечить мониторинг:

- параметров главного двигателя;
- параметров вспомогательного котла;
- параметров вспомогательных дизелей электростанции;
- электрические параметры текущего состояния генераторов;
- контроль уровней топлива, смазочного масла, воды в топливных, расходных, водяных танках и танках питьевой воды;
- контроль различных напряжений судовой сети, а также состояния напряжения судовых аккумуляторных батарей;
- контроль работы механизмов обеспечивающих работу ГД (топливных, масляных насосов, насосов охлаждающей воды 1- и 2-го контуров, турбины) и т.д.

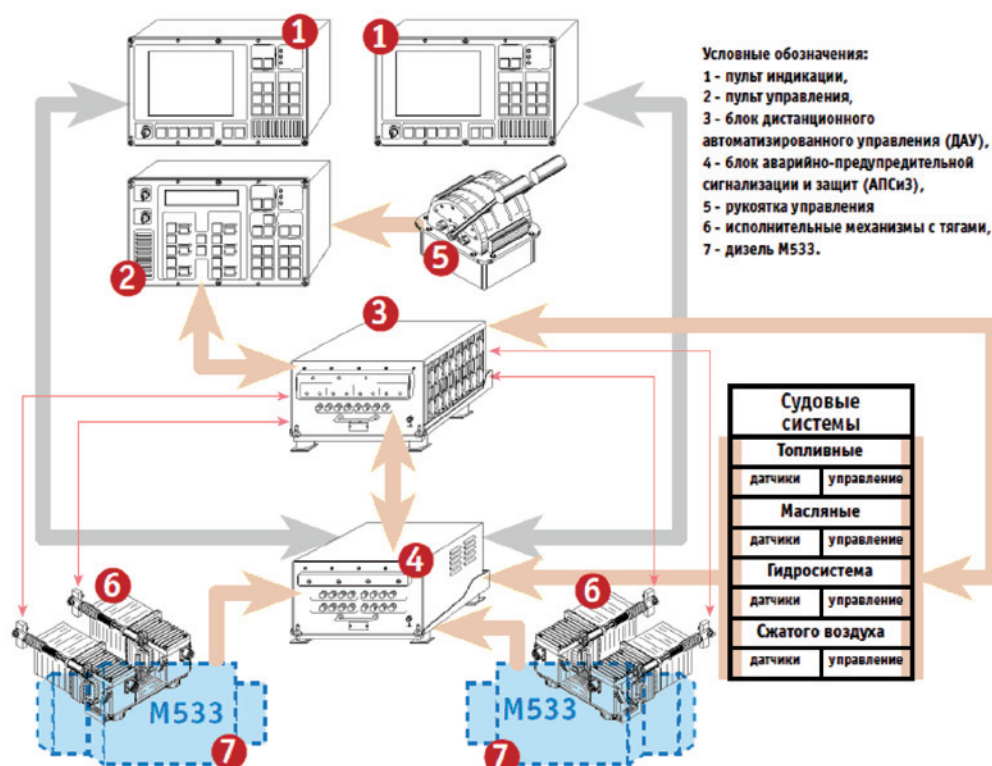


Рис. 2. Структурная схема системы контроля и управления «Аргус-Д» судна на воздушной подушке, оснащенного двигателями 56ЧН16/17 [12]

Очевидно, что наиболее важную информацию об эффективности и надежности СЭУ может дать система контроля параметров, регулирования и диагностирования судовых дизельных двигателей. Так, в настоящее время активно внедряются системы электронного управления судовыми двигателями, включающими подсистемы регулирования компрессоров агрегатов наддува, рециркуляции отработавших газов, топливоподачи, фаз газораспределения, температурой наддувочного воздуха, охлаждающей жидкости и моторного масла.

Современные системы технического диагностирования (СТД) сокращают время поиска неисправностей двигателя в десятки раз. Внедрение СТД в практику эксплуатации судовых двигателей внутреннего сгорания способствует росту экономичности 2 – 3 %, увеличению ресурса на 20 – 50 %, снижению расхода запасных частей на 10 – 15 % [16]. Поэтому наряду с диагностированием судовых дизелей по термогазодинамическим параметрам с использованием, в основном, штатных контрольно-измерительных приборов, используются дополнительные электронные системы, которые включают датчики для индицирования рабочего процесса, измерения крутящего момента и расхода топлива, показателей системы топливоподачи, параметров и свойств смазочного масла, давлений и расхода картерных газов, токсичности отработавших газов, уровня вибраций

и шума и др. Например, для четырехтактных дизельных двигателей фирмой *Caterpillar* предложена система электронного контроля и мониторинга, приведенная на рис. 3 и рис. 4.

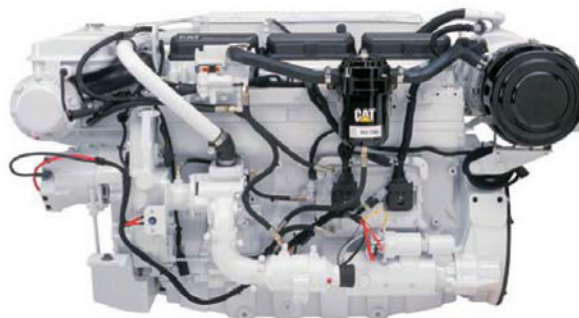
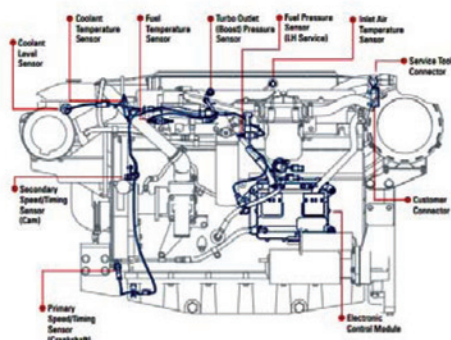


Рис. 3. Судовой дизель C12 6L130/150 производства фирмы *Caterpillar*, оснащенный системой электронного контроля и мониторинга

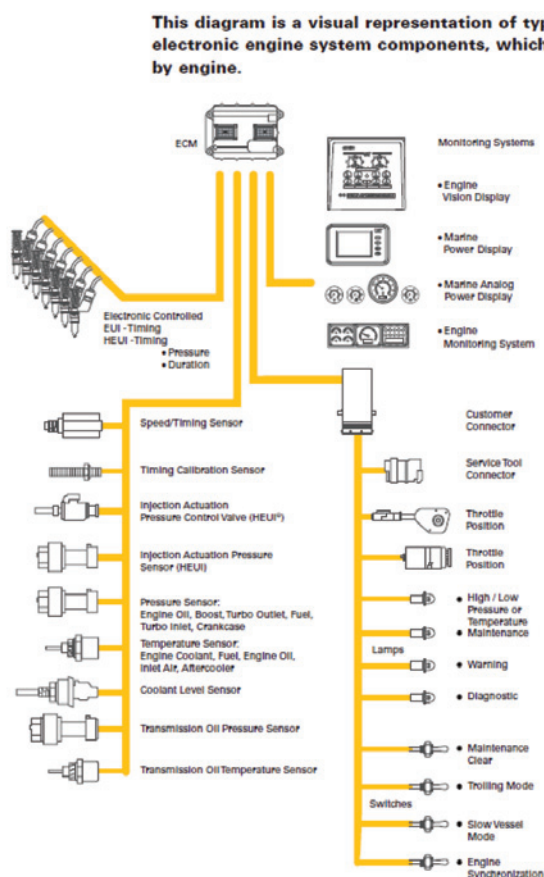


Рис. 4. Схема типовых компонентов электронной системы контроля и мониторинга дизельного двигателя (информация *Caterpillar*)

Электронная система двигателя включает датчики:

- уровня охлаждающей жидкости и ее температуры;
 - давления и температуры топлива;
 - давления воздуха на выходе из компрессора агрегата наддува;
 - температуры воздуха на входе в компрессор агрегата наддува;
 - частоты вращения коленчатого вала,
- а также микропроцессор и другие электронные компоненты.

Аналогичные системы разработаны большинством зарубежных производителей судовых дизельных двигателей [20]. Так, например, фирма *MTU* разработала систему «Monitoring and remote control for MTU ship propulsion systems», фирма *Mitsui* систему «Multipurpose controller for electronic control engine & electronic control units».

В последние годы все шире используются на морском флоте так называемые интеллектуальные дизельные двигатели, разработанные ТНК *Wartsila* (двигатели серии Sulzer RT-flex) и *MAN Diesel & Turbo* (двигатели серии ME), обеспечивающие электронное управление топливоподачей (Common Rail), фазами газораспределения, лубрикаторной системой смазки и др. (рис. 5, 6).

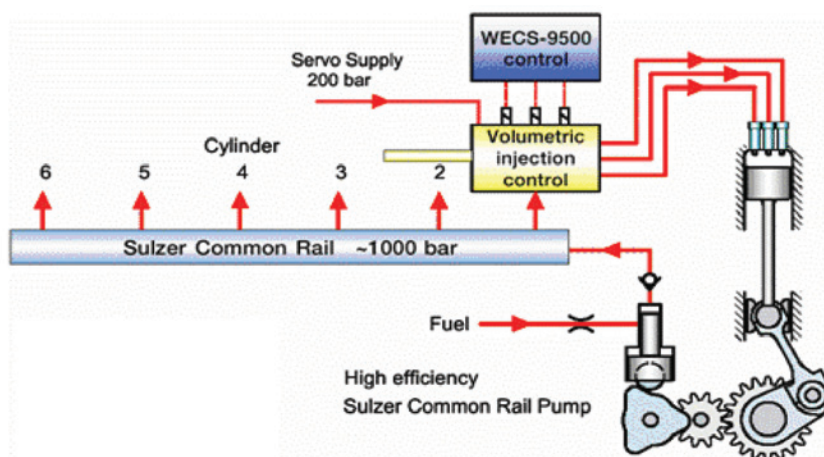


Рис. 5. Система электронного управления топливоподачей типа Common Rail малооборотных крейцкопфных дизельных двигателей серии Sulzer RT-flex (информация *Wartsila*)

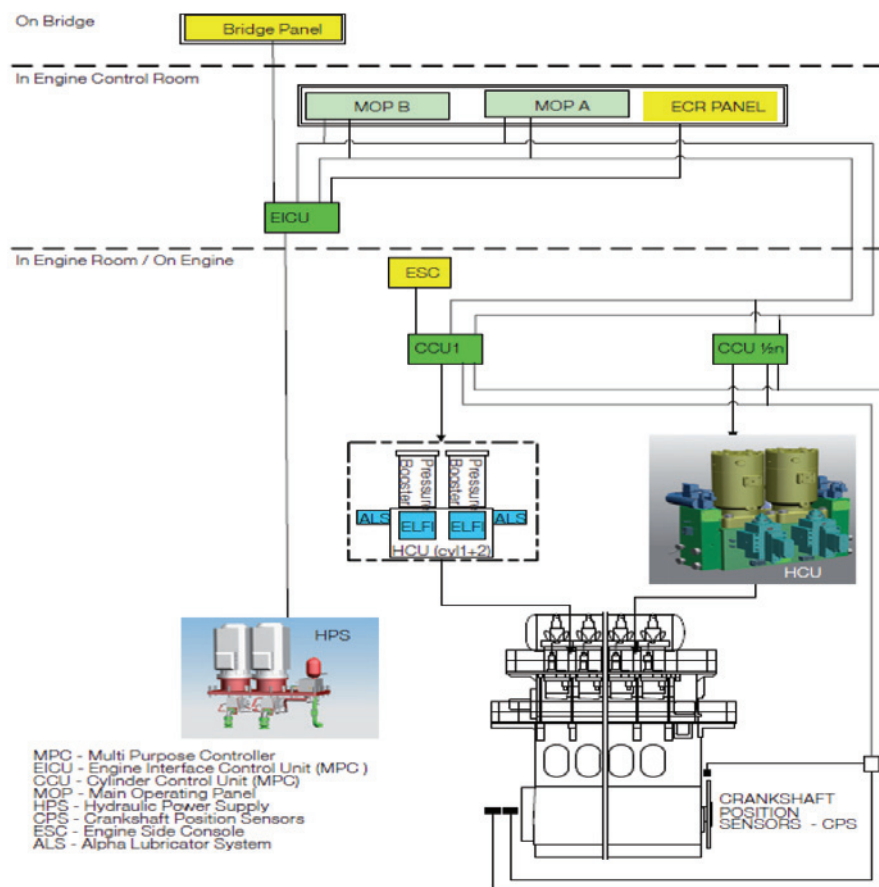


Рис. 6. Система электронного управления малооборотных крейцкопфных дизельных двигателей серии ME-B (информация *MAN Diesel & Turbo*)

Очевидно, что эффективность и надежность автоматизированных систем управления судовыми техническими средствами (дизельными и газотурбинными двигателями, котлами и др.) в значительной степени определяется научно-техническим уровнем и качеством контрольно-измерительных приборов. В настоящее время степень совершенства теплоэнергетического оборудования судовой энергетической установки столь высока, что результаты дальнейшего повышения его научно-технического уровня, эффективности и надежности зачастую соизмеримы с погрешностью применяемых в эксплуатации КИП, что вызывает необходимость повышения точности измерений и устойчивости приборов к внешним воздействиям [15], [16].

Совершенствование измерительной техники происходит как за счет использования новых физических принципов, так и за счет применения новых материалов и конструкций [17]. Таким образом, комплекс контрольно-измерительных приборов — важная и неотъемлемая составная часть судовой энергетической установки, который наряду с главными и вспомогательными ее элементами (дизельными двигателями, котлами, теплообменными аппаратами, валопроводами и т. д.), определяет ее эффективность и надежность.

С точки зрения обеспечения высокой эффективности СЭУ наиболее важными являются контрольно-измерительные приборы, обеспечивающие определение крутящего момента, частоты вращения коленчатого вала ДВС, расхода топлива (показатели назначения СЭУ), а с точки зрения обеспечений безопасности — средства измерения параметров топливной аппаратуры, на которую приходится до 70 % всех отказов СДВС [16]. Таким образом, качество и надёжность КИП, средств автоматики, диагностирования, аварийно-предупредительной сигнализации непосредственно влияет на эффективность и безопасность судовой энергетики, а, следовательно, и судов в целом. Однако существующие методы оценки научно-технического уровня и качества КИП были созданы в 60 – 80-е годы XX в. и не соответствуют современному уровню развития:

- объектов судовой теплоэнергетики, прежде всего ДВС и ГТД;
 - микроэлектроники и средств автоматизации;
 - квалитметрии приборостроения;
- и не в полной мере учитывают особенности их применения в судовых условиях.

Для оценки научно-технического уровня и качества судов, СЭУ, дизельных и газотурбинных двигателей созданы научно-технические предпосылки [1] — [19]. Основные методические принципы оценки научно-технического уровня и качества контрольно-измерительных приборов изложены в государственных стандартах, представленных в таблице.

Государственные стандарты по оценке научно-технического уровня и качества контрольно-измерительных приборов

Обозначение стандарта	Наименование стандарта
ГОСТ 4.135-85	Система показателей качества продукции. Манометры дифференциальные. Номенклатура показателей
ГОСТ 4.136-85	Система показателей качества продукции. Приборы теплофизические. Номенклатура показателей
ГОСТ 4.156-85	Система показателей качества продукции. Термометры манометрические. Термометры и терморегулирующие устройства дилатометрические и биметаллические. Номенклатура показателей
ГОСТ 4.158-85	Система показателей качества продукции. Счетчики, дозаторы и расходомеры скоростные, объемные. Расходомеры электромагнитные. Расходомеры, дозаторы и дозирующие установки вихревые. Номенклатура показателей
ГОСТ 4.179-85	Система показателей качества продукции. Машины и приборы для измерения усилий и деформации. Номенклатура показателей

Методологические подходы и показатели научно-технического уровня (инновационности, высокотехнологичности) и качества, разработанные 20 — 30 лет назад, в значительной степени устарели, так как базируются, в основном, на выборе эталонов для сравнения и проведении экспертиз. Проведение экспертиз сотен, а иногда тысяч типов судовых КИП (только в России зарегистрировано свыше 4500 предприятий, имеющих права на производство и ремонт средств измерения) с постоянно меняющимися техническими характеристиками требует много времени и финансовых затрат, носит субъективный характер, и поэтому, чаще всего, не находит практического применения.

Из изложенного следует, что совершенствование методов оценки научно-технического уровня, качества и выбора оптимальной номенклатуры КИП является актуальной задачей, в том числе — в рамках реализации Федерального закона № 261-ФЗ «Об энергосбережении и энергоэффективности» и технических регламентов, направленных на обеспечение безопасности морского и внутреннего водного транспорта. Поэтому дальнейшие исследования в соответствии с паспортом специальности научных работников 05.08.05 «Судовые энергетические установки и их элементы (главные и вспомогательные)» целесообразно посвятить следующим пунктам:

2.4. Конструирование, комплектование, компоновка СЭУ и их элементов;

2.5. Надежность, экономичность, функциональные, эргономические и технологические характеристики, диагностика и техническое обслуживание СЭУ и их элементов. Обеспечение безопасности функционирования СЭУ и защита окружающей среды.

Для достижения указанной цели необходимо решить следующие задачи:

– сформировать иерархическую систему показателей качества для судовых энергетических установок;

– провести квалиметрический анализ КИП, обеспечивающих измерение, прежде всего, показателей качества СЭУ верхних уровней;

– разработать критерии научно-технического уровня и уточненную методику принятия решения по выбору КИП для судовых энергетических установок.

Это позволит на основе единого методологического подхода, современных достижений квалиметрии и теории принятия решений создать целостную методику оценки научно-технического уровня, качества и конкурентоспособности продукции судостроения, судового машино- и приборостроения.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Соловьева О. И. Экономические аспекты квалиметрического оценивания модернизации флота / О. И. Соловьева // Транспортное дело России. — 2013. — № 1. — С. 105–108.
2. Малый П. А. Принципы определения качества и технического уровня грузовых транспортных судов / П. А. Малый // Труды ЛИВТа «Теория, проектирование и техническая эксплуатация судов речного флота». — 1970. — № 127. — С. 87–92.
3. Афромеев Э. А. Критерии технического совершенства судов / Э. А. Афромеев // Судостроение. — 2005. — № 6. — С. 14–17.
4. Климов Е. Н. Основы методики системно-квалиметрического анализа и сравнительной оценки качества главных судовых дизельных энергетических установок / Е. Н. Климов, О. В. Логинов // Труды международного научно-технического семинара «Исследования, проектирование и эксплуатация судовых ДВС». Под ред. д-ра техн. наук, проф. О. К. Безюкова. — СПб.: ПаркКом, 2006. — С. 99–104.
5. Даниловский А. Г. Критерии для согласованной оптимизации судовых энергетических установок, систем и оборудования / А. Г. Даниловский, Д. С. Иванов, Г. А. Архипов // Совершенствование конструкций судовых систем: сб. науч. трудов. — Л.: ЛКИ, 1987. — С. 88–95.
6. Безюков О. К. Критерий для оценки научно-технического уровня судовых дизелей / О. К. Безюков // Труды междунар. науч.-техн. семинара «Исследования, проектирование и эксплуатация судовых ДВС» / под ред. д-ра техн. наук, проф. О. К. Безюкова. — СПб.: ПаркКом, 2006. — С. 16–19.

7. Безюков О. К. Критерии технического уровня основных элементов судовых газотурбинных двигателей / О. К. Безюков // Материалы международной науч.-техн. конференции, посвященной 200-летию подготовки кадров для водного транспорта России «Водные пути России: строительство, эксплуатация, управление». 1 – 2 октября, 2009. Книга II. — СПб.: СПГУВК, 2010. — С. 113–122.
8. Темнов В. Н. Метрологическое исследование объектов контроля / В. Н. Темнов. — СПб: ВМИИ, 2006. — 331 с.
9. Барановский В. В. Проблемы принятия оптимальных решений при проектировании газотурбинных двигателей для использования в составе ГЭУ надводных кораблей ВМС / В. В. Барановский, А. А. Бабичев // Труды междунар. науч.-техн. семинара «Исследования, проектирование и эксплуатация судовых ДВС» / под ред. д-ра техн. наук, проф. О. К. Безюкова. — СПб.: ПаркКом, 2006. — С. 16–19.
10. Московцев Ю. П. Принципы создания АСУ ТП гражданских судов / Ю. П. Московцев // Системы управления и обработки информации: научно-технический сборник / ФНПЦ «НПО «Аврора». — 2000. — Вып. 1. — С. 61–68.
11. Корчанов В. М. Системы управления пропульсивной судовой установкой на базе комплекта КСА / В. М. Корчанов, Ю. П. Московцев, Г. П. Орунов // Системы управления и обработки информации: науч.-техн. сб. / ФНПЦ «НПО «Аврора». — 2000. — Вып.2. — С. 69–72.
12. Система управления дизелями М533 для судна на воздушной каверне «Меркурий» / А. Лебедев, С. Сафонов, А. Касаткин, В. Серёгин // Современные технологии автоматизации. — 1999. — № 1. — С. 20–24.
13. Грошева Л. Разработка комплексной системы контроля и управления на базе промышленных контроллеров FASTWEL / Л. Грошева, В. Мерзляков, С. Перевезенцев [и др.] // Современные технологии автоматизации. — 2015. — № 3. — С. 46–52.
14. РД 50-492-84. Методика оценки научно-технического уровня АСУ. Типовые положения. — М.: Изд-во Стандартов, 1985. — 17 с.
15. Тимофеев Ю. К. Системы управления судовыми энергетическими процессами / Ю. К. Тимофеев. — СПб.: Судостроение, 1994. — 312 с.
16. Пальтов С. А. Контроль рабочих процессов судовых двигателей с использованием электронных систем индцирования. Автореферат дис. ... канд. техн. наук / С. А. Пальтов. — СПб.: ФГОУ ВПО ГМА им. адм. С. О. Макарова, 2010. — 21 с.
17. Агеев В. И. Контрольно-измерительные приборы судовых энергетических установок: устройство, эксплуатация, эффективность: справочник / В. И. Агеев. — Л.: Судостроение, 1985. — 416 с.
18. Лашко В. А. Перспективы развития интеллектуальных поршневых ДВС / В. А. Лашко // Ученые заметки ТОГУ. — 2014. — Т. 5. — № 1. — С. 260–287.
19. Андрианов Ю. М. Квалиметрия в приборостроении и машиностроении / Ю. М. Андрианов, А. И. Субетто. — Л.: Машиностроение, Ленингр. отд., 1990. — 223 с.
20. Clockner M. Digital Control of Diesel Engines / M. Clockner, I. Bach. — Die Bibliothek der Technic. Band 244, Verlag moderne industrie, 2003. — 70 p.

METHODS FOR ASSESSMENT OF SCIENTIFIC AND TECHNICAL LEVEL OF SHIP POWER PLANTS AND CONTROL INSTRUMENTATION

The article describes the methods of determining the technical level and quality of ships, constructed using the similarity theory and dimensional analysis. The methods of evaluation of the scientific and technical level and quality of ship power plants and their key components - diesel and gas turbine-motors. A review of modern integrated information and control systems that combine the functions of navigation and dynamic positioning, control the main and auxiliary power units, technical equipment of vessels, cargo operations and other equipment of vessels. The existing approaches to the assessment of the technical standards and quality control instruments applicable to the ship's energy-power industry. Proposed steps for creating a methodology for assessing the scientific and technological level, quality and competitiveness con instrumentation for shipbuilding.

Keywords: technical level, quality, qualimetric check, similarity theory and dimensional analysis, integrated information management systems, marine energetic.

REFERENCES

1. Solovyova, Olga. "Economic aspects of qualimetric estimation of fleet modernization." *Transport business in Russia* 1 (2013): 105-108.
2. Maliy, P. A. "Principy opredeleniya kachestva i tehnikeskogo urovnya gruzovyh transportnyh sudov." *Trudy LIVTa «Teoriya, projektirovanie i tehnikeskaya jekspluatsiya sudov rechnogo flota»* 127 (1970): 87-92.
3. Aframeev, E. A. "Vessels technical perfection criterion." *Sudostroenie* 6 (2005): 14-17.
4. Klimov, E. N., and O. V. Loginov. "Osnovy metodiki sistemno-kvalimetricheskogo analiza i sravnitelnoj ocenki kachestva glavnyh sudovyh dizelnyh jenergeticheskikh ustanovok." *Tr. mezhdunarodnogo nauchno-tehnicheskogo seminar «Issledovaniya, projektirovanie i jekspluatsiya sudovyh DVS»*. Pod red. d.t.n., prof. O.K. Bezjukova. SPb.: Park-Com, 2006: 99-104.
5. Danilovskij, A. G., D. S. Ivanov, and G. A. Arkhipov. "Kriterii dlja soglasovannoj optimizacii sudovyh jenergeticheskikh ustanovok, sistem i oborudovaniya." *Sovershenstvovanie konstrukcij sudovyh sistem: sb. nauchn. tr./ LKI*. L., 1987: 88-95.
6. Bezyukov, Oleg. "Kriterij dlja ocenki nauchno-tehnicheskogo urovnya sudovyh dizelej." *Tr. mezhdunarodnogo nauchno-tehnicheskogo seminar «Issledovaniya, projektirovanie i jekspluatsiya sudovyh DVS»*. Pod red. d.t.n., prof. O.K. Bezjukova. SPb.: Park-Com, 2006: 16-19.
7. Bezyukov, Oleg. "Kriterii tehnikeskogo urovnya osnovnyh jelementov sudovyh gazoturbinnnyh dvigatelej." *Materialy mezhdunarodnoj nauch.-tehn. konferencii, posvjashhennoj 200-letiju podgotovki kadrov dlja vodnogo transporta Rossii «Vodnye puti Rossii: stroitel'stvo, jekspluatsiya, upravlenie»*. 1-2 oktjabrja 2009. Kniga II. SPb.: SPGUVK, 2010: 113-122.
8. Temnov, Vyacheslav *Metrologicheskoe issledovanie obektov kontrolja*. SPb.: VMII, 2006.
9. Baranovsky, V. V., and A. A. Babichev "Problemy prinjatija optimalnyh reshenij pri projektirovanii gazoturbinnnyh dvigatelej dlja ispolzovaniya v sostave GJeU nadvodnyh korablej VMS." *Tr. mezhdunarodnogo nauchno-tehnicheskogo seminar «Issledovaniya, projektirovanie i jekspluatsiya sudovyh DVS»*. SPb.: Park-Com, 2006: 16-19.
10. Moskovtsev, Yurii. "Principy sozdaniya ASU TP grazhdanskih sudov." *Sistemy upravleniya i obrabotki informacii: nauchno-tehnicheskij sbornik / FNPC «NPO «Avrora»* 1 (2000): 61-68.
11. Korchanov, V. M., Yu. P. Moskovtsev, and G. P. Orunov. "Sistemy upravleniya propulsivnoj sudovoj ustanovkoj na baze komplekta KSA." *Sistemy upravleniya i obrabotki informacii: nauchno-tehnicheskij sbornik / FNPC «NPO «Avrora»* 2 (2000): 69-72.
12. Lebedev, A., S.Safonov, A. Kasatkin, and V. Seregin. "M533 Diesel Engine Control System for the "Mercury" Hovercraft." *Contemporary Technologies in Automation* 1 (1999): 20-24.
13. Grosheva, L., V. Merzlyakov, S.Perevesentsev, and V. Pljushhaev. "Razrabotka kompleksnoj sistemy kontrolja i upravleniya na baze promyshlennyh kontrollerov FASTWEL." *Contemporary Technologies in Automation* 3 (2015): 46-52.
14. RD 50-492-84 *Metodika ocenki nauchno-tehnicheskogo urovnya ASU. Tipovye polozheniya*. M.: Izd-vo Standartov, 1985.
15. Timofeev, Yu. K. *Sistemy upravleniya sudovymi jenergeticheskimi processami*. SPb.: S Sudostroenie, 1994: 312.
16. Paltov, Sergey. *Kontrol rabochih processov sudovyh dvigatelej s ispolzovaniem jelektronnyh sistem indicirovaniya*. Avtoreferat dissert. na soiskan. uch. step. k.t.n. SPb.: FGOU VPO GMA im. adm. S.O. Makarova, 2010: 21.
17. Ageev, Vladimir. *Kontrolno-izmeritelnye pribory sudovyh jenergeticheskikh ustanovok: ustrojstvo, jekspluatsiya, jeffektivnost: spravochnik*. L.: Sudostroenie, 1985: 416.
18. Lashko, V. A. "Prospects of development of intellectual of the piston internal combustion engine." *Uchenye zametki TOGU* 5.1 (2014): 260-287.
19. Andrianov, Yuri. A. *Subetto Kvalimetrija v priborostroenii i mashinostroenii*. L.: Mashinostroenie, Leningr. otd-nie, 1990.
20. Clockner, M., and I. Bach. *Digital Control of Diesel Engines*. Die Bibliothek der Technic. Verlag moderne industrie, 2003: 244.

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

Безюков Олег Константинович —

д-р техн. наук, профессор.

ФГБОУ ВО «ГУМРФ имени адмирала С. О. Макарова»

okb-nayka@yandex.ru

Денисова Анастасия Александровна — соискатель.

ФГБОУ ВО «ГУМРФ имени адмирала С. О. Макарова»

Научный руководитель:

Безюков Олег Константинович

an-denisova@yandex.ru

INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Bezyukov Oleg Konstantinovich —

Doctor of Engineering, professor.

Admiral Makarov State University of Maritime and Inland Shipping

okb-nayka@yandex.ru

Denisova Anastasiya Aleksandrovna — applicant.

Admiral Makarov State University of Maritime and Inland Shipping

Supervisor:

Bezyukov Oleg Konstantinovich

an-denisova@yandex.ru

УДК 621.891

**Ю. Н. Цветков,
А. С. Волков**

ОСОБЕННОСТИ ОТНОСИТЕЛЬНОГО ПОЛОЖЕНИЯ КРИВЫХ ГЕРСИ – ШТРИБЕКА, ПОСТРОЕННЫХ ДЛЯ МАСЕЛ РАЗНОЙ ВЯЗКОСТИ, В ОБЛАСТИ ГИДРОДИНАМИЧЕСКОЙ СМАЗКИ

Изложены результаты экспериментов на трение силумина по серому чугуна при смазывании маслами разной вязкости: И-20А, И-40А и МС-20. Показано, что относительное положение кривых Герси – Штрибека для масел разной вязкости в области гидродинамической смазки зависит от формы представления кривых. Зависимости коэффициента трения от обратной нагрузки располагаются в соответствии с гидродинамической теорией смазки: для масел более вязких в области жидкостной смазки они лежат выше аналогичных кривых для масел менее вязких. Однако в положении гидродинамических ветвей зависимости коэффициента трения от числа Гумбеля, представляющего собой произведение динамической вязкости и скорости скольжения, делённое на погонную нагрузку, наступает инверсия, т. е. при работе на масле исходно более вязком регистрируются более низкие коэффициенты трения по сравнению с исходно менее вязкими маслами. Высказано предположение о механизме влияния молекулярной массы масел на трение при гидродинамической смазке при постоянном значении числа Гумбеля.

Ключевые слова: машина трения, гидродинамический режим смазки, коэффициент трения скольжения, кривая Герси – Штрибека, молекулярная масса минерального масла, вязкость масла.

Введение

Узлы трения многих ответственных судовых устройств и механизмов, в частности действующих устройств и судовых двигателей внутреннего сгорания (ДВС), работают в режиме гидродинамической (жидкостной) смазки. Например, в судовых дизелях в таком режиме постоянно работают подшипники скольжения шеек коленчатого вала; большую часть времени рабочего цикла в условиях гидродинамической смазки «работают» пары трения цилиндро-поршневой группы (ЦПГ): юбка поршня — втулка цилиндра и поршневое кольцо — втулка цилиндра. Потери на трение в сопряжениях ЦПГ могут превышать 50 % всех потерь на трение в дизеле [1]. Несмотря на то, что в судовых ДВС основные потери на трение приходятся на граничный режим смазки (они превышают в 3 — 4 раза потери на трение, приходящиеся на гидродинамический режим [2]), снижение трения при гидродинамической смазке, прежде всего, в подшипниках коленчатого вала и в сопряжениях юбка поршня — втулка цилиндра, позволило бы уменьшить расход топлива на несколько процентов.

Основной объем публикаций, касающийся гидродинамической смазки в узлах трения дизелей, посвящён главным образом расчёту режима смазки и определению толщины смазочной плёнки в этих узлах [3] — [7] и др. Однако эти работы носят преимущественно теоретический характер и результаты, изложенные в них, получены расчётным путём с использованием гидродинамической теории смазки. Объём экспериментальных работ, посвящённых вопросам гидродинамической смазки, со времени проведения масштабных экспериментов, выполненных Р. Штрибеком и М. Д. Герси в начале XX в., существенно уступает в настоящее время подобным экспериментам в области граничной смазки. Это объясняется тем, что область гидродинамической смазки более формализована: уравнения Ньютона и Рейнольдса позволяют определять многие параметры режима гидродинамической смазки расчётным путём [8]. Но и в области гидродинамической смазки остаётся много «белых пятен», в частности, до конца не выяснен вопрос о влиянии молекулярной массы минеральных масел на трение при жидкостной смазке.

Традиционно изменение режима смазки при варьировании внешних условий описывается кривой Герси – Штрибека — зависимостью коэффициента трения f от числа Гумбеля $Z = \eta v / p_{\text{пог}}$, где η — динамическая вязкость масла; v — линейная скорость скольжения; $p_{\text{пог}}$ — погонная нагрузка [8]. При анализе работы пары трения в масле конкретной марки кривые Герси – Штрибека строятся, как правило, при варьировании скорости скольжения v (при $p_{\text{пог}} = \text{const}$) или нагрузки $p_{\text{пог}}$ (при $v = \text{const}$). Поэтому наряду с представлением кривых Герси – Штрибека в традиционной форме как $f(\eta v / p_{\text{пог}})$ часто используются зависимости коэффициента трения от скорости скольжения (при постоянных нагрузке и вязкости) или коэффициента трения от обратной нагрузки (при постоянных скорости и вязкости).

Согласно закону Ньютона можно предположить, что с увеличением вязкости масла будут возрастать и потери на трение поршня по втулке цилиндра. Действительно, например, в статье [9] приводятся кривые Герси – Штрибека, построенные как зависимости $f(v)$ для масел разной вязкости при одинаковой нагрузке. При этом в области жидкостной смазки кривая для более вязкого масла проходит выше кривой для менее вязкого масла, в отличие от области граничной смазки, где всё происходит наоборот, что согласуется с теорией. Однако в работе [10] гидродинамические ветви кривых Герси – Штрибека, построенных как зависимости коэффициента трения f от комплекса $\eta v / p_{\text{пог}}$, для более вязких смазочных жидкостей располагаются ниже аналогичных ветвей, построенных для менее вязких жидкостей. Такое, на первый взгляд, противоречие вызвано тем, что в случае представления кривых Герси – Штрибека в виде зависимостей $f(\eta v / p_{\text{пог}})$ вязкость масла рассматривается как варьируемый параметр. В этой же работе высказано предположение о том, что положение минимума на кривых Герси – Штрибека зависит от того, какой параметр в отдельности варьируется в числе Гумбеля.

Следует отметить, что в научной литературе отсутствует анализ явления изменения относительного положения кривых Герси – Штрибека в зоне жидкостной смазки для масел разной молекулярной массы в случае учёта вязкости как варьируемого параметра, тогда как изучение этого явления представляет не только научный, но и практический интерес.

Цель настоящей работы — уточнить относительное положение кривых Герси – Штрибека на участке гидродинамической смазки, построенных для масел разной вязкости.

Методика эксперимента

Испытания проводили на машине трения МИ-1 с использованием приспособления, позволяющего снижать нагрузку до сравнительно малых значений. Использовалась пара трения: неподвижное кольцо — вращающийся ролик (рис. 1). В большинстве случаев поршни и втулки цилиндров высокооборотных и среднеоборотных дизелей, имеющих основное применение на судах речного флота, изготавливаются, соответственно, из силумина и серого чугуна. Поэтому кольца и ролик были изготовлены из силумина АК12пч и серого перлитного чугуна соответственно.

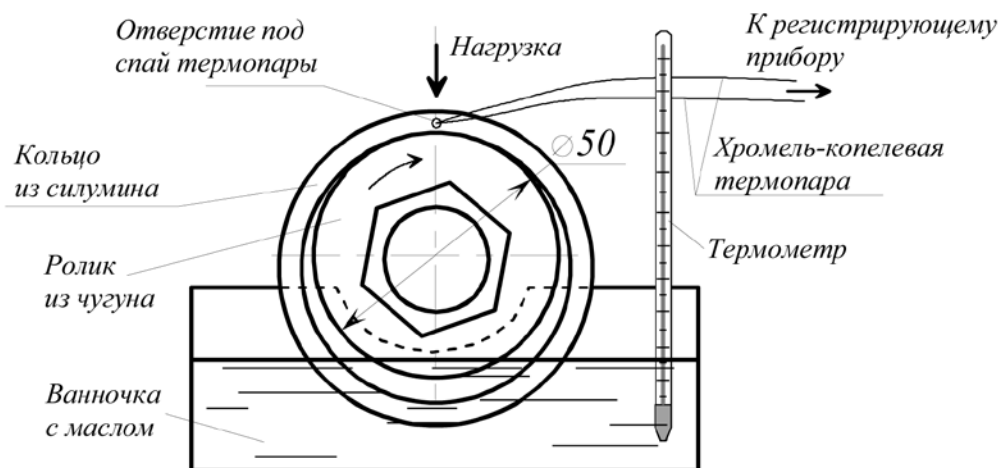


Рис. 1. Схема испытаний

Диаметр и ширина ролика равнялись, соответственно, 50 и 12 мм, а внутренний диаметр и ширина кольца — 52 и 10 мм. Частота вращения ролика составляла 200 об/мин (линейная скорость 0,52 м/с). В качестве смазочного материала применяли масла разной вязкости, не содержащие присадок: И-20А, И-40А и МС-20. Вязкость масел при разных значениях температуры определяли на ротационном вискозиметре Брукфильда LVDV-II+Pro. Предварительный контроль масел методом инфракрасной спектроскопии показал схожесть их молекулярной структуры, т. е. различие в вязкости масел объясняется главным образом их молекулярной массой. Указанные виды масла были выбраны также с учётом того, чтобы значения их вязкости в температурных условиях настоящего эксперимента находились в диапазоне значений вязкости моторных масел при рабочих температурах в дизельных двигателях.

Во время испытаний кольцо к ролику (для самоустановки кольца при трении) прижимали через шарик. Для этого на наружной поверхности кольца высверливали шесть лунок, через 60° каждую. Температуру измеряли с помощью хромель-копелевой термопары, спай которой вставляли в отверстие диаметром 0,5 мм в торцевой поверхности кольца на расстоянии 0,5 мм от поверхности трения. Поверхность трения колец была обработана точением. Для испытаний брали три кольца. Для каждой марки масла эксперименты проводили трижды, каждый раз на другом кольце, прижимая при этом кольцо к ролику новым участком поверхности с использованием другой лунки. Ролик перед каждым испытанием перешлифовывали, прижав к его цилиндрической поверхности при вращении шкурку зернистостью 800, до появления равномерного металлического блеска. Таким образом, исходная шероховатость ролика в разных опытах была примерно одинаковой. Контроль шероховатости проводили на профилографе MahrSurf PS1, базовая длина составляла 0,8 мм, длина оценки 4,0 мм (количество базовых длин равно пяти), длина трассирования — 5,6 мм. Дополнительно оценивали износ ролика и кольца взвешиванием их на аналитических весах ВЛР-200 с точностью до 0,10 мг до и после испытаний. Таким образом, испытания включали три серии экспериментов, причем каждая серия проводилась на масле другой марки и состояла из трёх опытов. Каждый опыт проводили на другом кольце и перешлифованном ролике.

Отдельный опыт каждой серии проводили следующим образом. Взвешивали кольцо и после перешлифовки — ролик. Устанавливали пару трения на машину трения. Наливали в ванночку свежее масло. Включали машину трения и плавно доводили нагрузку до 500 Н. Затем давали паре трения поработать в течение 1 мин на нагрузке 500 Н и плавно увеличивали нагрузку до 550 Н, делали паузу в течение 1 мин и опять увеличивали нагрузку на 50 Н (до 600 Н), таким образом, ступенчато доводя нагрузку до 700 Н. При нагрузке 700 Н продолжали испытания до стабилизации температуры и момента трения. Затем начинали ступенчато снижать нагрузку до 10 Н. При этом на каждой ступени трение продолжалось в течение примерно 1 мин до остановки падения момен-

та трения. После чего на этой ступени регистрировали значение момента трения и температуры. Снижение F_N до 10 Н гарантировало получение выраженного режима жидкостной (гидродинамической) смазки.

Следует отметить, что первоначально было запланировано проведение экспериментов в дополнение к трём маслам: И-20А, И-40А и МС-20, а также с приборным маслом МВП. Однако из-за очень низкой вязкости приборного масла качественную приработку образцов на одинаковых режимах с более вязкими типами масла произвести не удалось, так как температура масла и образцов постоянно повышалась. Последующий анализ инфракрасного спектра приборного масла показал его отличие в диапазоне волновых чисел от 600 до 1200 см^{-1} от спектров масел И-20А, И-40А и МС-20. Поэтому результаты экспериментов с использованием приборного масла МВП из анализа исключили.

Результаты экспериментов и их анализ

По результатам экспериментов были построены диаграммы Герси – Штрибека в двух формах: в форме зависимости коэффициента трения f от числа Гумбеля $Z = \eta v / p_{\text{пог}}$ и в форме зависимости коэффициента трения f от величины $1/F_N$, где F_N — сила, прижимающая кольцевой образец к ролику. Погонную нагрузку $p_{\text{пог}}$ вычисляли как отношение силы F_N к ширине кольцевого образца. Значение вязкости принимали в соответствии с температурой масла в ванночке в момент регистрации показаний. Окончательно коэффициенты трения рассчитывали как среднее арифметическое трёх значений, полученных на одинаковых нагрузках F_N в трёх параллельных опытах. Также рассчитывали средние значения вязкости для каждой нагрузки.

На рис. 2 приведены кривые Герси – Штрибека для масел И-20А, И-40А и МС-20, построенные в разных координатах. Как видно, выбранные режимы трения позволили реализовать два режима смазки: *смешанный* и *гидродинамический*. При этом относительное положение кривых на рис. 2, а принципиально отличается от относительного положения кривых на рис. 2, б. Так, если на рис. 2, а кривые Герси – Штрибека располагаются согласно значениям вязкости масла не пересекаясь, что находится в полном соответствии с теорией гидродинамической смазки, то на рис. 2, б обнаруживается следующий интересный факт: при переходе из смешанной в гидродинамическую область происходит инверсия, при этом при работе на масле с более высокой молекулярной массой, а, значит, исходно более вязком, реализуется более низкое трение, чем при работе на масле с меньшей молекулярной массой.

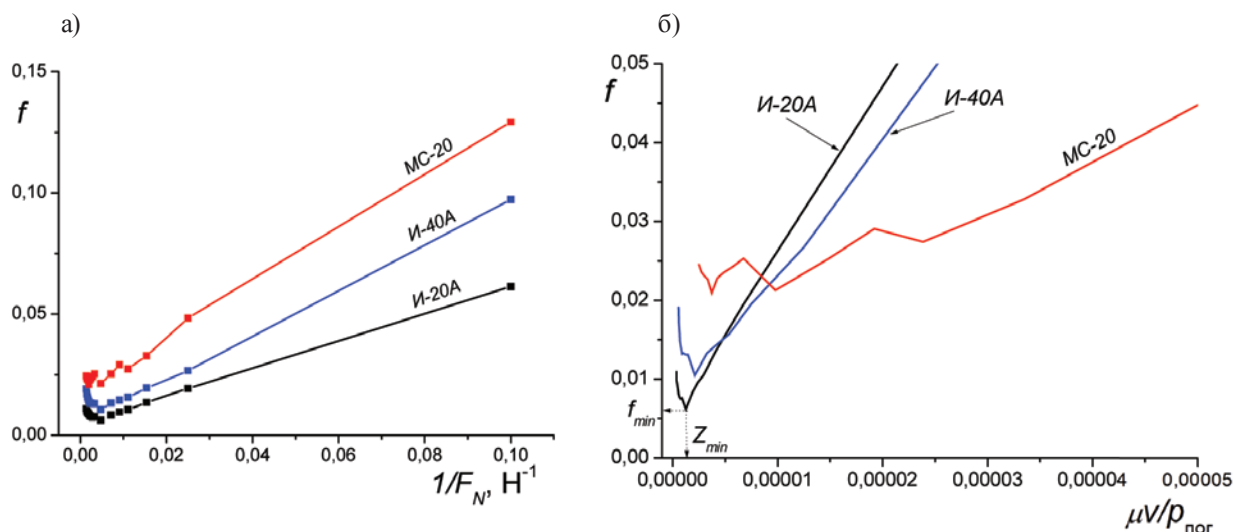


Рис. 2. Кривые Герси – Штрибека:

а — зависимости, построенные как функции $f(F_N^{-1})$;
б — зависимости $f(\eta v / p_{\text{пог}})$ для трёх масел разной вязкости

Анализ координат точек минимума (см. рис. 2, б) на кривых показал, что как для зависимостей, так и для зависимостей $f(\eta\nu/p_{\text{пор}})$, справедливо неравенство

$$(f_{\min})_{\text{MC-20}} > (f_{\min})_{\text{И-40А}} > (f_{\min})_{\text{И-20А}},$$

где MC-20, И-40А, И-20А — марки масла.

Однако, если в зависимостях $f(F_N^{-1})$ значения $f_{\min}$ для масел разной вязкости соответствуют одинаковой абсциссе, т. е. одинаковой нагрузке, то для зависимостей $f(\eta\nu/p_{\text{пор}})$ получается следующее:

$$(Z_{\min})_{\text{MC-20}} > (Z_{\min})_{\text{И-40А}} > (Z_{\min})_{\text{И-20А}}.$$

Точки минимума на кривых для разных масел на рис. 2, а соответствуют одинаковой нагрузке, что согласуется с результатами исследований, проведенных с другими типами масел, приведенными в работе [13], однако чем это вызвано, неясно и поэтому требует дальнейших исследований. Смещение точки минимума на кривых Герси – Штрибека (см. рис. 2, б) с увеличением вязкости масла в сторону больших значений числа Гумбеля означает, что для масла с большей молекулярной массой при одинаковых значениях нагрузки и вязкости (равенство вязкости масел с разной молекулярной массой достигается созданием для них различных температурных условий) для преодоления рубежного режима смазки и перехода из смешанного в гидродинамический режим требуется более высокая скорость скольжения. Увеличение значения $f_{\min}$ с увеличением вязкости масла можно объяснить при помощи графика на рис. 3. Как видно, шероховатость поверхности трения ролика осталась после трения практически неизменной, тогда как шероховатость кольца уменьшилась, и это уменьшение оказалось тем больше, чем меньше была вязкость масла. Если поверхность очага износа на кольце после работы на масле И-20А имела равномерный металлический блеск полированной поверхности, то после работы на масле MC-20 заполированные («вытертые») участки в очаге износа чередовались с микроучастками исходной поверхности, на которых были видны бороздки от механической обработки точением. При этом с увеличением вязкости масла также снижается площадь пятна износа.

В области смешанной смазки потери на трение определяются главным образом трением на участках граничной смазки. Известно, что насыщенные углеводороды, не имеющие полярных многофункциональных групп (гексан, циклогексан, декан и др.) не обладают способностью адсорбироваться на металлической поверхности [11], [12], вместе с тем сравнительно высоковязкие углеводороды, к которым относятся и типы масел И-20А, И-40А и MC-20, образуют остаточные слои и из зазоров полностью не выжимаются [12]. Для сравнительной оценки толщины граничных слоёв, образуемых исследуемыми маслами, воспользуемся уравнением Стефана – Рейнольдса, описывающего кинетику утончения слоя вязкой жидкости между двумя дисками [13]:

$$t = \frac{3\pi\eta r^4}{4F_N} \left(\frac{1}{h_{\text{ост}}^2} - \frac{1}{h_{\text{н}}^2} \right), \quad (1)$$

где t — время изменения расстояния между дисками от начального значения $h_{\text{н}}$ до расстояния $h_{\text{ост}}$, равного остаточной толщине слоя смазочной жидкости; η — вязкость выжимаемой жидкости; r — радиус дисков; F_N — сила, сжимающая диски.

Так как $h_{\text{н}} > h_{\text{ост}}$, $\frac{1}{h_{\text{н}}^2} \ll \frac{1}{h_{\text{ост}}^2}$, формулу (1) можно переписать в следующем виде:

$$4tF_N h_{\text{ост}}^2 = 3\pi\eta r^4. \quad (2)$$

Как известно, фактическая площадь контакта представляет собой совокупность отдельных пятен фактического контакта. Заменим фактическую площадь контакта неровностей поверхностей кругом равной площади диаметром r . Тогда для случаев сближения двух поверхностей под действием одинаковой силы F_N в течение одинакового отрезка времени t — в первом случае в масле 1, а во втором в масле 2 — можно записать следующее соотношение:

$$\frac{h_{ост1}}{h_{ост2}} = \frac{r_1^2}{r_2^2} \sqrt{\frac{\eta_1}{\eta_2}} = \frac{\pi r_1^2}{\pi r_2^2} \sqrt{\frac{\eta_1}{\eta_2}} = \frac{A_{r1}}{A_{r2}} \sqrt{\frac{\eta_1}{\eta_2}}. \quad (3)$$

Здесь A_{r1} и A_{r2} представляют собой фактические площади контакта поверхностей в масле 1 и в масле 2 соответственно.

Пусть масло 1 в выражении (3) соответствует маслу И-20А, а масло 2 — маслу МС-20. После приработки образцов перед регистрацией диаграмм Герси – Штрибека температура масел И-20А и МС-20 равнялась 27,5 и 34,5 °С соответственно, для этих температур $\eta_1 = 53$ мПа·с, $\eta_2 = 418$ мПа·с. Если принять допущение о треугольной форме неровностей, т. е. о линейном характере опорной кривой профиля, то отношение $A_{r1}/A_{r2} = S_{И-20А}/S_{МС-20}$, где $S_{И-20А}$ — площадь очага износа после приработки в масле И-20А, равна 36 мм² (рис. 3), а $S_{МС-20}$ — площадь очага износа после приработки в масле МС-20, равна 6,3 мм². Тогда $A_{r1}/A_{r2} = 36/6,3$.

Подставив полученные значения в выражение (3), получим

$$\frac{h_{ост1}}{h_{ост2}} = \frac{A_{r1}}{A_{r2}} \sqrt{\frac{\eta_1}{\eta_2}} = \frac{36}{6,3} \sqrt{\frac{53}{418}} = 2,0. \quad (4)$$

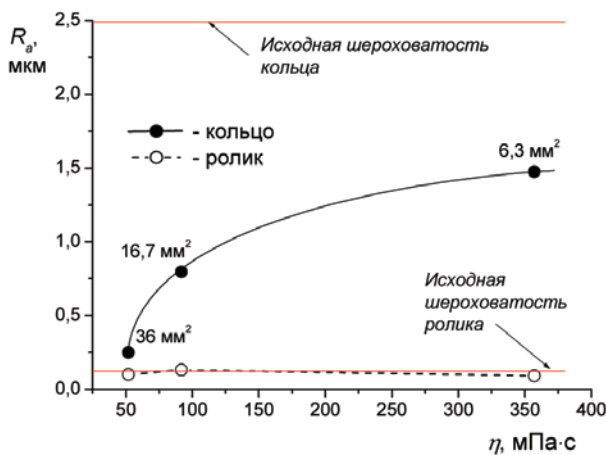


Рис. 3. Влияние вязкости на шероховатость поверхности трения кольца и ролика (цифры у экспериментальных точек показывают площадь очага износа на кольце)

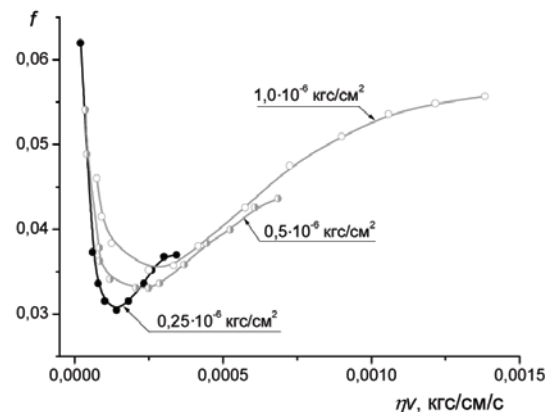


Рис. 4. Кривые Герси – Штрибека, построенные для случаев смазывания маслом одной марки, но при разных значениях температуры по результатам обработки данных [9] (сохранены авторские единицы измерения)

Таким образом, несмотря на существенную большую вязкость масла МС-20, его остаточные слои на фактических пятнах контакта получаются после приработки значительно тоньше слоёв, получаемых после приработки на масле И-20А. В проведённом анализе не принималось во внимание относительное скольжение поверхностей, но порядок полученного соотношения представляется верным. Металлические поверхности с более толстыми граничными слоями разнесены на большее расстояние, при этом силы Ван-дер-Ваальса F_a между ними зависят от расстояния H между поверхностями согласно следующему выражению [14]:

$$F_a = -\frac{\text{const}}{H^4}, \quad (5)$$

где const — опытная постоянная.

Следовательно, если в соответствии с соотношением (4) толщина остаточного слоя на поверхностях после приработки в масле МС-20 будет в 2 раза меньше толщины слоя, полученного после приработки на масле И-20А, то силы адгезии в первом случае будут в 16 раз больше. Таким образом, более гладкая поверхность очага приработки и большая его площадь после приработ-

ки на масле И-20А ведёт к существенному снижению давления на фактических пятнах контакта и, как следствие, к созданию условий для полимолекулярной граничной смазки [12]. Тот факт, что число таких пятен после приработки на масле МС-20 получается значительно меньше, не имеет решающего значения, так как всё определяется давлением на этих пятнах и соответственно возможностью существования полимолекулярной граничной смазки, при этом $\tau_{\text{мон}} \gg \tau_{\text{пол}}$, где $\tau_{\text{мон}}$ и $\tau_{\text{пол}}$ — сопротивление сдвигу в полимолекулярном и мономолекулярном граничном слое соответственно.

Обнаружено интересное явление, когда в области гидродинамической смазки работа на масле исходно более вязком, т. е. при сравнении в одинаковых температурных условиях, сопровождается меньшими потерями на трение, чем при работе на масле с исходно меньшей вязкостью. На наш взгляд, это объясняется, прежде всего, разницей молекулярных масс масел, а значит, для рассматриваемых масел — длиной молекулярной цепи, а также подтверждается обработкой данных, представленных в работе [9], где приведены зависимости коэффициента трения f от скорости относительного скольжения v , построенные для одного масла, но при разных значениях температуры. Таким образом, изменения вязкости в опытах добивались не применением масла с другой длиной молекулярной цепи, а изменением температуры. Кривые $f(v)$, приведённые в [9], были перестроены в зависимости $f(\eta v)$. В данном случае нагрузку в аргументе не учитывали, так как она поддерживалась постоянной при различных значениях температуры (рис. 4). К сожалению, диапазон изменения произведения ηv для масла при максимальной температуре (вязкость $0,25 \cdot 10^{-6}$ кгс/см²) оказался недостаточным, тем не менее, как видно из рисунка, гидродинамические ветви кривых для этого масла при двух других значениях температуры (вязкость $0,5 \cdot 10^{-6}$ и $1,0 \cdot 10^{-6}$ кгс/см²) практически совпадают, т. е. в рассматриваемом случае из-за того, что использовалось одинаковое масло, влияния молекулярной массы масла на трение обнаружено не было.

Возникает вопрос: почему при трении в маслах разной молекулярной массы, но при температуре для каждого масла такой, что вязкость масел становится одинаковой, масло с более высокой молекулярной массой обеспечивает меньшее трение в условиях гидродинамической смазки, чем масло с меньшей молекулярной массой? Для выяснения ответа на него были проведены эксперименты по регистрации кривых Герси — Штрибека при работе на шлифованном ролике и кольце, предварительно отработавшем в масле МВП. После трения кольца по чугунному ролику в масле МВП на кольце сформировался очаг износа площадью 270 мм² и шероховатостью, соответствующей параметру $R_a = 0,594$ мкм. Кольцо промыли в растворителе и установили в пару к перешлифованному чугунному ролику так, чтобы контакт осуществлялся по очагу износа, сформированному при трении в масле МВП. В ванночку налили сначала масло МС-20, провели регистрацию кривой Герси — Штрибека дважды (при повышении и снижении нагрузки на пару трения) и построили осреднённую кривую Герси — Штрибека. Затем масло МС-20 из ванночки слили, ванночку промыли, пару трения при этом не размыкали, налили в ванночку масло И-40А, дали поработать паре трения в масле И-40А в течение минуты, чтобы вымыть оставшееся масло МС-20 из зазора и опять провели регистрацию кривой Герси — Штрибека дважды. То же самое проделали с маслом И-20А. На рис. 5 представлены полученные таким образом зависимости $f(\eta v/p_{\text{пор}})$. Как видно на рис. 5, в отличие от рис. 2,б, область смешанной смазки отсутствует, т. е. область гидродинамической смазки существенно расширилась, и жидкостный режим наступает при более высоких нагрузках на пару трения. Вместе с тем, предварительная приработка кольца на масле (в данном случае на масле МВП), отличном от того, на котором проводилась регистрация кривых Герси — Штрибека, неоднозначно сказалась на изменении коэффициента трения.

На рис. 6 приведена зависимость изменения коэффициента трения Δf от изменения шероховатости ΔR_a кольца, причем $\Delta f = f - f_{\text{МВП}}$, где f — коэффициент трения, полученный при работе на одном из исследованных масел И-20А, И-40А или МС-20, когда приработка осуществлялась на этом же масле; $f_{\text{МВП}}$ — коэффициент трения, полученный на одном из исследованных типов масел (И-20А, И-40А или МС-20), когда использовалось кольцо, предварительно приработанное на масле МВП (значения коэффициентов трения определяли при $\eta v/p_{\text{пор}} = 0,0005$):

$$\Delta R_a = R_a - \Delta R_{a\text{МВП}}$$

Здесь R_a — параметр шероховатости кольца, полученный при работе на одном из исследованных масел (И-20А, И-40А или МС-20), когда приработка осуществлялась на этом же масле; $R_{a\text{МВП}}$ — параметр шероховатости кольца, полученный после предварительной приработки кольца на масле МВП.

Как видно, изменение коэффициента трения Δf зависит от того, как соотносится параметр шероховатости $R_{a\text{МВП}}$, полученный после приработки на масле МВП, с параметром R_a , полученным после приработки на масле, на котором проводились дальнейшие испытания. Приработка на масле МС-20 даёт более высокую шероховатость по сравнению с маслом МВП, поэтому предварительная приработка на масле МВП привела к снижению коэффициента трения при последующей работе на масле МС-20. В случае с маслом И-20А коэффициент трения после предварительной приработки на масле МВП повысился, так как шероховатость, получаемая после приработки на масле И-20А, оказалась больше. С маслом И-40А эта закономерность несколько нарушается. Несмотря на то, что все точки лежат на одной кривой (рис. 6, где выполнено сравнение двух случаев: приработки кольца на испытываемом масле и предварительной приработки в масле МВП), сама кривая $\Delta f(\Delta R_a)$, вопреки ожиданиям, не проходит через точку с нулевыми координатами (точку пересечения пунктирных линий).

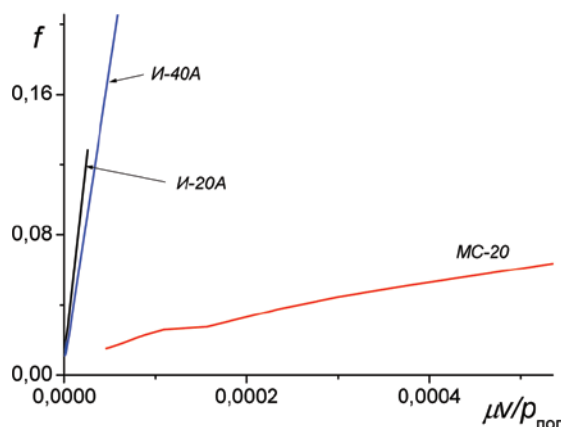


Рис. 5. Кривые Герси-Штрибека после испытаний с кольцевым образцом, предварительно приработанным в масле МВП

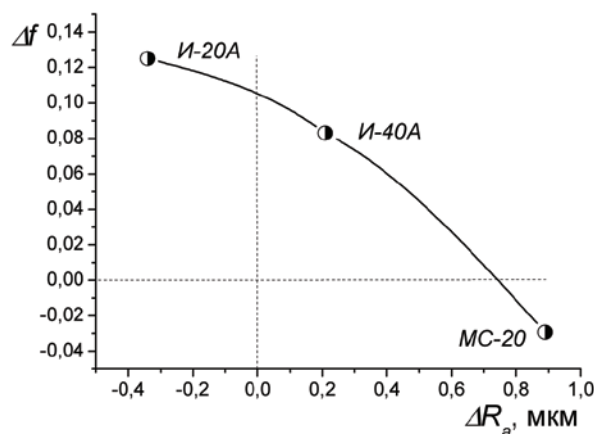


Рис. 6. Изменение коэффициента трения в зависимости от разницы в шероховатости

Использование кольца, предварительно приработанного в низковязком масле МВП, в экспериментах с разными маслами обеспечило постоянство значений площади и шероховатости поверхности трения. При этом площадь трения была значительно больше, чем получилась бы после приработки на этих маслах (270 мм² по сравнению с 6,3; 16,7 и 36 мм², получаемых, соответственно, с использованием масел МС-20, И-40А и И-20А). Увеличение площади трения привело к однозначному расширению области гидродинамической смазки на всех маслах. Однако трение оказалось зависящим от шероховатости предварительно приработанной поверхности. Это означает, что даже в области гидродинамической смазки за величину подъёмной силы и величину силы трения ответственны разные участки поверхности трения. Основной вклад в трение дают участки, где поверхности сближаются на наименьшее расстояние, т. е. участки, на которых существовал бы фактический контакт, если бы трение осуществлялось в режиме граничной смазки или без смазочного материала. При зазорах, меньших радиуса действия сил Ван-дер-Ваальса, электромагнитные поля трущихся металлических поверхностей проходят через слой масла в зазоре, воздействуя друг на друга и увеличивая сопротивление сдвигу, который происходит в жидкой прослойке между граничными слоями. Т. е. даже в области гидродинамической смазки молекулярные силы притяжения металлических поверхностей, похоже, оказывает влияние на сопротивление сдвигу на тех участках, где зазоры, хоть

и позволяют существовать жидкому слою для реализации жидкостного режима, но оказываются меньше радиуса действия молекулярных сил притяжения металлических поверхностей.

Таким образом, с точки зрения потерь на трение есть разница в том, по какому показателю условий работы сопряжения подбирать масло для режима гидродинамической смазки: по нагрузке или по комплексному показателю (числу Гумбеля $\eta\nu/p_{\text{пор}}$). При оценке условий смазки по величине $\eta\nu/p_{\text{пор}}$ масло одного гомологического ряда, но с меньшей молекулярной массой может показать в области жидкостной смазки более высокий коэффициент трения.

Выводы

1. При оценке потерь на трение в области гидродинамической смазки очень важно знать, на масле какой молекулярной массы обеспечивается заданная вязкость: на масле с более высокой молекулярной массой, но при работе в условиях более высокой температуры или на масле с меньшей молекулярной массой, но при работе в условиях более низкой температуры.

2. Необходимо провести исследования для проверки целесообразности использования в некоторых узлах трения, работающих при гидродинамическом режиме смазки, масел более вязких по сравнению со штатным, одного гомологического ряда с ним, но с применением дополнительно подогрева для приведения вязкости к нужному значению.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Луканин В. Н. Двигатели внутреннего сгорания: в 3 кн. — Кн. 1. Теория рабочих процессов / В. Н. Луканин, К. А. Морозов, А. С. Хачиян [и др.]. — М.: Высш. шк., 2007. — 479 с.
2. Цветков Ю. Н. Соотношение потерь на трение, приходящихся на граничный и гидродинамический режимы смазки в двигателях внутреннего сгорания / Ю. Н. Цветков, Д. А. Крылов, А. А. Татулян // Двигателестроение. — 2010. — № 1. — С. 13–19.
3. Энгелиш К. Поршневые кольца: в 2 т. / К. Энгелиш. — М.: Машгиз, 1962. — Т.1. — 583 с.
4. Тинг Л. Л. Анализ условий смазки поршневых колец и износа стенки цилиндра: в 2 ч. — Ч. 1. Теория / Л. Л. Тинг, Дж. Е. Майер мл. // Труды американского общества инженеров-механиков. — Серия F «Проблемы трения и смазки». — 1974. — № 3. — С. 1–12.
5. Захаров С. М. Подшипники коленчатых валов тепловозных дизелей / С. М. Захаров, А. П. Никитин, Ю. А. Загорянский. — М.: Транспорт, 1981. — 181 с.
6. Дорохов А. Ф. Уменьшение потерь мощности на преодоление сил трения в цилиндро-поршневой группе ДВС / А. Ф. Дорохов // Двигателестроение. — 1999. — № 3. — С. 18–21.
7. Суркин В. И. Смазка пар трения дизелей / В. И. Суркин, Б. В. Курчатов. — Челябинск: Изд-во Челябинского государственного агроинженерного ун-та, 1999. — 224 с.
8. Мышкин Н. К. Трибология. Принципы и приложения / Н. К. Мышкин, М. И. Петроковец. — Гомель: ИММС НАНБ, 2002. — 310 с.
9. Niemann G. Der Reibwert bei geschmierten Gleitflächen / G. Niemann, K. Banaschek // Zeitschrift des Vereines Deutscher Ingenieure. — 1953. — Bd. 95. — Nr. 6. — S. 167–173.
10. Рамайя К. С. Трение в области тонкой плёнки и маслянистость / К. С. Рамайя, А. А. Ильюшина // Всесоюзная конференция по трению и износу в машинах: II. Доклады, выступления и резолюция. — М.–Л.: Изд-во Академии наук СССР, 1940. — С. 303–312.
11. Mori S. Boundary lubrication from the Viewpoint of Surface Chemistry – Role of nasent surface on tribochemical reaction of lubricant additives / S. Mori // JTEKT Engineering Journal. English Edition. — 2011. — No. 1008E. — P. 2–12.
12. Фукс Г. И. Полимолекулярная составляющая граничного смазочного слоя / Г. И. Фукс // Исследования в области поверхностных сил: сб. докл. на второй конф. по поверхностным силам (апрель 1960 г.). — М.: Наука, 1964. — С. 176–187.
13. Мархасин И. Л. Физико-химическая механика нефтяного пласта / И. Л. Мархасин. — М.: Недра, 1977. — 214 с.
14. Ахматов А. С. Молекулярная физика граничного трения / А. С. Ахматов. — М.: Физматгиз, 1963. — 472 с.

PECULIARITIES OF THE RELATIVE POSITION OF THE HERSEY-STRIECK CURVES FOR OILS OF DIFFERENT VISCOSITY IN HYDRODYNAMIC AREA

The results of the experiments in friction of Al-Si alloy against gray cast iron lubricated with oils of different viscosity were presented. The oils employed in the experiments were the following: I-20A, I-40A, MS-20. It was shown that the relative position of the Hersey-Stribeck curves for different oils in the hydrodynamic area depends on the form of this curve presentation. The dependences of the friction coefficient on the reciprocal of load are situated relative to each other according to the hydrodynamic lubrication theory, whereas there inversion occurs in the relative position of the curves if friction coefficient is plotted as a function of the dimensionless complex $\eta v/p$, here η – dynamic viscosity, v – sliding velocity, p – linear load, and the friction coefficient in lubricating with the oil of originally higher viscosity becomes lower than that obtained with the oil of originally lower viscosity. It was hypothesized that at clearances comparative with the surface asperities height the mutual influence of the Van der Waals forces of metallic surface still takes place, though the surfaces are separated by not only boundary layers but also liquid one. The more oil molecular weight the thicker boundary layers and the more distance between the metallic surfaces and, as a result, the influence of the Van der Waals forces of metallic surfaces diminishes.

Keywords: friction machine, hydrodynamic lubrication, coefficient of sliding friction, Hersey-Stribeck curve, molecular weight of oil, oil viscosity.

REFERENCES

1. Lukanin, Valentin Nikolayevich, K. A. Morozov, A. S. Hachijan, et. al. *Dvigateli vnutrennego sgoraniya*. Vol.1. *Teoriya rabochih protsessov*. 3rd ed. Moscow: Visshaya Shkola, 2007. Print. 3 vols.
2. Tsvetkov, Yuriy Nikolayevich, Dmitriy Andreyevich Krylov, and Arshak Arakelovich Tatulyan. "Sootnosheniye poter na treniye, prikhodyashchikhsya na granichnyy i gidrodinamicheskiy rezhimy smazki, v dvigatelyakh vnutrennego sgoraniya." *Dvigatolestroyeniye* 1 (2010): 13-19. Print.
3. Englisch, Carl. *Kolbenringe*. Vol. 1. *Theorie, Herstellung und Bemessung*. Wien: Springer-Verlag, 1958. Print. 2 vols.
4. Ting, L. L., and J. E. Mayer, Jr. "Piston Ring Lubrication and Cylinder Bore Wear Analysis, Part I. Theory." *Journal of Lubrication Technology. Series F* 96.3 (1974): 1-12. Print.
5. Zaharov, Sergey Mihailovich, A. P. Nikitin, Ju. A. Zagorjanskij, et al. *Podshipniki kolenchatyh valov teplovoznih dizeley*. Moscow: Transport, 1981. Print.
6. Dorohov, Aleksandr Fedorovich. "Umenshenie poter moshnosti na preodolenie sil treniya v tsilindroporshnevoi gruppe DVS." *Dvigatolestroyeniye* 3 (1999): 18-21. Print.
7. Surkin, V. I., and B. V. Kurchatov. *Smazka par treniya dizeley*. Tchelyabinsk: Izd-vo Tchelyabinskogo gosudarstvennogo agroinzhenerenogo universiteta, 1999. Print.
8. Myshkin, Nikolay Konstantinovich, and Mark Iosifovich Petrokovets. *Tribologiya. Printsipi i prilozheniya*. Gomel: IMMS NANB, 2002. Print.
9. Niemann, G., and K. Banaschek. "Der Reibwert bei geschmierten Gleitflächen." *Zeitschrift des Vereines Deutscher Ingenieure* 95.6. (1953): 167-73. Print.
10. Ramaya, K. S., and A. A. Iliushina. "Trenie v oblasti tonkoy plenki i maslianistost." *Vsesoyuznaya konferentsia po treniyu i iznosu v mashinah. II. Doklady, vystupleniya i rezolutsiya*. Moscow–Leningrad: Izd. Akademii Nauk SSSR, 1940: 303-12. Print.
11. Mori, Shigeyuki. "Boundary lubrication from the Viewpoint of Surface Chemistry – Role of nasent surface on tribochemical reaction of lubricant additives." *JTEKT Engineering Journal*. 1008E (2011): 2-12. Print.
12. Fuks, Grigoriy Isaakovich. "Polimolekuliarnaya sostavlyayushaya granichnogo smazochnogo sloya." *Sbornik dokladov na vtoroy konferentsii po poverhnostnym silam, 1960: Issledovaniya v oblasri poverhnostnyh sil*. Moscow: Nauka, 1964: 176–87. Print.
13. Marhasin, Iliya Lvovich. *Phiziko-himicheskaya mehanika neftiannogo plasta*. Moscow: Nedra, 1977. Print.
14. Ahmatov, Aleksandr Sergeevich. *Molekuliarnaya fizika granichnogo treniya*. Moscow: Fizmatgiz, 1963. Print.

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

Цветков Юрий Николаевич —
доктор технических наук, профессор.
ФГБОУ ВО «Государственный университет
морского и речного флота имени адмирала
С. О. Макарова»
yuritsvet@mail.ru
Волков Александр Сергеевич —
инженер-конструктор.
ОАО «Инженерный центр судостроения»,
г. Санкт-Петербург
sanrock@mail.ru

INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Tsvetkov Yuriy Nikolayevich —
Doctor of Engineering Science, professor.
Admiral Makarov State University
of Maritime and Inland Shipping
yuritsvet@mail.ru
Volkov Aleksandr Sergeevich —
design engineer.
OAO «Inzhenernyj centr sudostroenija»,
St. Petersburg
sanrock@mail.ru

УДК 623.827

Е. А. Чернышов,
Е. А. Романова,
А. Д. Романов

РАЗВИТИЕ ВОЗДУХОНЕЗАВИСИМЫХ ЭНЕРГЕТИЧЕСКИХ УСТАНОВОК ПОДВОДНЫХ ЛОДОК

При всех неоспоримых плюсах атомных подводных лодок, таких как автономность, ограниченная только человеческим фактором, и превосходные боевые характеристики, атомные подводные лодки обходятся дорого не только в плане строительства, эксплуатации и утилизации, но и в плане создания инфраструктуры для обслуживания и утилизации атомных силовых установок. Не все страны могли позволить себе такие расходы, что обусловило необходимость активного развития рынка недорогих, быстро строящихся и экономически выгодных в эксплуатации неатомных подводных лодок, которые даже малому военно-морскому флоту дали бы возможность эффективно оборонять национальные воды. При этом эффективность применения неатомных подводных лодок в прибрежной и ближней морской зоне зачастую превосходит эффективность атомных подводных лодок. Одним из ключевых факторов успеха стала разработка и внедрение воздухонезависимых энергетических установок (ВНЭУ), которые позволяют значительно увеличить дальность подводного хода.

В статье показана история развития воздухонезависимых энергетических установок для подводных лодок. Приведены примеры реализации различных технологий в подводном кораблестроении и компании, проводящие научно-исследовательские работы по созданию данных технологий.

Ключевые слова: подводная лодка, воздухонезависимая энергетическая установка.

ПЕРВОЙ системой для вентиляции воздуха внутри подводной лодки (ПЛ) стал шнорхель (*snorkel*), который впервые был предложен английским ученым William Bourne в 1578 г. Одной из первых ПЛ, оснащенных шнорхелем, стала построенная в 1897 г. лодка «Argonaut». В 1927 г. голландец Wichers получил патент на «воздушную мачту» (*air mast*), предназначенную для вентиляции воздуха внутри ПЛ при нахождении на перископной глубине. Данной конструкцией были оснащены голландские ПЛ О19-О27. В немецком флоте первые ПЛ собственной разработки, оснащенные шнорхелем, появились в 1943 г. При этом шнорхель обеспечивал обновление воздуха только на перископной глубине, поэтому с момента первого появления ПЛ для увеличения дальности подводного хода предлагались различные типы «единых двигателей» [1].

С развитием двигателей внутреннего сгорания были разработаны проекты их использования в подводном положении. Так в 1901 — 1905 гг. француз Georg F. Jaubert запатентовал несколь-

ко вариантов энергетических установок «замкнутого цикла», включая системы с использованием чистого кислорода. В 1902 г. по его проекту началось строительство ПЛ типа Q37(Y), оснащенную двигателем внутреннего сгорания, работающим по замкнутому циклу (ДВС ЗЦ). ДВС ЗЦ планировалось установить на ПЛ типа «Guêpe» (Q49 и Q50), которые однако не были достроены. В 1903 г. в Германии Paul Winand получил патент по ДВС ЗЦ на основе двухтактного дизеля. В 1905 г. компания *MAN Augsburg* совместно с *Linde* вели работы по применению кислород-азотной смеси в двигателях внутреннего сгорания [2].

В Российской империи С. К. Джевецкий создал ПЛ, на которой в качестве единого двигателя использовались бензиновые двигатели. Строительство ПЛ «Почтовый», началось в 1906 г. и в 1908 г. она вошла в состав флота. С 1920-х гг. в Советском Союзе начались активные исследования в области «единых двигателей». Так В. К. Станкевич и М. Н. Кривов разработали энергоустановку на основе теплового аккумулятора с алюминиевым теплоносителем. Данная установка предполагалась к использованию для сверхмалой ПЛ. В дальнейшем прорабатывалась возможность оснащения данной установкой ПЛ типа «М».

М. А. Рудницкий предложил паротурбинную установку на основе сжигания гранулированного алюминия в среде кислорода, данный проект разрабатывался для ПЛ типа «Н» [3]. Также были разработаны единые установки на основе «унитарного» топлива (Е. Н. Гурфейн), применения водорода в ДВС ЗЦ (А. П. Пугач), паротурбинные установки замкнутого цикла и др. [4]. Однако направление ДВС ЗЦ с применением жидкого углеводородного топлива оказалось более перспективным.

В 1936 г. под руководством С. А. Базилевского была создана установка РЕДО (регенеративный единый двигатель особого назначения), в которой выхлопные газы очищались от примесей и влаги и, пополненные кислородом, направлялись во всасывающий коллектор дизеля. Избыток выхлопных газов сжимался и направлялся в баллоны. Б. Д. Златопольский предложил в 1936 г. установку ИВР (искусственный воздух с растворением углекислого газа). Углекислый газ удалялся из выхлопных газов в адсорбционной колонке с применением заборной воды. И. П. Янкевичем был предложен проект ЕД-ВВД (единый двигатель выхлоп в воду), который предусматривал отвод выхлопных газов через ступицу гребного винта. Под руководством В. С. Дмитриевского был разработан ЕД-ХПИ (единый двигатель с химпоглотителем известковым), в котором выхлопные газы направлялись в химические фильтры, где отделялся углекислый газ и окись углерода, после чего происходило обогащение смеси кислородом.

В Англии во время Второй мировой войны Francis Thomas Bacon работал над топливными элементами для британских ПЛ. Однако наибольших успехов достигли немецкие ученые, в частности Hellmuth Walter, который исследовал возможность применения перекиси водорода в качестве окислителя. В ходе Второй мировой войны были построены две ПЛ проекта Wa-201 и две ПЛ проекта Wk-202, кроме того были заложены ПЛ XVII В серии, которые находились в разной степени готовности к моменту окончания войны. Также в Германии велись работы по созданию ПЛ с единым двигателем внутреннего сгорания «Kreislauf» («круговорот»). Так, в 1944 г. на верфи фирмы *Deutsche Werke AG* заложили ПЛ U-798 XVII К серии, однако в феврале 1945 г. постройку ее приостановили. Кроме того, разрабатывался проект XXVII («Kreislauf-Seehund») с ДВС ЗЦ [2], [5].

Опыт внедрения ВНЭУ в СССР и России после 1945 г.

В 1946 г. в ЦКБ-18 начались работы по созданию опытной ПЛ проекта 615 с энергоустановкой ЕД-ХПИ, главный конструктор А. С. Кассациер. Дальность непрерывного подводного плавания была соизмерима с дальностью плавания ПЛ проектов 613 и 611, и значительно превосходила ПЛ проекта 96. Всего были построены одна ПЛ проекта 615 и 29 ПЛ по проекту А615. Эксплуатация данных ПЛ сопровождалась рядом аварий, в том числе — гибелью ПЛ. В связи с активным развитием атомных ПЛ проект ЕД-ХПИ был закрыт [6]. На базе проекта А615 в 1954 – 1955 гг. был разработан технический проект 637, в энергоустановке поглощение

выхлопного углекислого газа и обогащение его кислородом осуществлялось с помощью твердого гранулированного вещества — надперекиси натрия (Продукт Б-2). Также была разработана ВНЭУ по циклу академика Е. А. Чудакова с использованием в качестве окислителя перекиси водорода, которая имела наименование Продукт 030, или ПВК (перекись водорода концентрированная). В надводном положении дизель мог работать по обычному циклу с использованием атмосферного воздуха. В ходе технических проработок данная ВНЭУ предлагалась к использованию в различных проектах ПЛ [7].

На основании материалов немецкого конструкторского бюро *Glückauf* под руководством А. А. Антипина был разработан проект 617 — ПЛ с парогазотурбинной установкой (ПГТУ). Мощность ПГТУ зависела от глубины погружения, так как с увеличением глубины возрастали затраты на работу компрессора, удалявшего за борт углекислый газ. Летом 1952 г. начались испытания ПЛ С-99 проекта 617. В 1959 г. на ней произошла авария, после которой ПЛ не восстанавливалась. Параллельно с разработкой проекта 617 велись работы по более совершенным проектам ПЛ с ПГТУ: 617М, 635, 643, 647, которые не были реализованы в связи с началом активного строительства атомных ПЛ первого поколения.

ВНЭУ на основе газо-паротурбинных установок замкнутого цикла с использованием различных комбинаций высокометаллизированного топлива и окислителя были созданы в Военно-морском инженерном институте (ВМИИ) (военно-морской политехнический Филиал ВУНЦ ВМФ «Военно-морская академия имени Адмирала Флота Советского Союза Н. Г. Кузнецова») [8]. Кроме того, во ВМИИ под руководством Ф. З. Байбурина были выполнены различные научно-исследовательские работы, в частности НИР «Совершенствование эксплуатационных характеристик дизельных энергетических установок корабля», включая разработки технических решений при работе двигателя по замкнутому циклу [9] – [11]. Данные разработки могут быть применены не только как ВНЭУ на основе ДВС ЗЦ, но и для сокращения выбросов парниковых газов в атмосферу, которые целесообразно использовать при проектировании обычных энергетических установок.

С первой половины 1970-х гг. в ЦКБ МТ «Рубин» ведутся работы по созданию ВНЭУ с электрохимическим генератором (ЭХГ) [12]. Союзное конструкторское бюро котлостроения совместно с соисполнителями вело разработки ВНЭУ с ЭХГ для ПЛ проекта 865, глубоководного подводного аппарата «Поиск-6» и подводного средства движения «Сирена-К». В дальнейшем были разработаны энергоустановка большей мощности «Кристалл-27» со щелочным электролитом. Кроме того, в 1980-х гг. ЦКБ «Лазурит» разработало проект оснащения ПЛ проекта 613 ВНЭУ на основе ЭХГ мощностью 280 кВт (проект 613Э), разработчики — НПО «Квант» и НПО «Криогенмаш» [13], [14]. ФГУП РНЦ «Прикладная химия», ЦКБ МТ «Рубин» и ФГУП «Адмиралтейские верфи» создана установка непрерывного получения водорода методом гидротермального окисления порошков алюминия [15]. За рубежом подобные ВНЭУ получили название «полутопливные элементы» (*«semi-fuel cells»*), в них используют алюминий или другой металл для получения водорода.

В настоящее время в ЦКБ МТ «Рубин» разработана ВНЭУ с риформингом дизельного топлива и ЭХГ, что позволяет избежать хранения водорода на борту ПЛ. Предполагается, что модуль ВНЭУ будет выполнен в виде отсека ПЛ с возможностью интеграции в ПЛ. На рис. 1 представлен опытный образец БТЭ-50К.

ОАО СПМБМ «Малахит» с середины 1990-х гг. проводило исследования ВНЭУ с тепловым двигателем по замкнутому циклу. Совместно с Военным инженерно-техническим университетом были созданы экспериментальные установки с дизельными двигателями мощностью 10 и 100 кВт по полужамкнутому циклу с удалением избыточных продуктов сгорания в атмосферу (рис. 2).

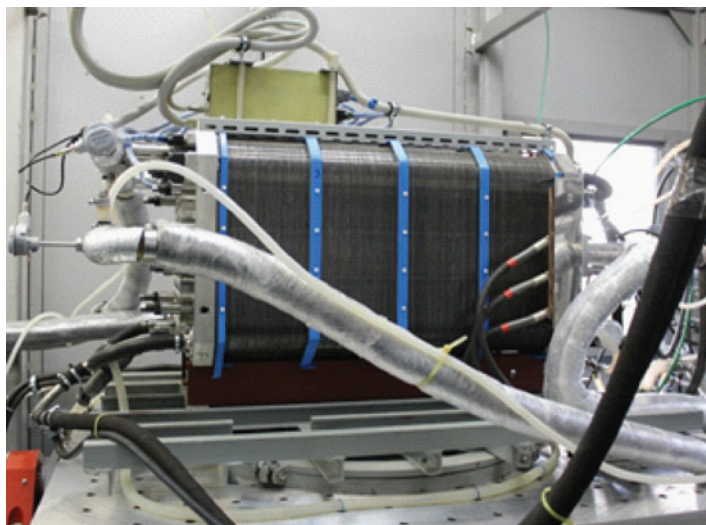


Рис. 1. Опытный образец БТЭ-50К на стенде

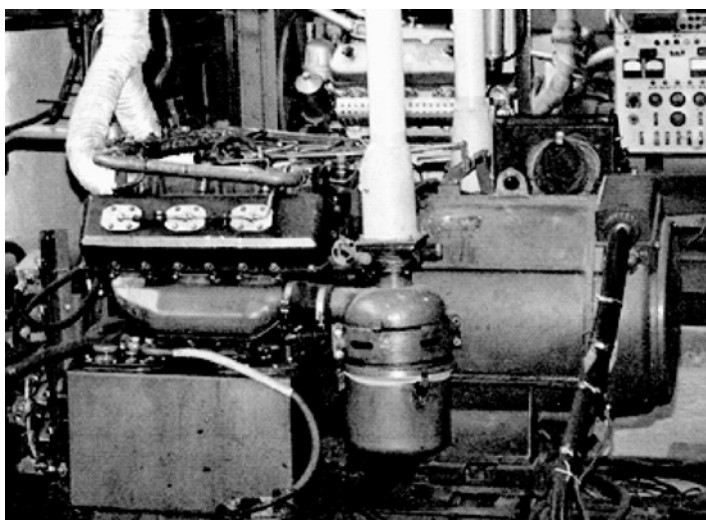


Рис. 2. Опытный образец ДВС ЗЦ на стенде [14]

Совместно с ЗАО «Турбокон» была разработана ВНЭУ с высокотемпературной паровой турбиной, работающей по замкнутому циклу. В настоящее время идет разработка проекта ВНЭУ с газотурбинным двигателем, работающим по замкнутому циклу (ГТД ЗЦ), который является дальнейшим развитием технологии дизель-генератора, работающего по замкнутому циклу [16].

Иностранный опыт создания ВНЭУ после Второй мировой войны

После окончания войны англичане подняли немецкую ПЛ U-1407, оснащенную ПГТУ Вальтера, она получила имя «Meteorite». В дальнейшем Великобритания построила две ПЛ с ПГТУ Вальтера — «Explorer» и «Excalibure». В ходе испытаний ПЛ выявились серьезные принципиальные недостатки. Одним из главных являлся значительный удельный расход перекиси водорода.

В США после окончания Второй мировой войны проводились работы по ПЛ с ВНЭУ на основе немецкой ПГТУ. В дальнейшем работы были переориентированы на ДВС ЗЦ, но с применением в качестве окислителя перекиси водорода [17]. Однако в дальнейшем, как в Англии, так и в США отказались от неатомных ПЛ для собственных флотов. Разработки ВНЭУ большой мощности велись ограниченно, так, например, компания *Perry Offshore* разработала ВНЭУ «Closed-Cycle Energy Source» (CCES) для аппарата доставки боевых пловцов.

Итальянская компания *Costruzione Mottoscafi Sottomarini SpA (COS.MO.S)* с 1955 по 2003 гг. поставила на экспорт более 20 ПЛ, в том числе оборудованные ДВС ЗЦ. В настоящее время с использованием наработок *COS.MO.S* при участии *Davida Costa* чилийская компания *Vapor Industrial* ведет разработку ПЛ «Crocodile Clase 250», оборудованную ДВС ЗЦ. Подобные установки были разработаны также в компании *Mar.Ital*, их отличительной особенностью является тороидальная конструкция прочного корпуса (*gaseous oxygen Stored in the Toroidal pressure hull*). При этом в качестве хранилища газообразного кислорода выступают элементы прочного корпуса, внутри труб хранится кислород под давлением до 350 атм. Выхлопные газы закачивались в освобождающиеся от кислорода объемы тороидальных элементов корпуса. Экспериментальная ПЛ RH-X2 в 1978 — 1982 гг. проходила испытания для отработки ВНЭУ. Начиная с 1982 г. были построены ПЛ проектов IMI-35, CEE-22 и 3-GST9. Кроме того, были разработаны проекты LWT-27, 20-GST48 и др. [18], [19]. Штаб итальянских ВМС после ознакомления с проектами ПЛ и результатами испытаний, указал, что концепция GST заслуживает внимания, однако на вооружении данные ПЛ не принимались. Проявили интерес к данным ПЛ и ВМС США [20].

Компании *RDM* (Голландия), *CDSS* (Великобритания) и *TNSW* (ФРГ) разработали энергетическую установку «Submarine Power for Extended Continuous Trial and Range Enhancement» (SPECTRE) на основе ДВС ЗЦ. На рис. 3 представлена схема ВНЭУ «Thyssen Closed Cycle Diesel system». Кроме того, малые ПЛ с ДВС ЗЦ, например «Seepferd-KD», строились в разных странах, однако серийного выпуска не было.

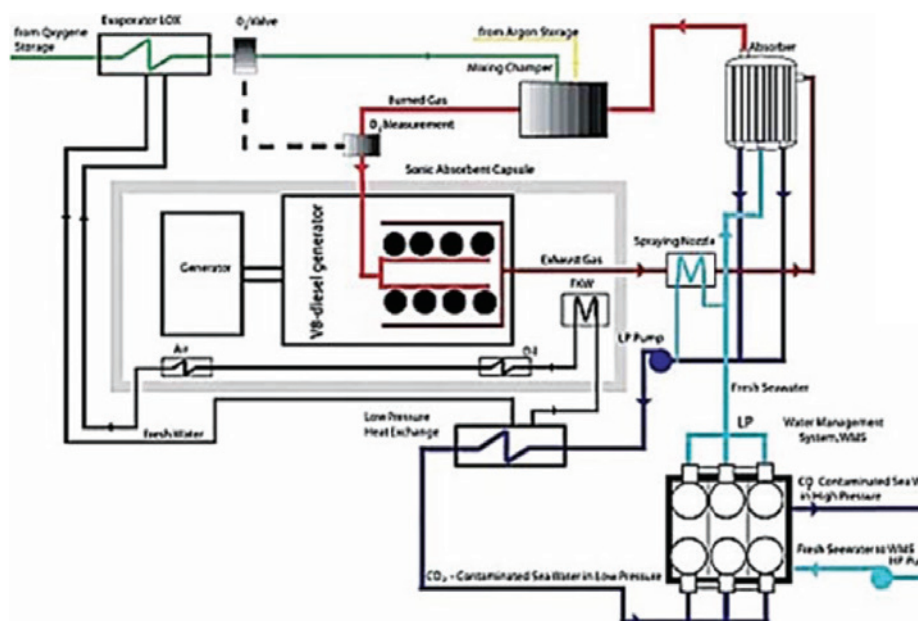


Рис. 3. «Thyssen Closed Cycle Diesel system»

ВНЭУ на основе ДВС ЗЦ с применением в качестве окислителя перекиси водорода или кислорода также были созданы в Швеции [21]. Однако в дальнейшем для ВНЭУ ПЛ применялся в основном двигатель с внешним подводом тепла (двигатель Стирлинга). Первой ПЛ с двигателем Стирлинга, вероятно, стала французская «Saga» (1971 г.), на которой были установлены два двигателя Стирлинга произведенные *Swedish co. United Stirling*. В дальнейшем шведской компанией *Kockums* были впервые серийно внедрены ВНЭУ на основе двигателя Стирлинга. Так в 1988 г. головная ПЛ типа «Nankeen» была переоборудована под двигатели Стирлинга. ПЛ «Gotland» стали первыми серийными ПЛ с двигателями Стирлинга. Кроме того, данными ВНЭУ и их модификациями оснащены ПЛ Австралии («Collins») и Японии («Soryu» и др.).

В настоящее время активно развивается ВМФ Китая [22], и наибольшее распространение в Китае в качестве ВНЭУ получил двигатель Стирлинга. Так в 2007 г. Военно-морские силы Ки-

тайской Народной Республики приняли на вооружение проект Туре 041 «Yuan class», серийно оснащенный ВНЭУ. Кроме того, данной ВНЭУ оснащены нескольких ПЛ проекта Туре 039 различных модификаций. Это позволило оснастить ПЛ с ВНЭУ не только национальные ВМФ, но и выйти на внешний рынок. В частности Китаем планируется поставить в Пакистан восемь ПЛ проекта S20, также возможна поставка трех ПЛ Таиланду. Данные ПЛ являются экспортным вариантом проекта 039/041 и могут быть оборудованы ВНЭУ.

Французская компания *DCNS* [23], больше известная в России по универсальному десантному кораблю «Mistral», разработала ВНЭУ «Module D'Energie Sous Marine Autonome» (MESMA) на основе паротурбинной установки замкнутого цикла (рис. 4). Установка производит тепловую энергию путем сжигания смеси спирта и кислорода в первичном контуре теплообменника, вторичным контуром является паровая турбина, которая приводит в действие высокоскоростной турбогенератор. Данной ВНЭУ оснащаются ПЛ «Agosta-90B» и «Scorpene».

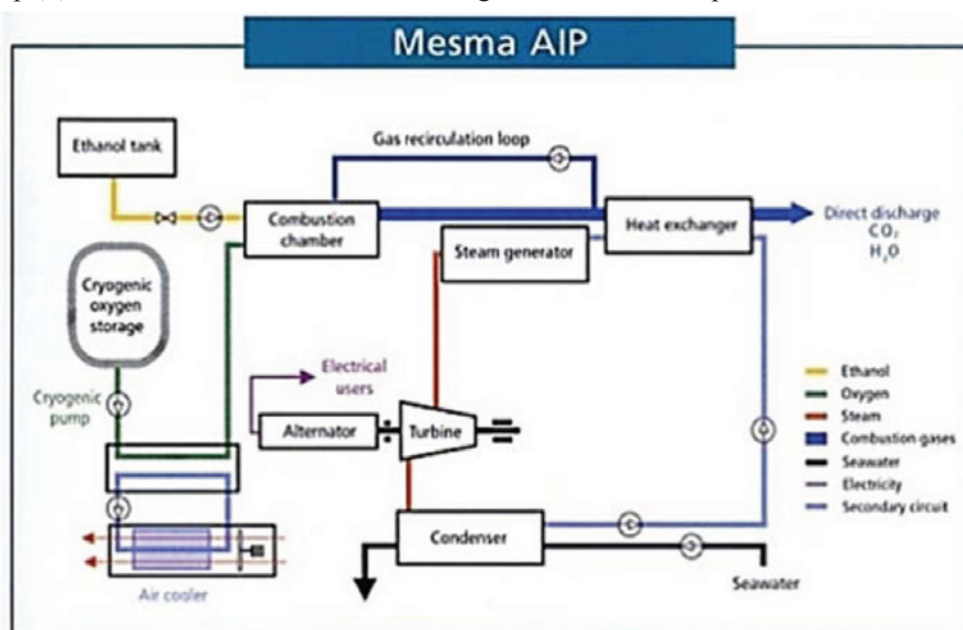


Рис. 4. Схема энергетической установки MESMA

Первая «Agosta-90B» для ВМС Пакистана была построена в Шербуре, там же началась постройка второй ПЛ, которая достраивалась уже в Карачи на верфях *Pakistan Naval Dockyard*. В 2009 г. компания *DCNS*, в рамках программы PROSUB (PROgrama de SUBmarinos), заключила контракт на постройку для Бразилии пяти ПЛ «SBR» (на базе «Scorpene», длиной до 75 м). Предполагается, что головная ПЛ должна приступить к испытаниям в 2016 г. Строительство лодок ведется предприятием *Itaguai Construcoes Navais SA* на верфи *Metal Structures Manufacturing Unit*. Также в настоящее время ведется строительство шести ПЛ «Scorpene» для Индии. Необходимо отметить, что в четырех случаях (Чили, Малайзия, Индия, Бразилия) проект «Scorpene» одержал верх над немецкими ПЛ проекта 214, оснащенных ВНЭУ на основе топливных элементов.

Первый топливный элемент был создан еще в 40-х гг. XIX в. Примерно с того же времени известен двигатель внутреннего сгорания, газовая турбина была изобретена еще в 1791 г. Однако до настоящего времени распространение топливных элементов незначительно по сравнению с тепловыми двигателями. Прорыв был достигнут в 1950-х гг. Так в Швеции по заказу *Swedish Navy* в 1964 г. компания *ASEA* изготовила демонстрационную энергоустановку на основе щелочного топливного элемента (*Alkaline Fuel Cells* или AFC) для ПЛ. Первым подводным аппаратом на топливных элементах стал «Deer Quest». Кроме того, различными компаниями и университетами были построены несколько десятков малых подводных аппаратов с ВНЭУ на основе топливных

элементов. В Германии в 1988 г. начались ходовые испытания подводной лодки «U-1» проекта 205, оборудованной ВНЭУ на основе AFC, 16 элементов по 5 кВт каждый. Причем в дальнейшем «U-1» была вновь переоборудована для испытания энергоустановки на основе ДВС ЗЦ. На основе сравнения результатов для дальнейшей работы был выбран вариант ВНЭУ на основе топливных элементов [24], [25].

AFC имеют особые требования к чистоте топлива и окислителя, которые значительно увеличивают сложность и стоимость эксплуатации. Поэтому в настоящее время в подводной технике применяют, в основном, топливные элементы с полимерной мембраной (*Polymer Electrolyte Membrane Fuel Cells* или PEMFC) и твердооксидные топливные элементы (*Solid Oxide Fuel Cells* или SOFC). Так, в настоящее время наибольшее распространение в мире получили ПЛ с ВНЭУ на основе PEMFC производства *Thyssen Krupp Marine Systems (TKMS)*, это ПЛ проектов 212, 214, 209 PN и др. Топливом для PEMFC является очищенный водород, при этом существуют технические сложности с организацией береговой инфраструктуры, в частности с получением и хранением водорода, что существенно снижает мобильность; кроме того, уничтожение топливозаправочного комплекса фактически делает невозможным применение ПЛ. Для решения этой проблемы разрабатываются ВНЭУ на основе риформера углеводородов [24], [25]. Схема имеет преимущества в части применяемого топлива и снижения уязвимости береговой инфраструктуры, однако требует дополнительные системы на борту ПЛ — риформинга и системы утилизации CO₂. В настоящее время компания *HDW* разработала ПЛ проекта 216/218SG, предназначенные для действия в удаленных океанских (морских) зонах. В конце 2013 г. Сингапур объявил о заключении контракта с немецкой компанией *TKMS* на закупку двух ПЛ проекта 218SG. ПЛ проекта 214 предполагаются к строительству в других странах. Так, в 2009 г. турецкое Министерство Обороны заключило соглашение с *HDW* о совместном производстве шести ПЛ. Эти ПЛ будут построены на *Gölcük Naval Shipyard* совместно с немецкими компаниями, но с максимальным объемом (до 80 %) местного оборудования. В дополнение к девяти построенным по немецкой лицензии ПЛ проекта 209/1200 Республика Корея планирует к 2020 г. построить девять ПЛ проекта 214 в рамках проекта KSS-2, после чего намерена принять на вооружение до шести ПЛ в рамках проекта KSS-3.

Аналогичные проекты разрабатываются также в других странах. В Канаде в 1980 гг. *Canadian Department of National Defense* начал разработку ВНЭУ мощностью 300 кВт, базирующейся на PEMFC, разработанной *Ballard Corp.* для ПЛ проекта «Oberon». Исследования были закончены в 1992 г., но внедрения не получили. В дальнейшем для ПЛ проекта «Victoria» (английские ПЛ проекта «Upholder») была разработана энергоустановка мощностью 250 кВт с использованием в качестве топлива метанола [26]. В Индии исследовательская лаборатория *Naval Materials Research Laboratory* разрабатывает ВНЭУ получением водорода на борту с помощью риформинга дизельного топлива.

Испанская *Navantia* (ранее — *Izar*) после расторжения соглашения с *DCNS* о совместном развитии программы «Scorpene» продвигает на рынок свой собственный проект S-80A с энергоустановкой на основе PEMFC мощностью 300 кВт с риформером этанола (рис. 5).

В марте 2004 г. Испания подписала контракт с государственной судостроительной компанией *Navantia* на поставку четырех неатомных ПЛ проекта S-80A, оснащенных ВНЭУ. Строительство началось в 2006 г. и продолжается до сих пор. Первоначально предполагалось, что первая ПЛ (S81 «Isaac Peral») будет построена к 2011 г., однако сложность проектировочных работ и связанные с ними технические проблемы, а также необходимость внесения ряда изменений привели к неоднократному переносу сроков сдачи ПЛ. В частности *Navantia* подписала с американской *Electric Boat*, которая принадлежит корпорации *General Dynamics*, контракт на перепроектирование подводных лодок проекта S80A. В результате сотрудничества испанская сторона рассчитывает избавиться от перевеса, возникшего при строительстве головной ПЛ «Isaac Peral».

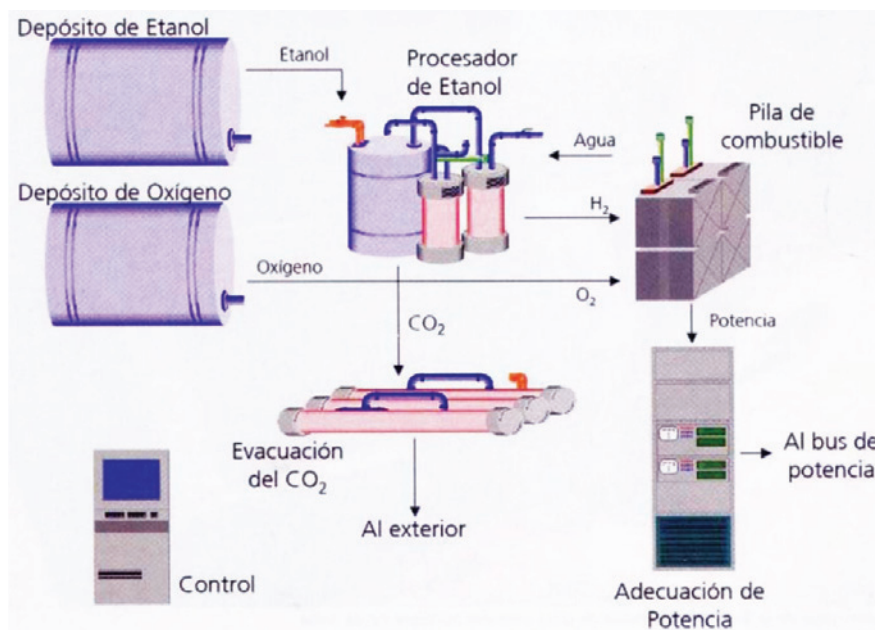


Рис. 5. Схема энергетической установки ПЛ проекта S-80A [27]

Другим вариантом применения углеводородного сырья в топливных элементах являются SOFC, которые работают при температурах более 700 °С. Причем их особенностью является возможность применения топлива с меньшей степенью очистки, в частности по сере. Также SOFC выделяют CO₂ при высокой температуре, это позволяет использовать турбину для производства электрической энергии и повышения КПД. Например компания BMT Defence Services (Великобритания) разработала проект ПЛ «Vidar-36» с ВНЭУ на основе SOFC [28].

В США в рамках государственных программ «U.S. Navy Ship Service Fuel Cell Program» и «U.S. Navy Advanced Fuel Cell Program» компаниями *Energy Research Corporation*, *Ballard*, *McDermott Technology, Inc.* были созданы энергетические установки на основе AFC, PEMFC и SOFC, использующие в качестве топлива водород или топливо JP-5, JP-8, F-76 (*Navy Distillate Fuel*). В настоящее время для наземной техники и необитаемых подводных аппаратов разработаны энергетические установки малой мощности, ориентированные на использование «единого топлива» НАТО [29].

Разработки ПЛ небольшого водоизмещения с атомной энергетической установкой

Перспективными источниками энергии считаются малогабаритные атомные энергоустановки (АЭУ) [30]. В США еще в 1969 г. был создан малогабаритный вариант АЭУ и построена ПЛ NR-1 (водоизмещение около 400 т), в СССР/России также построены малые ПЛ с АЭУ, например, проекта 1851 (водоизмещение около 550 т). Кроме того, был реализован проект оснащения неатомной ПЛ вспомогательной энергетической установкой на основе малого атомного реактора. В 1985 г. по проекту 615Э, разработанному ЦКБ «Лазурит», на заводе «Красное Сормово» было произведено переоборудование ПЛ проекта 651 с целью ее оснащения малогабаритной вспомогательной атомной установкой ВАУ-6 мощностью 600 кВт [31]. В США, Канаде и других странах также были разработаны малые энергетические установки, в том числе для применения для подводных объектов. При этом фактически малые ПЛ, оснащенные атомной установкой, сравнимы или меньше ПЛ ряда неатомных ПЛ [32]. Так, еще в 1959 г. в США построена ПЛ SSKN-597 «Tallibi» (надводное водоизмещение около 2200 т), в СССР построены с 1971 по 1981 гг. ПЛ проекта 705/705К (надводное водоизмещение около 2300 т). В настоящее время на вооружении Франции состоят ПЛ проекта «Rubis» (надводное водоизмещение около 2400 т). В настоящее время в Аргентине возможна реализация проекта оснащения недостроенной неатомной ПЛ проекта TR-1700 атомным реактором CAREM.

Заключение

Неатомные ПЛ, сравнительно недорогие по стоимости и экономичные в эксплуатации, могут позволить малому военно-морскому флоту эффективно оборонять национальные воды. Так, в марте 2010 г. в Желтом море торпеда, вероятно, выпущенная одной из северо-корейских ПЛ, потопила южно-корейский корвет «Чхонан», обладавший противолодочным вооружением.

В настоящее время оборудование подводных лодок ВНЭУ является одним из условий участия в конкурсах на поставку ПЛ [33]; кроме того, для большинства стран актуальной проблемой является оснащение собственного флота неатомными ПЛ с ВНЭУ. Причем различные страны решили одну и ту же задачу разными путями, и приоритетное направление развития ВНЭУ выбиралось исходя из уровня развития соответствующей отрасли гражданского энергомашиностроения [13], [16].

В результате данного обзора ВНЭУ ПЛ можно сделать вывод о том, что практически все ПЛ с ВНЭУ в настоящее время используют в качестве окислителя кислород, причем хранится он в жидком состоянии. Альтернативные окислители применяются, в основном, для необитаемых аппаратов с ВНЭУ и специальных энергетических установок [35], [36]. Большинство существующих в настоящее время и проектируемых подводных лодок с ВНЭУ используют в качестве топлива жидкие углеводороды [32] – [38]. Причем большинство ВНЭУ в настоящее время созданы на основе тепловых двигателей (СССР, Китай, Япония, Швеция, Франция). Попытки применения топливных элементов начались еще во время Второй мировой войны, но успешными они были только для малых обитаемых подводных аппаратов. Единственная страна, которая смогла серийно построить ПЛ с ВНЭУ с применением водорода в качестве топлива, это — Германия, но в ходе эксплуатации выяснилось, что данная технология имеет высокую стоимость и уязвимую береговую инфраструктуру. При этом ряд стран (Германия, Турция, Ю. Корея) продолжают строительство данных ПЛ. Перспективным направлением является создание ВНЭУ с ЭХГ с риформингом жидких углеводородов.

В целом, отличием ВНЭУ с ЭХГ от ВНЭУ с тепловым двигателем является отсутствие вращающегося генератора электрического тока. При этом системы удаления продуктов сгорания (разложения) дизельного горючего, состоящих, в основном, из углекислого газа, требуются для любого типа ВНЭУ, использующего углеводородное горючее.

В тот момент, когда СССР начал утилизацию ПЛ проекта А615, в разных странах начали строить малые ПЛ с ВНЭУ на основе ДВС ЗЦ (например, «Crocodile Clase 250»), такие ПЛ проектируются и строятся и сейчас. При худших виброакустических характеристиках по сравнению с другими вариантами ВНЭУ данные установки все еще востребованы. Некоторые страны имеют на вооружении значительное количество малых ПЛ, в том числе — оснащенных ВНЭУ на основе ДВС ЗЦ. Широкое использование коммерческих технологий для производства военной техники снижает стоимость жизненного цикла ПЛ. При этом стоимость средства поражения ПЛ, например торпеды Mk-48 «ADCAP», сопоставима со стоимостью малой ПЛ с ДВЦ ЗЦ.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Laudeuf M.* Sous-marins / M. Laudeuf, H. Stroh. — Paris, 1923. — 424 p.
2. *Moller E.* The encyclopedia of U-boats: from 1904 to present day / E. Moller, W.Brack. — London: Greenhill Books, 2004. — 260 p.
3. *Морозов М. Э.* «Эски» в бою. Подводные лодки Маринеско, Щедрина, Лисина / М. Э. Морозов, К. Л. Кулагин. — М.: ЭКСМО, 2008. — 148 с.
4. *Морозов М. Э.* Советский подводный флот 1922 — 1945 гг. О подводных лодках и подводниках / М. Э. Морозов, К. Л. Кулагин. — М.: АСТ, 2006. — 877 с.
5. *Маринин А.* Единый двигатель для подводной лодки / А. Маринин // Двигатель. — 2005. — № 5. — С. 19–23.
6. *Морозов М. Э.* Последние «малютки» Советского Союза. ПЛ пр.96 и А615 / М. Э. Морозов, К. Л. Кулагин. — М.: Морская коллекция, 2010.

7. Широкопад А. Б. Советские подводные лодки послевоенной постройки / А. Б. Широкопад. — М.: Арсенал-пресс, 1997. — 208 с.
8. Дядик А. Н. Корабельные воздухонезависимые энергетические установки / А. Н. Дядик, В. В. Заминов, В. А. Дядик. — СПб.: Судостроение, 2006. — 414 с.
9. Пат. 2015364 Российская Федерация, МПК F 02 B 47/00. Система для очистки отработавших газов двигателя внутреннего сгорания / Байбури Ф. З., Рычков В. А.; заявитель: Ленинградское высшее инженерное морское училище им. адм. С. О. Макарова; патентообладатель: Санкт-Петербург, Государственная морская академия имени адмирала С. О. Макарова. — № 4859236/06; заявл. 13.08.1990; опубл. 30.06.1994.
10. Пат. 2032085 Российская Федерация, МПК F 02 B 47/10. Устройство для очистки выхлопных газов двигателя внутреннего сгорания / Байбури Ф. З., Рычков В. А., Тюнин В. К.; заявитель: Ленинградское высшее инженерное морское училище им. адм. С. О. Макарова; патентообладатель: Санкт-Петербург, Государственная морская академия имени адмирала С. О. Макарова. — № 4913348/06, заявл. 22.02.1991; опубл. 27.03.1995.
11. Пат. 1825886 СССР, МПК F 02 M 25/06. Способ очистки отработавших газов двигателя внутреннего сгорания / Байбури Ф. З., Рычков В. А.; заявитель: Ленинградское высшее инженерное морское училище им. адм. С. О. Макарова. — № 4904789, заявл. 25.01.1991; опубл. 07.07.1993.
12. Ченцов М. С. Концепция установки получения водорода риформингом дизельного топлива в составе атмосферонезависимой энергетической установки с электрохимическими генераторами для неатомной подводной лодки / М. С. Ченцов, В. С. Соколов, Н. С. Прохоров // Альтернативная энергетика и экология. — 2006. — № 11. — С. 39–46.
13. Замуков В. В. Выбор воздухонезависимой энергоустановки неатомных подводных лодок / В. В. Замуков, Д. В. Сидоренков // Судостроение. — 2012. — № 4. — С. 29–33.
14. Хотинский О. В. Развитие энергетических установок подводных лодок ВМФ России: дис. ... канд. техн. наук. — Владивосток. — 2003. — 233 с.
15. Автономные комбинированные энергоустановки с топливными элементами, работающие на продуктах гидротермального окисления алюминия / А. Л. Дмитриев, В. К. Иконников, А. И. Кириллов, [и др.] // Альтернативная энергетика и экология. — 2008. — № 11. — С. 10–16.
16. Замуков В. В. Перспективы создания воздухонезависимой энергоустановки для неатомных подводных лодок России / В. В. Замуков, Д. В. Сидоренков // Изобретательство. — 2014. — № 10. — С. 23–30.
17. Гусев А. Н. Подводные лодки специального назначения / А. Н. Гусев. — М.: Моркнига, 2013. — 224 с.
18. Кипов В. Итальянские подводные лодки с энергетическими установками замкнутого цикла / В. Кипов // Зарубежное военное обозрение. — 1990. — № 5. — С. 57–59.
19. Романов А. Д. Итальянские малые подводные лодки и подводные средства движения сухого типа / А. Д. Романов, Е. А. Чернышов, Е. А. Романова // Современные наукоемкие технологии. — 2014. — № 8. — С. 35–39.
20. Rehnitz A. B. The Scientific Research Support Potential of the Submersible MARITALIA 3GST9: MPL technical memorandum / A. B. Rehnitz. — San Diego: University of California, 1990. — 52 p.
21. Кириллов Н. Г. Перспективы развития судовой энергетики на основе машин Стирлинга / Н. Г. Кириллов // Морской флот. — 2002. — № 2. — С. 30–32.
22. Ведерников Ю. В. Красный дракон: современные военно-морские силы Китая / Ю. В. Ведерников // Флот Тихого океана. — 2007. — Вып. 3. — 140 с.
23. Барабанов М. Судостроительное объединение DCNS / М. Барабанов // Экспорт вооружений. — 2010. — № 2. — С. 51–64.
24. Fuel Cell Handbook. Department of Energy. Under Contract No. DE-AM26-99FT40575. — U.S., 2000. — 352 p.
25. Psoma A. Fuel cell systems for submarines: from the first idea to serial production / A. Psoma, Gunter Sattler // Journal of Power Sources. — 2002. — № 106. — Pp. 381–383.
26. Oberon Class Submarine Occupational Hygiene Project / Final Report February. — 2006. — 111 p.
27. Valero J. Submarinos S-80 para la Armada Espanola / J. Valero // Fuerza Naval. — 2013. — № 4. — Pp. 72–79.
28. Binns S. D. Meeting the current challenge of designing high capability SSKs. / S. D. Binns // The UDT Pacific 2008 conference in Sydney, Australia. — 2008. — 17 p. [Электронный ресурс]. — Режим доступа: <http://www.bmtdsl.co.uk/media/5045482/BMTDSL-Designing-SSKs-Vidar-Confpaper-UDTPacific-Oct08.pdf> (дата обращения: 25.07.2015).

29. Романов А. Д. Развитие концепции «единого топлива» в странах НАТО / А. Д. Романов, И. Д. Романов, Е. А. Чернышов [и др.] // Международный журнал прикладных и фундаментальных исследований. — 2014. — № 9. — С. 34–37.
30. Аналитический обзор по малым модульным реакторам // Атомный эксперт [Электронный ресурс]. — Режим доступа: http://atomicexpert.com/sites/default/files/ae%20%234_obzor_0.pdf (дата обращения: 03.09.2015).
31. Иванов И. В. Большая ракетная подводная лодка пр. 651Э со вспомогательной атомной энергетической установкой (ВАУ-6) / И. В. Иванов, В. А. Полежаев // Судостроение. — 2008. — № 3. — С. 27–30.
32. Романов А. Д. Сравнительный обзор и оценка эффективности воздухонезависимых энергетических установок различных конструкций / А. Д. Романов, Е. А. Чернышов, Е. А. Романова // Современные проблемы науки и образования. — 2013. — № 6. — С. 67–74.
33. Романова Е. А. Оценка экспортного потенциала неатомных подводных лодок / Е. А. Романова, А. Д. Романов, Е. А. Чернышов // Вооружение и экономика. — 2015. — № 1 (30). — С. 99–105.
34. Luo N. $\text{NaBH}_4/\text{H}_2\text{O}_2$ fuel cells for air independent power systems / N. Luo, G. H. Miley, K. J. Kim [etc.] // Journal of Power Sources. — 2008. — V. 185. — № 2. — Pp. 685–690.
35. Mendez A. Fuel cell power systems for autonomous underwater vehicles: State of the art / A. Mendez, T. J. Leo, M. A. Herreros // Conference Proceedings Paper. — Energies «Whither Energy Conversion? Present Trends, Current Problems and Realistic Future Solutions». — 2014. — 19 p. [Электронный ресурс]. — Режим доступа: <http://sciforum.net/conference/ece-1/paper/2345> (дата обращения: 25.07.2015).
36. Шпак А. И. Анализ современного состояния и путей развития зарубежных неатомных подводных лодок / А. И. Шпак, Я. Н. Чуксин // Морской вестник. — 2004. — Специальный выпуск № 1(2). — С. 26–31.
37. Мозговой А. Подводные лодки в год водяного дракона / А. Мозговой // Национальная оборона. — 2012. — № 1. — С. 16–42.
38. Замуков В. В. Состояние и перспективы развития воздухонезависимых энергоустановок подводных лодок / В. В. Замуков, С. А. Петров, Д. В. Сидоренков // Судостроение. — 2007. — № 5. — С. 39–42.

DEVELOPMENT OF AIRINDEPENDENT POWER STATIONS OF SUBMARINES

At all indisputable pluses of nuclear submarines, such as the autonomy limited only to a human factor and excellent fighting characteristics, nuclear submarines cost much not only in the construction plan, operation and utilization, but also in respect of creation of infrastructure for service and utilization of nuclear power plants. Not all countries were able to afford such expenses that caused need of active development of the market of inexpensive, quickly under construction and economic not nuclear submarines in operation which even would give to small navy the chance effectively to defend national waters. And efficiency of use of not nuclear submarines in a coastal and near sea zone reached level, and often surpasses, nuclear submarines. Development and deployment of airindependent power stations which allow to increase range of the underwater course considerably became one of key factors of success.

The history of development of airindependent power stations for submarines is shown in article. The examples of realization of various technologies in underwater shipbuilding and the company which are carrying out research works on creation of these technologies are specified.

Key words: submarine, airindependent power station.

REFERENCES

1. Laudeuf, M., and H. Stroh. *Sous-marins*. Paris, 1923.
2. Moller, Eberhard, and Werner Brack *The encyclopedia of U-boats from 1904 to present day*. London: Greenhill Books, 2004.
3. Morozov, M. Je., and K. L. Kulagin. «E»ski» v boyu. *Podvodnye lodki Marinesko, SHCHedrina, Lisina*. M.: E'KSMO, 2008.
4. Morozov, M. Je., and K. L. Kulagin. *Sovetskiy podvodnyy flot 1922-1945 gg. O podvodnykh lodkakh i podvodnikakh*. M.: AST, 2006.
5. Marinin, A. «Edinyy dvigatel dlya podvodnoy lodki.» *Dvigatel* 5 (2005): 19–23.
6. Morozov, M. Je., and K. L. Kulagin. *Poslednie «malyutki» Sovetskogo Soyuza. PL pr.96 i A615*. M.: Morskaya kollektsiya, 2010.

7. Shirokorad, A. B. *Sovetskie podvodnye lodki poslevoennoy postroyki*. M.: Arsenal-press, 1997.
8. Dyadik, A. N., V. V. Zamukov, and V. A. Dyadik. *Korabelnye vozdukhonezavisimye energeticheskie ustanovki*. SPb.: Sudostroenie, 2006.
9. Bayburin, F. Z., and V. A. Rychkov. Sistema dlja ochistki otrabotavshih gazov dvigatelja vnutrennego sgoraniya. Rossijskaja Federacija, assignee. Patent 2015364. 13 Aug. 1990.
10. Bajburin, F. Z., V. A. Rychkov, and V. K. Tyunin. Ustrojstvo dlja ochistki vyhlopnyh gazov dvigatelja vnutrennego sgoraniya. Rossijskaja Federacija, assignee. Patent 2032085. 22 Feb. 1991.
11. Bajburin, F. Z., and V. A. Rychkov. Sposob ochistki otrabotavshih gazov dvigatelja vnutrennego sgoraniya. Rossijskaja Federacija, assignee. Patent 1825886. 25 Jan. 1991.
12. Chentsov, M. S., V. S. Sokolov, and N. S. Prokhorov. "Concept of a Hydrogen Producing Plant Based on Diesel Fuel Reforming as Part of Air-Independent Plant (AIP) with Fuel Cells for a Non-Nuclear Submarine." *International Scientific Journal for Alternative Energy and Ecology* 11 (2006): 39–46.
13. Zamukov, V. V., and D. V. Sidorenkov. "Selection of air-independent power plant for non-nuclear submarines." *Sudostroenie* 4 (2012): 29–33.
14. Hotinsky, O. V. *Razvitie jenergeticheskikh ustanovok podvodnyh lodok VMF Rossii: dis. ... kand. tehn. nauk*. Vladivostok, 2003.
15. Dmitriev, A. L., V. K. Ikonnikov, A. I. Kirillov, V. Ju. Ryzhkin, and E. A. Khodak. "Autonomous combined power plants with fuel cell which works on products of hydrothermal aluminium oxidation." *International Scientific Journal for Alternative Energy and Ecology* 11 (2008) :10–16.
16. Zamukov, V. V., and D. V. Sidorenkov. "Prospects of creation of airindependent power installation for not nuclear submarines of Russia." *Izobretatelstvo* 10 (2014): 23–30.
17. Gusev, A. N. *Podvodnye lodki spetsialnogo naznacheniya*. M.: Morkniga, 2013.
18. Kipov, B. "Italjanskije podvodnye lodki s energeticheskimi ustanovkami zamknutogo tsikla." *Zarubezhnoe voennoe obozrenie* 5 (1990): 57–59.
19. Romanov, A. D., E. A. Chernyshov, and E. A. Romanova. "Italian small submarines and underwater means of movement of dry type." *Modern high technologies* 8 (2014): 35–39.
20. Rechnitzer Andreas B. *The Scientific Research Support Potential of the Submersible MARITALIA 3GST9: MPL technical memorandum*. San Diego. University of California, 1990.
21. Kirillov, N. G. "Perspektivy razvitiya sudovoy energetiki na osnove mashin Stirlinga." *International Maritime Journal The Morskoy Flot (Marine Fleet)* 2 (2002): 30–32.
22. Vedernikov, YU. V. *Krasnyy drakon: sovremennye voenno-morskie sily Kitaya: Flot Tikhogo okeana, Vypusk 3*. Vladivostok, 2007.
23. Barabanov, M. "DCNS: Company Profile." *«Eksport Vooruzheniy (Arms Exports)* 3 (2010): 51–64.
24. Fuel Cell Handbook. Department of Energy. Under Contract No. DE-AM26-99FT40575. U.S., 2000: 352 p.
25. Psoma, Angela, and Gunter Sattler. "Fuel cell systems for submarines: from the first idea to serial production." *Journal of Power Sources* 106 (2002): 381–383.
26. Oberon Class Submarine Occupational Hygiene Project / Final Report February. 2006.
27. Valero, J. "Submarinos S-80 para la Armada Espanola." *Fuerza Naval* 4 (2013): 72–79.
28. Binns Simon D. "Meeting the current challenge of designing high capability SSKs." *The UDT Pacific 2008 conference in Sydney, Australia* 2008: 17 p. Web. 25 July 2015 <<http://www.bmtdsl.co.uk/media/5045482/BMTDSL-Designing-SSKs-Vidar-Confpaper-UDTPacific-Oct08.pdf>>.
29. Romanov, A. D., I. D. Romanov, E. A. Chernyshov, and E. A. Romanova. "Development single fuel concept in NATO countries." *International journal of applied and fundamental research* 9 (2014): 34-37.
30. Analiticheskij obzor po malym modulnym reaktoram // Atomnyj jekspert. Web. 03 September 2015 <http://atomicexpert.com/sites/default/files/ae%20%234_obzor_0.pdf>.
31. Ivanov, I. V., and V. A. Polezhaev. "Ocean-going missile submarine, project 651Э, with auxiliary nuclear powerplant (BAY-6)." *Sudostroenie* 3 (2008): 27–30.
32. Romanov, A. D., E. A. Chernyshov, and E. A. Romanova. "Comparative review and assessment of efficiency of air independent power installations of various designs." *Modern problems of science and education* 6 (2013): 67-74.
33. Romanova, E. A., A. D. Romanov, and E. A. Chernyshov. "Assessment of relevance of development of airindependent power installations and export potential of not nuclear submarines." *Armament and economics* 1(30) (2015): 99–105.

34. Luo N., G. H. Miley, K. J. Kim, R. Burton, and X. Huang. "NaBH₄/H₂O₂ fuel cells for air independent power systems." *Journal of Power Sources* 185.2 (2008): 685–690.
35. Mendez Alejandro, Teresa J. Leo, and Miguel A. Herreros. "Fuel cell power systems for autonomous underwater vehicles: State of the art." *Conference Proceedings Paper - Energies «Whither Energy Conversion? Present Trends, Current Problems and Realistic Future Solutions»*. 2014: 19 p. Web. 25 July 2015 < <http://sciforum.net/conference/ece-1/paper/2345>>.
36. Shpak, A. I., and Ya. N. Chuksin. "Analiz sovremennogo sostoyaniya i putey razvitiya zarubezhnykh neatomnykh podvodnykh lodok." *Morskoy vestnik Spetsialnyy vypusk* 1(2) (2004): 26–31.
37. Mozgovoy, A. "Podvodnye lodki v god vodyanogo drakona." *Natsionalnaya oborona* 1 (2012): 16–42.
38. Zamukov, V. V., S. A. Petrov, and D. V. Sidorenkov. "State and prospects of development of air-independent power plants of submarines." *Sudostroenie* 5 (2007): 39–42.

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

Чернышов Евгений Александрович —
доктор технических наук, профессор.
Нижегородский государственный технический
университет им. Р. Е. Алексеева
nil_st@nntu.nnov.ru
Романова Елена Анатольевна — аспирант.
Нижегородский государственный технический
университет им. Р. Е. Алексеева
nil_st@nntu.nnov.ru
Романов Алексей Дмитриевич — инженер.
Нижегородский государственный технический
университет им. Р. Е. Алексеева
nil_st@nntu.nnov.ru

INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Chernyshov Evgeny Aleksandrovich —
Doctor of Engineering, professor.
Nizhny Novgorod State Technical University
n. a. R. E. Alekseev
nil_st@nntu.nnov.ru
Romanova Elena Anatolievna — graduate student.
Nizhny Novgorod State Technical University n. a.
R. E. Alekseev
nil_st@nntu.nnov.ru
Romanov Aleksey Dmitrievich — engineer.
Nizhny Novgorod State Technical University
n. a. R. E. Alekseev
nil_st@nntu.nnov.ru

УДК 621.431.074

А. П. Петров,
Г. Е. Живляюк

РАЗВИТИЕ ЭЛЕКТРОННЫХ СИСТЕМ УПРАВЛЕНИЯ СУДОВЫМИ ДВИГАТЕЛЯМИ ВНУТРЕННЕГО СГОРАНИЯ

Введение норм ИМО Tier III в 2016 г. требует снижения выбросов оксидов азота (NO_x) с отработавшими газами двигателей на 75 % по сравнению с нормами ИМО уровня Tier II. Сокращение выбросов может быть достигнуто лишь путем применения новых технологий для судовых дизельных двигателей. Для того чтобы контролировать выбросы, не ухудшая экономичности, эти технологии должны быть направлены на значительное улучшение параметров топливо- и воздухообеспечения двигателя.

Представленная работа сосредоточена на рассмотрении направлений применения и развития электронных технологий управления с целью создания дизелей с гибкими системами управления, обладающими такими достоинствами, которые позволят обеспечить соблюдение указанных международных норм. Эти направления были широко представлены на 25 – 27 Конгрессах Международного совета по двигателям внутреннего сгорания (CIMAC Congress). Показаны достижения в части разработки и применения традиционных (низкого давления) систем топливоподачи с электронным управлением процесса впрыска топлива в цилиндры двигателя и систем топливоподачи высокого давления более сложного исполнения. Рассмотрены предлагаемые технические аспекты реализации управления фазами газораспределения, рециркуляцией отработавших газов и агрегатами турбонаддува.

В каждом конкретном случае целесообразно использовать либо локальные способы управления рассмотренными технологиями, либо их сочетанием, т.е., используя комплексный подход.

Ключевые слова: дизель судовой, управление автоматическое, система управления электронная, блок управления электронный, топливоподача, впрыск топлива, воздухообеспечение, газотурбинный наддув, газораспределение, отработавшие газы, рециркуляция.

РАЗВИТИЕ современного двигателестроения происходит под влиянием достаточно большого числа факторов. Наиболее важными факторами развития являются конкурентная борьба разработчиков и изготовителей за достижение наивысшей энергетической, экономической эффективности конструкций, а также за обеспечение постоянно ужесточающихся экологических международных норм и правил (EPA Tier4, IMO Tier3 и EU3b) [1], [2]. Техническое обеспечение этих факторов невозможно без точного управления на всех эксплуатационных режимах процессами, составляющими рабочий цикл двигателя.

Механическое управление процессами, которое безальтернативно превалировало на протяжении всей истории развития конструкций двигателя, вплоть до конца прошлого века, имеет ограниченные возможности и позволяет достичь требуемых параметров только в узком диапазоне режимов настройки. И, если вначале появлялись локальные электронные устройства, обеспечивающие дистанционное автоматизированное управление, регулирование, сигнализацию, защиту и индикацию параметров двигателя, то сейчас этого оказалось недостаточно. Расширение области настройки в этом случае влечет за собой значительное усложнение конструкции и, как следствие, ее существенное удорожание. В этой связи, с конца 70-х гг. прошлого века наряду с совершенствованием традиционных средств топливоподачи и воздухообеспечения дизеля предпринимаются [3] — [5] попытки создания так называемого «адаптивного» двигателя, в котором управление процессами находилось бы под программным электронным контролем вычислительной техники (процессоров и микропроцессоров) [6].

Достигнутые положительные результаты использования электронного управления поршневым двигателем, а также быстрое совершенствование микропроцессорной техники, элементной базы и программного обеспечения создали предпосылки к внедрению электронноуправляемых систем в массовое производство. Таким образом, современное двигателестроение практически невозможно представить без микропроцессорных систем управления процессами, происходящими в двигателе внутреннего сгорания [7] — [11].

В первую очередь это относится к управлению процессами топливоподачи (и, как следствие, смесеобразования и сгорания), так как его использование дает наибольший вклад в эффективность электронного управления двигателем в целом. Поэтому во многих случаях применение только топливной системы с электронным управлением (ТСЭУ) уже оправдывает создание электронных систем управления (ЭСУ) двигателем. Основное назначение ТСЭУ — управление мощностными режимами двигателя и обеспечение возможности оптимизации его рабочего процесса. Наиболее полное использование адаптивного управления возможно при индивидуальном управлении подачей жидкого или газообразного топлива в каждом рабочем цикле каждого цилиндра двигателя.

ТСЭУ двигателей различаются, прежде всего, уровнем давления топлива. ТСЭУ «низкого» давления (0,2 – 1,0 МПа) — для подачи легкого жидкого топлива или газов во впускные каналы цилиндров, «среднего» давления (20 – 40 (60) МПа) и наиболее сложные и разнообразные — ТСЭУ «высокого» давления (до 200 МПа) для впрыска жидкого топлива непосредственно в цилиндры, используемые в двигателях с самовоспламенением топлива — дизелях. В любом варианте ТСЭУ представляет собой совокупность электрогидравлических устройств, преобразующих электрические управляющие сигналы, формируемые микроконтроллером (электронным блоком управления — ЭБУ), в гидравлические импульсы давления впрыска топлива. При этом управляемыми элементами, в которых устанавливаются электромеханические преобразователи или электрические клапаны, могут быть насосы высокого давления, магистрали высокого, среднего и низкого давления, форсунки и топливоподкачивающие насосы.

Имеется достаточно большое число вариантов ТСЭУ, отличающихся применяемыми источниками питания форсунок топливом и способами управления параметрами впрыска. Применительно к ТСЭУ высокого давления можно выделить следующие основные их классы с присущими им главными отличительными признаками.

1. Импульсное питание форсунок от топливного насоса высокого давления (ТНВД) с механическим приводом плунжеров с непрерывным усредненным управлением впрыском в ТНВД — ТСЭУ с непрерывно управляемыми ТНВД, или сокращенно — *непрерывно управляемые ТСЭУ*.

2. Импульсное питание форсунок от ТНВД с механическим приводом плунжеров, с импульсным индивидуальным управлением продолжительностью и опережением впрыска в магистралях высокого давления или форсунках — *механоприводные ТСЭУ*.

3. Импульсное питание форсунок от ТНВД с пневматическим приводом плунжеров и импульсным индивидуальным управлением продолжительностью и опережением впрыска в магистралях высокого давления или форсунках — *пнеumoприводные ТСЭУ*.

4. Непрерывное питание форсунок от аккумуляторов топлива среднего давления и импульсной мультипликацией в ТНВД, с гидравлическим приводом плунжеров, импульсным индивидуальным управлением продолжительностью и опережением впрыска в ТНВД или/и форсунках при непрерывном управлении давлением в магистралях среднего давления — *гидроприводные ТСЭУ*.

5. Непрерывное питание форсунок от аккумуляторов топлива высокого давления и импульсным индивидуальным управлением продолжительностью, и опережением впрыска в форсунках при непрерывном управлении давлением в магистралях высокого давления — *аккумуляторные ТСЭУ*.

Во всех вариантах ТСЭУ наиболее важными являются те функциональные возможности, которые трудно осуществимы или вообще неосуществимы в неэлектронных топливных системах. В их числе:

- раздельная управляемость величиной подачи, давлением, опережением, числом фаз, формой характеристики впрыска, числом работающих цилиндров (циклов), равномерностью нагрузки цилиндров, ограничением подачи;

- независимость давления впрыска от длительности и опережения впрыска, а также независимость опережения впрыска от длительности и давления впрыска;

- возможность сохранения работоспособности двигателя при отказах отдельных элементов ТСЭУ.

Сложность адаптации ТСЭУ на двигателе определяется объемом и характером изменений, вводимых в другие агрегаты двигателя, необходимых для размещения и работы ТСЭУ.

Несмотря на то, что каждый из вариантов систем обладает рядом достоинств, наибольшее распространение с конца прошлого века получили электронно-управляемые аккумуляторные системы впрыска – системы Common Rail (CRS). Системы CRS отличаются относительной простотой устройства и адаптации к конструкции двигателя. В этой связи в настоящее время подавляющее большинство малоразмерных высокооборотных дизельных двигателей автотранспортного назначения укомплектованы топливными системами этого типа, они, в числе прочих, способны обеспечивать требуемые параметры экологичности работы двигателя.

Аналогично экологическим требованиям к двигателям автотранспортного назначения, продолжают ужесточаться требования к выбросам вредных веществ и для мощных стационарных и судовых дизельных двигателей (табл. 1) [12]. Очевидно, что эти требования должны удовлетворяться при условии сохранения:

- надежности и ресурса;
- расхода топлива;
- допустимого уровня начальных затрат и эксплуатационных расходов.

Их данных табл. 1 следует, что достижение требований Tier 3 и выше возможно только в случае использования систем CRS.

Таблица 1

Контрольные показатели системы для крупных дизелей

Категория двигателей	Требования к выбросам	ПДК г/кВтч	Год	Система впрыска топлива
Высокооборотные (> 1500 об/мин)	Tier 2 (> 560 кВт)	$NO_x < 6,40$ $PM < 0,20$	2004	блочные/индив. ТНВД > 180 МПа Common Rail < 180 МПа + множественный впрыск
	Tier3 (< 560 кВт)	$NO_x < 4,00$ $PM < 0,20$	2008	блочные/индив. ТНВД > 180 МПа Common Rail < 160 МПа + множественный впрыск
	Tier 4	$NO_x < 0,40$ $PM < 0,02$	2008–2015	Common Rail < 180 МПа – множественный впрыск; – профилирование кривой впрыска
Среднеоборотные (< 1200 об/мин)	Tier 2/ ж/д США	$NO_x < 7,40$ $PM < 0,27$	2005	блочные/ индив. ТНВД > 180 МПа Common Rail < 160 МПа + множественный впрыск
	Tier 3/ ж/д США судовые США	$NO_x < 0,74$ $PM < 0,027$	2008–2015	Common Rail < 180 МПа – множественный впрыск; – профилирование кривой впрыска

Поиск оптимальных решений эффективной конструкции системы CRS для среднеоборотных дизельных двигателей привели к созданию модульных систем MCRS [13]. Модульная конструкция использует унифицированные элементы для обеспечения значительного модульного наращивания системы, при этом выбор конфигураций позволяет интегрировать решения в существующие модели двигателей.

В табл. 2 приводятся результаты сравнения «обычных» ТСЭУ и CRS по основным параметрам. Под «обычными» здесь понимаются системы, где впрыск производится под действием кулачка, топливоподача регулируется электромагнитным клапаном, а давление топлива зависит от частоты вращения и нагрузки двигателя. В системе CRS давление топлива всегда постоянно. Это — система высокого давления без гидравлического усиления.

Таблица 2

Параметр/система	«Обычные» ТСЭУ	CRS
Максимальное давление впрыска	< 25 МПа	< 200 МПа
Пики давления	> + 20 МПа	< + 20 МПа
Множественный впрыск	– Возможности ограничены (из-за влияния соотношения внутреннего диаметра и длины трубок)	– Суммарное запаздывание > 0,4 мс (инерция клапана и сопла)
Возможности замены обычной системы	– Возможны проблемы с совместимостью коллектора (или коллекторов) и с испытаниями системы для различных конфигураций двигателей (L6 – V18)	– Простая замена – Испытываются только компоненты системы (конфигурация двигателя влияния не оказывает)
Безопасность	– Экранированные трубки и коллектор (или коллекторы)	– Экранированные трубки (диаметр трубок меньше, чем в предыдущем случае)
Стоимость	– Базовая	– Больше примерно на 30 %

Сравнение «обычных» ТСЭУ и модульной CRS

Возможности системы CRS типа «коллектор — трубка — форсунка» ограничены. Пульсации давления в трубках и форсунках, а также более высокая стоимость (особенно в двигателях более мощных, нежели различные модификации автомобильных дизелей) — таковы причины, заставившие конструкторов искать новые решения. При этом была поставлена задача создания более гибкой системы, лишенной упомянутых недостатков, а именно — модульной системы MCRS.

Для подавления пульсаций давления в ТНВД встроена демпфирующая емкость. Объем коллектора разделен на отдельные объемы, встроенные в форсунки. Тем самым уменьшается расстояние между аккумулятором топлива и соплами, что способствует значительному снижению пульсаций. ТНВД и форсунки соединены трубками высокого давления с внутренним диаметром 3 и 4,5 мм. Входные дроссели форсунок препятствуют распространению остающихся пульсаций давления по топливной системе. Объем демпферной полости каждой форсунки в 50 — 70 раз превышает объем максимальной цикловой подачи.

Снижение уровня пульсаций давления в трубках между ТНВД и форсунками позволило встроить редукционный клапан и датчик давления в аккумулятор высокого давления. Для высокооборотных двигателей оптимальной является схема с блочным насосом высокого давления на две, три, четыре или пять секций, приводной вал которого вращается со скоростью 1000 или 3000 об/мин. В среднеоборотных двигателях используются индивидуальные внешние насосы высокого давления. Они имеют собственные аккумуляторы со встроенными редукционными клапанами и датчиками давления. Размеры форсунок позволяют при этом организовать боковой подвод топлива.

Конструкция со встроенными управляющими клапанами, предназначенными для будущих двигателей грузовых автомобилей, позволяет приступить к созданию форсунок со встроенными аккумуляторами топлива. Такой управляющий клапан отличается оптимальной компоновкой, он имеет высокое быстродействие и гидравлически уравновешен. Клапан устанавливается в непосредственной близости от сопла, что позволяет свести к минимуму влияние пульсаций давления и массы на характеристики переключения сопла.

С обратной стороны седла иглы форсунки находится камера с регулируемым давлением, впускной и выпускной жиклеры которой встроены в плиту между электромагнитным клапаном и соплом. Электромагнитный клапан управляет открытием и закрытием иглы форсунки, и таким образом контролирует впрыск. Электромагнитный клапан, действующий по этому принципу, разработан применительно к трем типоразмерам форсунок, в сумме перекрывающих диапазон цикловых подач от 500 до 3000 мм³.

Моделирование пульсаций в гидросистеме для среднеоборотного двигателя показало преимущества модульной системы MCRS по сравнению с «обычной». Сравнение пульсаций, измеренных в «обычной» и модульной системах MCRS, показывает несомненное преимущество последней в части не только пульсаций и скорости впрыска, но и других показателей (см. табл. 2).

Свойственное модульной системе уменьшенное расстояние между встроенным аккумулятором и соплом влияет также на скорость впрыска в первой фазе. Путем соответствующего конфигурирования впускного и выпускного жиклеров можно повлиять на скорость впрыска таким образом, чтобы снизить скорость нарастания давления в цилиндре. В модульной системе можно применить также пилотный впрыск для дальнейшего снижения градиента давления в цилиндре.

Величина снижения давления топлива к концу впрыска в модульной системе зависит только от объема форсунки и сечения впускного жиклера. В обычной системе CRS на величину цикловой подачи сильное влияние оказывают также внутренний диаметр и длина топливной трубки.

Положительный опыт применения модульной системы MCRS на высокооборотных и среднеоборотных двигателях позволил внедрить ее в серийное производство в 2005 г. Высокие ди-

наимические характеристики системы обеспечивают значительный потенциал для улучшения параметров двигателей, повышения их топливной экономичности и дальнейшего снижения вредных выбросов. Некоторое увеличение (примерно на 30 %) объема высокого давления не приводит к снижению динамических характеристик системы, которая сохраняет при этом устойчивость на всех режимах.

На рис. 1 показана принципиальная схема модульной системы MCRS-22. Основные компоненты системы: питательный насос (ПН), насос высокого давления (НВД), впускной дозирующий клапан (ВДК), датчик давления (ДД), перепускной клапан (ПК), форсунку и электронный блок управления (ЭБУ).

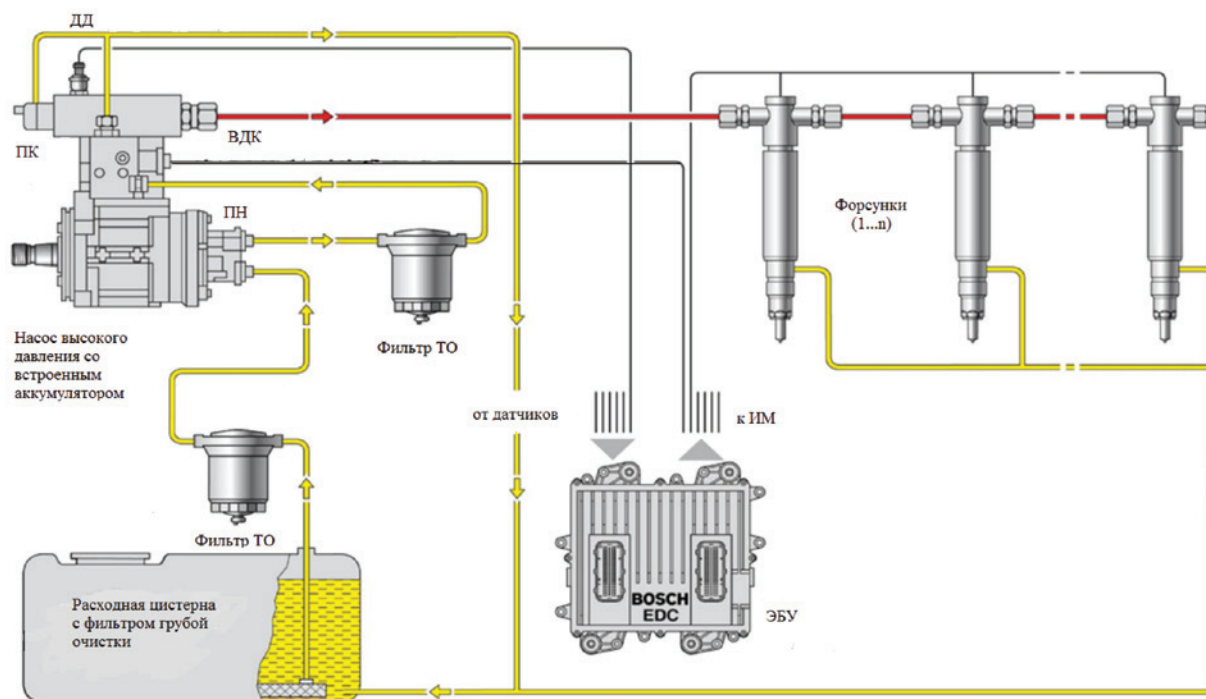


Рис. 1. Модульная система MCRS-22

ПН подает топливо из бака через предварительный фильтр и фильтр тонкой очистки в НВД. ВДК регулирует количество топлива на входе НВД и, следовательно, давление топлива в системе высокого давления. Поршневой насос высокого давления создает высокое давление и подает топливо в аккумулятор насоса. Аккумулятор насоса как емкость в системе демпфирует колебания давления из-за насосных ходов, оснащен ДД и ПК. Топливопровод высокого давления соединяет НВД с форсунками и питает их. Каждая форсунка имеет входное отверстие, чтобы предотвратить взаимодействия между форсунками и топливным аккумулятором, чтобы обеспечить высокое среднее давление впрыска для лучшего распыления топлива. MCRS не имеет общего топливного аккумулятора, поскольку ими оснащены и насос, и форсунки. Это позволяет оптимизировать конструктивное сочетание элементов топливной системы высокого давления применительно к двигателям от рядных 6-цилиндровых до V-образных, 20-цилиндровых двигателей. Если обычные CRS используются в производстве высокооборотных двигателей с давлением топлива 1600 бар и среднеоборотных двигателей с давлением 1800 бар с 2005 г., то производство MCRS-16 (1600 бар) освоено в 2011 г.

Для соблюдения EPA Tier IV и EU3b EC была разработана MCRS-22 (2200 бар), поставленная на производство в 2013 г. для среднеоборотных двигателей, работающих на HFO. Эти двигатели должны соответствовать нормам IMO Tier III в зонах контроля выброса газа в атмосферу. Ее отличие от рассмотренной состоит в иной системе организации высокого давления топлива, обеспечиваемой не одним насосом, а несколькими, соответствующими количеству цилиндров топливных насосов.

Заслуживают разработки и исследования фирм *Mitsubishi Heavy Industries (MHI)*, *MAN Diesel & Turbo SE* и др. [14] — [16]. Так, по данным *MHI*, испытания двигателя типа 6V MARK-30B с опытной системой CRS выявили возможность снижения на 15 % NOx при том же расходе топлива на режиме номинальной мощности, а также снижение дымности на малых нагрузках до 60 % по сравнению с двигателем, оснащенный обычной механической системой топливоподачи. Поэтому система CRS оценивается фирмой как важное направление развития систем топливоподачи в ближайшем будущем. Наряду с этим фирмой в 2005 г. разработана электронная система управления цикловой подачей топлива UEC Eco-Engine, которая обеспечивает контролируемый впрыск топлива и помогает улучшить баланс между тепловой эффективностью и выбросами NOx. Тем самым было обеспечено соблюдение норм IMO Tier II по выбросам NOx. Дальнейшему ужесточению требований IMO Tier III фирма ответила контрмерами в виде каталитической очистки отработавших газов, применения цикла Миллера и рециркуляции отработавших газов.

Наряду с ТСЭУ, не менее важным аспектом рассматриваемой проблемы является разработка и доводка конструкции электронных систем управления фазами газораспределения. Управление фазами газораспределения позволяет обеспечить некоторые преимущества в организации рабочего процесса судовых двигателей: повышение экономичности без увеличения тепловой и механической напряженности, улучшение экологических показателей, улучшение характеристики крутящего момента и существенное расширение диапазона его значений.

Для достижения этих целей были разработаны многие технологии, но сложно выполнить все требования по ограничению выбросов без ухудшения топливной экономичности двигателя. Следовательно, объединение нескольких технологий может быть полезно в целях повышения эффективности двигателя в пределах вводимых ограничений, за счет оптимизации параметров рабочего процесса. Применение цикла Миллера [17] является эффективным способом уменьшения выбросов, особенно оксидов азота (NOx); это обусловлено тем, что температура горения становится ниже, так как эффективная степень сжатия уменьшается. Поскольку впускной клапан открывается на короткое время, повышение давления наддувочного воздуха необходимо для того, чтобы подать достаточное количество воздуха в камеру сгорания. Интересно, что воспламенение от сжатия по циклу Миллера используется в двигателях с наддувом и изменяемой степенью сжатия [18] и в сочетании с рециркуляцией отработавших газов (EGR — Exhaust Gas Recirculation) [19]. Кроме того, установлено [20] снижение на 20 % содержания NOx. Разделение впрыска топлива на два или более подвпрысков может помочь в получении более равномерного и контролируемого сгорания. В частности, впрыск в такте сжатия может увеличить задержки воспламенения и, следовательно, время смешения воздуха и топлива. Исследована возможность снижения выбросов NOx тяжело нагруженными двигателями [21], и обнаружено, что, используя большой показатель перепуска EGR, возможно снизить выбросы NOx почти на 100 %, а КПД повышается на 15 % по сравнению с базовым оснащением. Исследовался также ранний впрыск пилотного топлива [22] наряду с EGR в двигателе грузового автомобиля, благодаря чему удалось уменьшить выбросы NOx на 35 % с некоторым увеличением расхода топлива. Значительное внимание реализации методики Миллера уделяется фирмой *MAN-B&W Turbo* [23] — [25].

Один из конструктивных вариантов изменения фаз в двигателях с традиционным механическим управлением — пропорциональный исполнительный механизм, изменяющий угловое положение распределительного вала. Однако этот вариант осуществим в конструкции двигателей, впускные и выпускные клапаны которых приводятся разными распределительными валами. Тогда управление может осуществляться как отдельно по каждому валу, так и одновременно. Системы VVT (Variable Valve Timing) (рис. 2) получили достаточно широкое распространение.

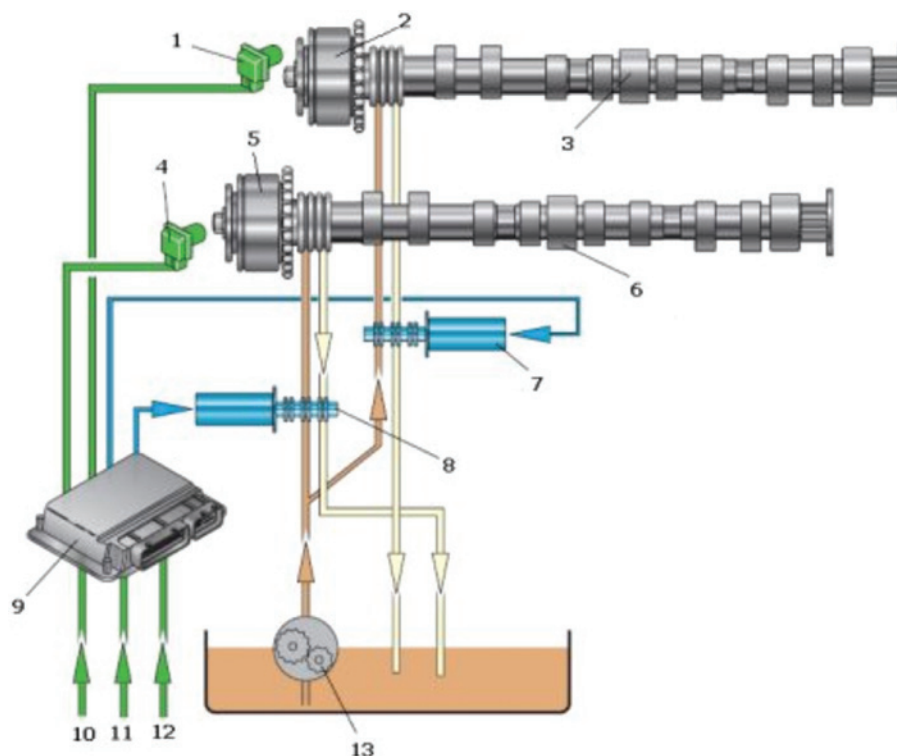


Рис. 2. Конструкция системы VVT:

- 1 — датчик Холла впускного распределительного вала;
2 — гидроуправляемая муфта впускного вала (фазовращатель); 3 — впускной распределительный вал;
4 — датчик Холла выпускного распределительного вала;
5 — гидроуправляемая муфта выпускного вала (фазовращатель); 6 — выпускной распределительный вал;
7 — электрогидравлический распределитель впускного вала (электромагнитный клапан);
8 — электрогидравлический распределитель выпускного вала (электромагнитный клапан);
9 — блок управления двигателем; 10 — сигнал от датчика температуры охлаждающей жидкости;
11 — сигнал расходомера воздуха;
12 — сигнал датчика частоты вращения коленчатого вала двигателя; 13 — масляный насос

Система позволяет плавно изменять фазы газораспределения в соответствии с условиями работы двигателя. Это достигается путем поворота распределительного вала впускных клапанов относительно вала выпускных в диапазоне $40 - 60^\circ$ (по углу поворота коленвала). В результате изменяется момент начала открытия впускных клапанов и величина времени «перекрытия» (т. е. времени, когда выпускной клапан еще не закрыт, а впускной — уже открыт).

Возможно также использование пространственных кулачков сложного профиля, позволяющих изменять не только фазы газораспределения, но и высоту подъема клапанов. Электронное управление газораспределением за счет изменения углового положения распределительного вала или смены профиля работающего участка кулачков может быть осуществлено равномерно для всех цилиндров. Наиболее гибкое управление газораспределением возможно при использовании индивидуального гидравлического или электромагнитного привода клапанов. В этом случае можно отказаться от использования кулачковых валов механизма газораспределения. Гидравлический привод клапанов и электромагнитные клапаны газораспределения (описанные ранее) позволяют обеспечить индивидуальную оптимизацию продолжительности фаз и перемещения каждого клапана в любое время на любом режиме работы двигателя, вплоть до полного отключения отдельных цилиндров (циклов), и быстрый перевод двигателя в тормозной режим.

В качестве иллюстрации к сказанному можно привести результаты модификации двигателя MAN-B&W 6L60MC [16], который был подготовлен для использования электронного управления в рамках концепции Intelligent Engine (IE). Механико-гидравлические компоненты системы

управления были смонтированы на двигателе при его установке на судно. Агрегаты гидроцилиндра установлены на верхней платформе над традиционным распредвалом перед обычными ТНВД. Гидравлический блок питания был установлен на переднем конце двигателя; привод гидравлического насоса объединен с приводом компенсатора крутильных колебаний. Фирма *MAN B&W* начала разработку электронной системы управления для судовых малооборотных дизелей в 1990 г. В 1993 г. на стенде центра в Копенгагене начались испытания опытного дизеля 4T50ME-X без распределительного вала, на котором управление подачей топлива в цилиндры и открытием выпускных клапанов осуществлялось с помощью электронной системы. В ноябре 2000 г. на т/х «Bow Cecil» на двигатель 6L60MC в параллель с механической системой распределения была установлена ЭСУ, испытанная на опытном дизеле. Общий вид дизеля ME в сравнении с двигателем типа MC показан на рис. 3. На двигателе типа ME отсутствуют следующие компоненты:

- цепной привод;
- отсек цепного привода;
- распределительный кулачный вал;
- механизм привода толкателей топливных насосов и выпускных клапанов;
- топливные насосы высокого давления;
- воздухораспределитель;
- механический регулятор частоты вращения с приводом;
- механический привод лубрикаторов цилиндров;
- местный пост управления.

Для выполнения функций перечисленных компонентов предусмотрены следующие устройства:

- агрегат для подачи силового гидравлического масла;
- исполнительные гидравлические агрегаты для каждого цилиндра;
- система управления двигателем, обеспечивающая выполнение следующих функций: электронное управление изменением давления впрыскиваемого в цилиндр топлива; управление открытием и закрытием выпускных клапанов; управление количеством и фазами подачи топлива в цилиндры; управление процессами и процедурами пуска и реверса, включая остановку дизеля с подачей контрвоздуха; регулирование частоты вращения; управление вспомогательными воздушовками; управление процессами смазки цилиндров;
- система определения угла поворота вала;
- лубрикаторы цилиндров с электронным управлением;
- местная панель управления.

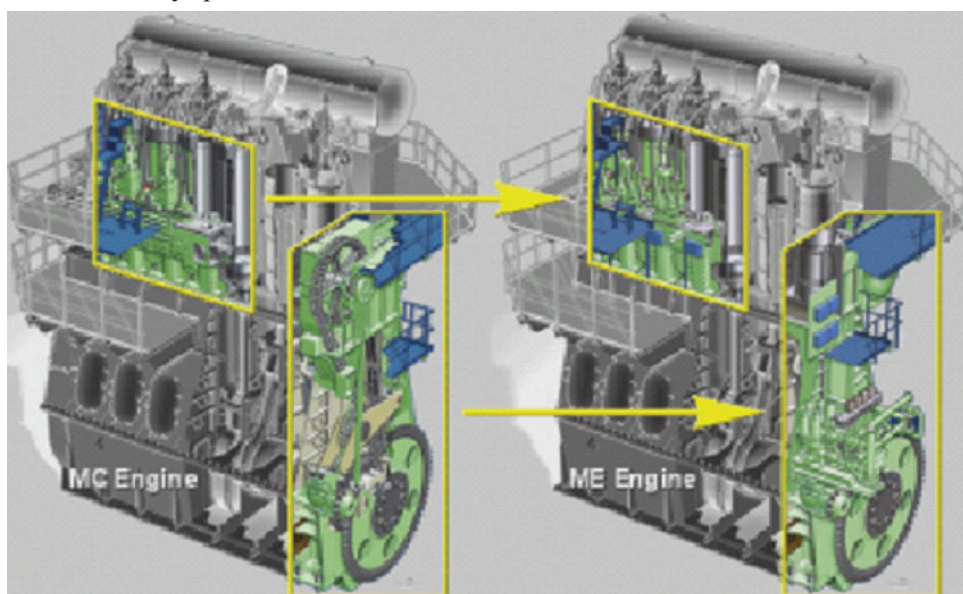


Рис. 3. Общий вид дизеля типа ME в сравнении с двигателем типа MC

На рис. 4 показана схема системы впрыска топлива в цилиндр. Система существенно отличается от систем CRS.

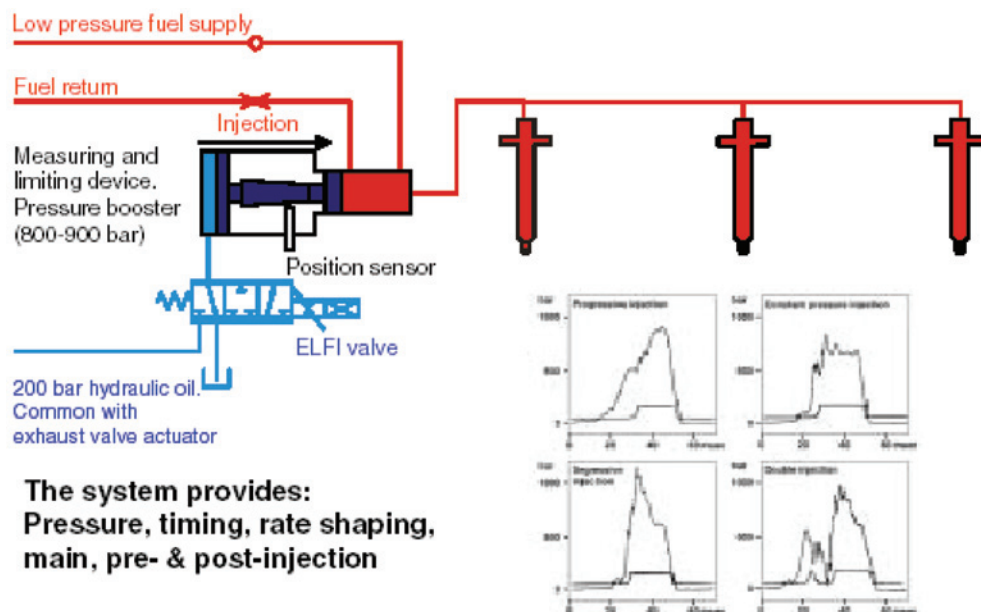


Рис. 4. Схема системы впрыска топлива в цилиндр двигателей типа ME:

Low pressure fuel supply — подача топлива низкого давления;

Fuel return — возврат топлива; Measuring and limiting device.

Pressure booster (800 – 900 bar) — измерительное и лимитирующее устройство.

Гидроусилитель (800 – 900 бар); Position sensor — датчик позиции; ELFI valve — клапан ELFI;

200 bar hydraulic oil. Common with exhaust valve actuator — гидравлическое масло давлением 200 бар, как и для толкателя выпускного клапана

Применение электронного управления, благодаря его гибкости, обеспечивает эксплуатационнику ряд преимуществ по сравнению с традиционным механическим управлением. Основные:

- а) снижение расхода топлива;
- б) улучшение маневренности двигателя;
- в) возможность снижения эмиссии окислов азота.

В электронной системе управления предусмотрена возможность выбора двух видов режимов работы двигателя: режим оптимального расхода топлива и режим минимальной эмиссии NOx. Снижение выбросов NOx достигается за счет осуществления двухфазного впрыска топлива, снижения максимального давления и температуры рабочего цикла. Естественно, это приводит к увеличению удельного расхода топлива, но режим низкой эмиссии NOx используется только в ограниченных акваториях плавания.

Для сравнения были рассмотрены материалы испытаний для получения сертификата о типовом одобрении двигателя MAN B&W Turbo 7L70MC-C с традиционным механическим приводом органов распределения и двигателя MAN B&W Turbo 6S70ME-C с электронным управлением. Сопоставление результатов этих испытаний показывает, что все количественные показатели функционирования обоих двигателей практически идентичны в пределах погрешностей измерений. Единственное заметное отличие, которое обращает на себя внимание, это существенное уменьшение минимальной частоты вращения двигателя новой модификации (12 – 17 % от $n_{ном}$) по сравнению с традиционным (25 % от $n_{ном}$). Фирма обращает внимание [26] на то, что около 85 % от всех новых заказов составляют двухтактные дизельные двигатели с электронным управлением ME типа / ME-C / ME-B. Эта тенденция охватывает все размеры двигателя, однако наиболее существенна для двигателей большого диаметра (80, 90, 98), где почти 100 % всех заказов составляют двигатели ME типа.

Рассмотренные конструкции поршневых двигателей с электронным управлением далеко не исчерпывают возможности использования ЭСУ. Известно, что система газотурбинного наддува решающим образом влияет на характеристики двигателей, в особенности — высокофорсированных. Улучшение наполнения цилиндров при турбонаддуве ограничено инерционностью и низкой эффективностью турбокомпрессоров на низких частотах вращения двигателей. Повышение эффективности турбокомпрессора на низких частотах вращения за счет изменения конструкции и улучшения его параметров неизбежно приводит к излишнему давлению наддува при полной мощности, вплоть до возникновения помпажа. Во избежание этих нежелательных явлений в обход турбины формируется канал — пневмоуправляемый байпас. Очевидно, что на режимах больших нагрузок двигателя, энергия отработавших газов, перепущенных через байпас турбины, полностью теряется. Поэтому для преодоления недостатков неуправляемых систем наддува в последнее время все шире стали применяться системы с электронным управлением. Наиболее эффективным способом управления турбиной представляется поворот рабочих лопаток, однако управление турбокомпрессором поворотом лопаток турбины на частотах ее вращения порядка 70000 об/мин никому еще не удалось довести до широкого применения. Поэтому, в основном, на практике находят применение:

- изменение геометрии направляющего соплового аппарата турбины (или проходного сечения на входе в турбину), например, за счет поворота направляющих лопаток или перемещения неподвижного кольца вдоль направляющих лопаток;
- передача избыточной мощности турбины при больших нагрузках двигателя на коленчатый вал (так называемые комбинированные двигатели);
- наличие двух турбин, одна из которых приводит компрессор, а другая — силовая — в необходимых случаях может работать на коленчатый вал.

Наиболее прогрессивным является применение в высокофорсированных двигателях системы управления турбокомпрессором [27], [28] за счет использования непосредственно в турбокомпрессоре встроенной электрической машины. В простейшем варианте (рис. 5) эта система использует встроенную в турбокомпрессор электрическую машину, чаще всего переменного тока в виде электродвигателя, питаемого для управления частотой вращения от инвертора, создающего переменный электрический ток с регулируемой частотой и напряжением. Инвертор питается от генератора, связанного непосредственно с коленчатым валом двигателя и/или от аккумуляторной батареи.

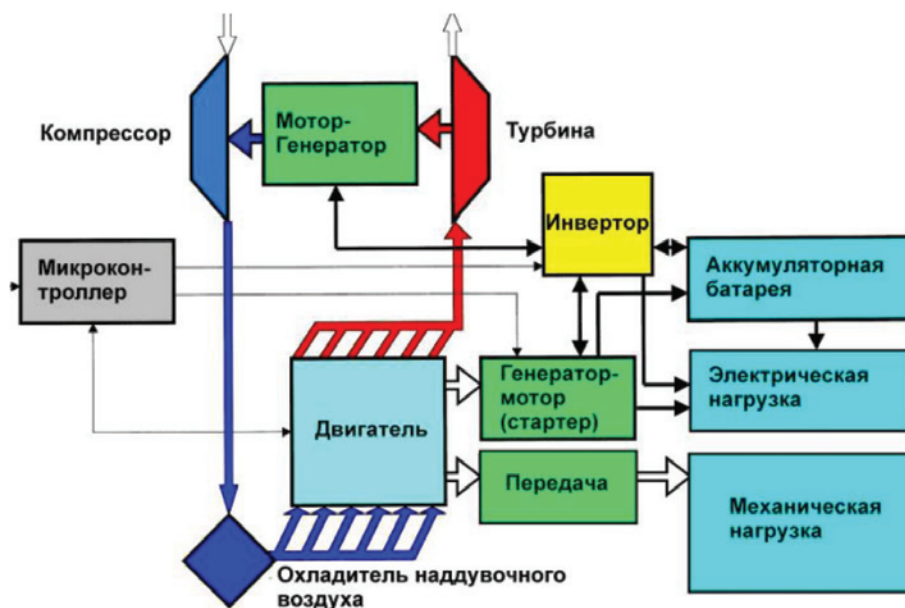


Рис. 5. Схема двигателя с электронно-управляемым турбокомпрессором

В процессах пуска, разгона, на холостых ходах и малых нагрузках электродвигатель, создавая дополнительный крутящий момент на валу турбокомпрессора, разгоняет его до достижения оптимального по расходу топлива давлением наддува. На режимах максимальной мощности дополнительный крутящий момент от электродвигателя не требуется, и он может быть отключен от электрической сети (вместе с инвертором).

Вариант применения турбокомпрессора с электроприводом предусматривает выбор его параметров из условий достижения оптимального давления наддува при полной нагрузке двигателя, т. е. при неполном использовании энергии отработавших газов. Более рационален вариант, в котором на всех режимах работы двигателя эта энергия используется максимально. Для этого электромотор турбокомпрессора должен быть обратимым и при больших нагрузках двигателя, когда мощность турбины больше необходимой для создания оптимального давления наддува, он переводится в режим генератора. Этот генератор через обращенный инвертор передает электрическую энергию обращенному в мотор генератору двигателя, имеющему механическую связь валов. Микроконтроллер, регулируя мощность, отбираемую обращенным генератором турбокомпрессора и передаваемую в сеть энергетической установки, аккумуляторную батарею и сверх этого через обращенный в мотор генератор двигателя — на вал двигателя, снижает частоту вращения турбокомпрессора до уровня, обеспечивающего оптимальное давление наддува.

Рассматривая программное управление процессами, происходящими в системе газо-воздушных трактов поршневого двигателя внутреннего сгорания, нельзя не упомянуть о волновой и резонансной настройке коллекторов с целью обеспечения максимальной плотности свежего заряда цилиндра (увеличения коэффициента наполнения) и улучшения очистки цилиндра (снижения количества остаточных газов). При волновой настройке для повышения наполнения необходимо, чтобы перед закрытием впускного клапана к нему подошла отраженная волна давления, а для улучшения очистки цилиндра от продуктов сгорания — чтобы перед закрытием выпускного клапана к нему подошла волна разрежения. Очевидно, что время прихода волн зависит от длин впускных и выпускных каналов. В зависимости от режима работы двигателя, ЭБУ управляет длиной впускного канала, используя подвижные элементы, увеличивающие длину канала, и (или) подключает поочередно с помощью заслонок каналы различной длины.

Резонансная настройка достигается изменением частоты собственных колебаний рабочего тела во впускной (выпускной) системе. При возникновении резонанса амплитуда волн давления увеличивается и увеличивается эффект от волновой настройки. Собственная частота колебаний газа в системе зависит от массы газа, поэтому для резонансной настройки по определенной программе к системе подключают дополнительные объемы.

Важная роль в формировании экологических характеристик двигателя отводится системе рециркуляции отработавших газов (EGR). Использование системы EGR (рис. 6) позволяет снизить эмиссию оксидов азота и несгоревших углеводородов в составе отработавших газов двигателя на режимах частичных нагрузок и холостого хода за счет строго дозируемого подмеса ОГ к свежему заряду цилиндра [27] — [32].

Ввиду сложности процессов точное управление системой требует использования программных методов. В качестве управляющих устройств применяют клапаны с пропорциональной или релейной характеристиками. Для привода клапанов обычно используют электропневматические устройства или шаговые двигатели. Для более точного управления, располагая клапанами со статической характеристикой и электропневматическим приводом, используют возможность изменения статизма системы с обратной связью по сигналу датчика перемещения клапана.

Обратная связь между результатами и регулированием рабочего процесса электронно-управляемого двигателя обеспечивается благодаря постоянному контролю состава ОГ датчиками (например, λ -зондами), установленными в выпускном тракте двигателя. Анализируя сигналы, поступающие с этих датчиков, ЭБУ способно корректировать топливоподачу с целью достижения наибольшей экологической безопасности и экономичности работы двигателя, а также управлять работой устройств нейтрализации вредных выбросов.

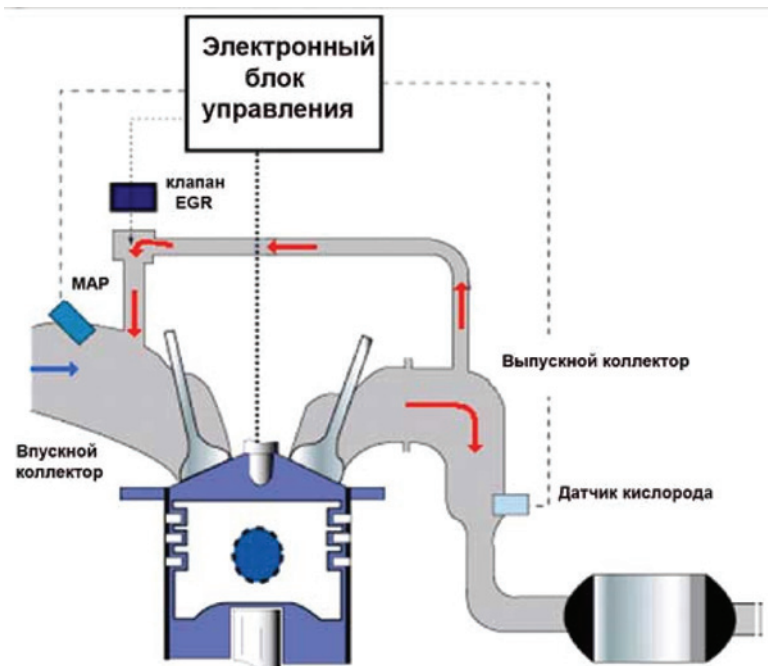


Рис. 6. Схема системы рециркуляции отработавших газов

Выводы

Обзор современной научно-технической литературы продемонстрировал направления совершенствования двигателей и их систем управления, развиваемые основными производителями:

- применение традиционных (низкого давления) систем топливоподачи с электронным управлением процессом впрыска топлива в цилиндры двигателя и систем топливоподачи высокого давления более сложного исполнения (CRS) и их модернизация для двигателей, работающих на различных видах топлива;
- создание и совершенствование систем управления фазами газораспределения, рециркуляцией отработавших газов и агрегатами турбонаддува;
- разработка систем в виде платформ, пригодных для оснащения двигателей различного назначения и мощности;
- формирование унифицированных программного и аппаратного обеспечения;
- создание быстродействующих электромагнитных устройств, сопутствующих исполнительных гидравлических систем управления.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Boletis E. Benefits of propulsion integration on fuel efficiency of marine vessels / E. Boletis. — 2013. [Электронный ресурс]: CIMAC Technical Paper Database. — Режим доступа: https://tecfinder.wti-frankfurt.de/tecfinder/faces/facelets/search/extended_search.jsp?APPL=cimac-web-nm&CODE=9jRaN2YHtRUZtDhfWvcr&DB=cimc&SUBACC_1=&SUBACC_0= (дата обращения: 25.12.2013).
2. Foelzer K. H. Aspects of a Tier IV development for a multi-application high speed diesel engine / K. H. Foelzer, T. Kammerdiener, M. Zallinger [etc]. — 2013. [Электронный ресурс]: CIMAC Technical Paper Database. — Режим доступа: https://tecfinder.wti-frankfurt.de/tecfinder/faces/facelets/search/extended_search.jsp?APPL=cimac-web-nm&CODE=9jRaN2YHtRUZtDhfWvcr&DB=cimc&SUBACC_1=&SUBACC_0= (дата обращения: 25.12.2013).
3. Oestman F. Multi-Model adaptive wastegate control of a large medium-speed engine / F. Oestman, T. Kaas. — 2010. [Электронный ресурс]: CIMAC Technical Paper Database. — Режим доступа: https://tecfinder.wti-frankfurt.de/tecfinder/faces/facelets/search/extended_search.jsp?APPL=cimac-web-nm&CODE=9jRaN2YHtRUZtDhfWvcr&DB=cimc&SUBACC_1=&SUBACC_0= (дата обращения: 25.12.2013).

4. *Oestman F.* A self-tuning engine concept / F. Oestman, T. Kaas. — 2013. [Электронный ресурс]: CIMAC Technical Paper Database. — Режим доступа: https://tecfinder.wti-frankfurt.de/tecfinder/faces/facelets/search/extended_search.jsp?APPL=cimac-web-nm&CODE=9jRaN2YHtRUZtDhfWvcr&DB=cimc&SUBACC_1=&SUBACC_0= (дата обращения: 25.12.2013).

5. *Ammer J.* Modular automation platform for efficient integration of new technologies and flexible adaption of customer requirements / J. Ammer, T. Brendle, R. Hirt. — 2013. [Электронный ресурс]: CIMAC Technical Paper Database. — Режим доступа: https://tecfinder.wti-frankfurt.de/tecfinder/faces/facelets/search/extended_search.jsp?APPL=cimac-web-nm&CODE=9jRaN2YHtRUZtDhfWvcr&DB=cimc&SUBACC_1=&SUBACC_0= (дата обращения: 10.01.2014).

6. *Шишкин В. А.* Применение электронных информационных технологий при испытаниях судовых дизелей / В. А. Шишкин, М. Ю. Иванов, А. П. Петров // Научно-технический сборник Российского морского регистра судоходства. — 2006. — № 29. — С. 43–57.

7. *Starke F.* Caterpillars electronically controlled injection systems for medium speed engines / F. Starke, U. Hopmann // The 25th CIMAC World Congress on Combustion Engines, 21–24 May 2007, Vienna, Austria. — 2007. — Vol. 2. — Pp. 1033–1039.

8. *Levchenko A.* Next generation of engine control systems / A. Levchenko. — 2013. [Электронный ресурс]: CIMAC Technical Paper Database. — Режим доступа: https://tecfinder.wti-frankfurt.de/tecfinder/faces/facelets/search/extended_search.jsp?APPL=cimac-web-nm &CODE = 9jRaN2YHtRUZtDhfWvcr&DB=cimc&SUBACC_1=&SUBACC_0= (дата обращения: 10.01.2014).

9. *Rehbichler G.* The bosch electronic diesel control system for medium and high speed engines / G. Rehbichler, C. Kendlbacher, M. Bernhaupt. — 2013. [Электронный ресурс]: CIMAC Technical Paper Database. — Режим доступа: https://tecfinder.wti-frankfurt.de/tecfinder/faces/facelets/search/extended_search.jsp?APPL=cimac-web-nm &CODE=9jRaN2YHtRUZtDhfWvcr&DB=cimc&SUBACC_1=&SUBACC_0= (дата обращения: 15.07.2014).

10. *Tsujimoto K.* Development of Medium Speed EUP Electronically-Controlled Diesel Engines / K. Tsujimoto, T. Saeki, K. Kitagawa [etc]. — 2013. [Электронный ресурс]: CIMAC Technical Paper Database. — Режим доступа: https://tecfinder.wti-frankfurt.de/tecfinder/faces/facelets/search/extended_search.jsp?APPL=cimac-web-nm&CODE=9jRaN2YHtRUZtDhfWvcr&DB=cimc&SUBACC_1=&SUBACC_0= (дата обращения: 15.07.2014).

11. *Liu G.* Machine Test on fuzzy-PID control strategy of diesel engine basing on Microautobox / G. Liu, E. Song, X. Zhu. — 2013. [Электронный ресурс]: CIMAC Technical Paper Database. — Режим доступа: https://tecfinder.wti-frankfurt.de/tecfinder/faces/facelets/search/extended_search.jsp?APPL=cimac-web-nm&CODE=9jRaN2YHtRUZtDhfWvcr&DB=cimc&SUBACC_1=&SUBACC_0= (дата обращения: 21.09.2014).

12. *Иванов М. Ю.* Современные средне- и высокооборотные дизели с электронными системами управления / М. Ю. Иванов, В. А. Шишкин, А. П. Петров // Двигателестроение. — 2006. — № 4. — С. 40–45.

13. *Kendlbacher C.* The 2200 bar modular common rail injection system for large engine diesel and HFO engines / C. Kendlbacher, T. Lengenfelder, D. Blatterer [etc]. — 2013. [Электронный ресурс]: CIMAC Technical Paper Database. — Режим доступа: https://tecfinder.wti-frankfurt.de/tecfinder/faces/facelets/search/extended_search.jsp?APPL=cimac-web-nm&CODE=9jRaN2YHtRUZtDhfWvcr&DB=cimc&SUBACC_1=&SUBACC_0= (дата обращения: 21.09.2014).

14. *Sugihara M.* Creating a whole range of benefits with the Mitsubishi UEC eco-engine / M. Sugihara, K. Edo, T. Tanida. — 2007. [Электронный ресурс]: CIMAC Technical Paper Database. — Режим доступа: https://tecfinder.wti-frankfurt.de /tecfinder/ faces/facelets/search /extended_search.jsp?APPL = cimac-web-nm&CODE=9jRaN2YHtRUZtDhfWvcr&DB = cimc&SUBACC_1 = &SUBACC_0 = (дата обращения: 21.09.2014).

15. *Imanaka K.* Exhaust Emission Control of Mitsubishi UE Diesel Engine / K. Imanaka, N. Hiraoka, A. Miyanagi [etc]. — 2013. [Электронный ресурс]: CIMAC Technical Paper Database. — Режим доступа: https://tecfinder.wti-frankfurt.de/tecfinder/faces/facelets/search/extended_search.jsp?APPL=cimac-web-nm&CODE=9jRaN2YHtRUZtDhfWvcr&DB=cimc&SUBACC_1=&SUBACC_0= (дата обращения: 21.09.2014).

16. *Шишкин В. А.* Развитие двухтактных малооборотных ДВС с электронным управлением / В. А. Шишкин, А. П. Петров, М. Ю. Иванов // Двигателестроение. — 2006. — № 2. — С. 26–31.

17. *Miller R. H.* The Miller supercharging system for diesel and gas engines operating characteristics / R. H. Miller, H. U. Lieberherr // CIMAC Congress, 1957 Zurich, June 15 – 22. — 1957. — Pp. 787–803.

18. *Zappa G.* A 4-Stroke High Speed Diesel Engine with Two-Stage of Supercharging and Variable Compression Ratio / G. Zappa, T. Franca // 13th International Congress on Combustion Engines. — 1979. — Pp. D19–1.

19. *Edwards S. P.* The Potential of a Combined Miller Cycle and Internal EGR Engine for Future Heavy Duty Truck Applications / S. P. Edwards, G. R. Frankel, F. Wirbeleit [etc]. // SAE Technical Paper, 1998. — № 980180.
20. *Stebler H.* Reduction of NOx Emissions of D.I. Diesel Engines by Application of the MillerSystem: An Experimental and Numerical Investigation / H. Stebler, G. Weisser, H. Hörler [etc]. // SAE Technical Paper, 1996. — № 960844.
21. *Noehre C.* Characterization of Partially Premixed Combustion / C. Noehre, M. Andresson, B. Johansson [etc]. // SAE Technical Paper, 2006. — № 2006-01-3412.
22. *Benajes J.* Advanced Injection Strategies to Attain Partially Premixed Combustion Process in a Heavy Duty Diesel Engine / J. Benajes, S. Molina, R. Novella [etc]. // SAE Technical Paper, 2008. — № 2008-01-0642.
23. *Segercrantz H.* MAN looks forward to next-generation diesel-electric power / H. Segercrantz // The Motor ship. — 2012. [Электронный ресурс]. — Режим доступа: <http://www.motorship.com/news101/engines-and-propulsion/man-looks-forward-to-next-generation-diesel-electric-power> (дата обращения: 25.11.2014).
24. *Sailing towards IMO Tier 3* // The Motor ship. — 2011. [Электронный ресурс]. — Режим доступа: <http://www.motorship.com/news101/engines-and-propulsion/sailing-towards-imo-tier-3> (дата обращения: 25.11.2014).
25. *Imperato M.* Multi-injection and advanced Miller timing in largebore CI engine / M. Imperato, J. Nurmiranta, T. Sarjovaara [etc]. — 2013. [Электронный ресурс]: CIMAC Technical Paper Database. — Режим доступа: https://tecfinder.wti-frankfurt.de/tecfinder/faces/facelets/search/extended_search.jsp?APPL=cimac-web-nm&CODE=9jRaN2YHtRUZtDhfWvcr&DB=cimc&SUBACC_1=&SUBACC_0= (дата обращения: 25.11.2014).
26. *Jakobsen S. B.* Service Experience of MAN B&W Two Stroke Diesel Engines / S. B. Jakobsen, C. E. Egeberg. — 2013. [Электронный ресурс]: CIMAC Technical Paper Database. — Режим доступа: https://tecfinder.wti-frankfurt.de/tecfinder/faces/facelets/search/extended_search.jsp?APPL=cimac-web-nm&CODE=9jRaN2YHtRUZtDhfWvcr&DB=cimc&SUBACC_1=&SUBACC_0= (дата обращения: 25.11.2014).
27. *Ципленкин Г. Е.* Улучшение топливной экономичности двигателей за счет оптимизации систем наддува / Г. Е. Ципленкин, В. И. Иовлев // Двигателестроение. — 2014. — № 3. — С. 16–22.
28. *Ципленкин Г. Е.* Улучшение топливной экономичности двигателей за счет оптимизации систем наддува / Г. Е. Ципленкин, В. И. Иовлев // Двигателестроение. — 2014. — № 4. — С. 19–28.
29. *Kyrtatos P.* Recent developments in the Understanding of the Potential of In-Cylinder NOx Reduction though Extreme Miller Valve Timing / P. Kyrtatos, K. Hoyer, P. Obrecht [etc]. — 2013. [Электронный ресурс]: CIMAC Technical Paper Database. — Режим доступа: https://tecfinder.wti-frankfurt.de/tecfinder/faces/facelets/search/extended_search.jsp?APPL=cimac-web-nm&CODE=9jRaN2YHtRUZtDhfWvcr&DB=cimc&SUBACC_1=&SUBACC_0= (дата обращения: 18.01.2015).
30. *Millo F.* Computational Analysis of Different EGR systems Combined with Miller Cycle Concept for a Medium Speed Marine Diesel Engine / F. Millo, M. G. Bernardi, E. Servetto [etc]. — 2013. [Электронный ресурс]: CIMAC Technical Paper Database. — Режим доступа: https://tecfinder.wti-frankfurt.de/tecfinder/faces/facelets/search/extended_search.jsp?APPL=cimac-web-nm&CODE=9jRaN2YHtRUZtDhfWvcr&DB=cimc&SUBACC_1=&SUBACC_0= (дата обращения: 18.01.2015).
31. *Kaltoft J.* Development of integrated EGR system for two-stroke diesel engines / J. Kaltoft, M. Preem. — 2013. [Электронный ресурс]: CIMAC Technical Paper Database. — Режим доступа: https://tecfinder.wti-frankfurt.de/tecfinder/faces/facelets/search/extended_search.jsp?APPL=cimac-web-nm&CODE=9jRaN2YHtRUZtDhfWvcr&DB=cimc&SUBACC_1=&SUBACC_0= (дата обращения: 15.03.2015).
32. *Higashida M.* Newly developed combined EGR & WEF system to comply with IMO NOx Regulation Tier III for twostroke diesel engine // M. Higashida, T. Nakamura, I. Onishi [etc]. — 2013. [Электронный ресурс]: CIMAC Technical Paper Database. — Режим доступа: https://tecfinder.wti-frankfurt.de/tecfinder/faces/facelets/search/extended_search.jsp?APPL=cimac-web-nm&CODE=9jRaN2YHtRUZtDhfWvcr&DB=cimc&SUBACC_1=&SUBACC_0= (дата обращения: 15.03.2015).

DEVELOPMENT OF ELECTRONIC CONTROL SYSTEMS OF INTERNAL COMBUSTION ENGINES

Introduction of norms of IMO Tier III in 2016 demands decrease in emissions of NOH with the fulfilled gases of engines for 75% in comparison with norms of IMO of the Tier II level. Reduction of emissions can be reached only by application of new technologies for ship diesel engines. To control emissions, without worsening profitability, these technology have to be directed on considerable improvement of parameters fuel - and air-supply of the engine.

The presented work is concentrated on consideration of the directions of application and development of electronic technologies of management for the purpose of creation of diesels with the flexible control systems possessing such advantages, which will allow providing observance of the specified international standards. These directions were widely presented on 25-27 the Congresses of the International council for internal combustion engines (CIMAC Congress). Achievements regarding development and application traditional (low pressure) systems of fuel feeding with electronic control of process of injection of fuel in cylinders of the engine and systems of fuel feeding of a high pressure of more difficult execution are shown. The offered technical aspects of realization of control of variable valve timing, exhaust gas recirculation and turbo-supercharging units are considered.

In each case it is expedient to use or local ways of control of the considered technologies, or their combination, i.e., using an integrated approach.

Key words: marine diesel, automatic control, electronic control system, control unit, fuel supply, fuel injection, air supply, turbocharging, valve timing, exhaust gases, recirculation.

REFERENCES

1. Boletis, Elias. "Benefits of propulsion integration on fuel efficiency of marine vessels." 2013. Web: CIMAC Technical Paper Database. 25 December 2013 <https://tecfinder.wti-frankfurt.de/tecfinder/faces/facelets/search/extended_search.jsp?APPL=cimac-web-nm&CODE=9jRaN2YHtRUZtDhfWvcr&DB=cimc&SUBACC_1=&SUBACC_0=>>.
2. Foelzer, Karl-Heinz, Thomas Kammerdiener, Michael Zallinger, and Andrei Ludu. "Aspects of a Tier IV development for a multi-application high speed diesel engine." 2013. Web: CIMAC Technical Paper Database. 25 December 2013 <https://tecfinder.wti-frankfurt.de/tecfinder/faces/facelets/search/extended_search.jsp?APPL=cimac-web-nm&CODE=9jRaN2YHtRUZtDhfWvcr&DB=cimc&SUBACC_1=&SUBACC_0=>>.
3. Oestman, F., and T. Kaas. "Multi-Model adaptive wastegate control of a large medium-speed engine." 2010. Web: CIMAC Technical Paper Database. 25 December 2013 <https://tecfinder.wti-frankfurt.de/tecfinder/faces/facelets/search/extended_search.jsp?APPL=cimac-web-nm&CODE=9jRaN2YHtRUZtDhfWvcr&DB=cimc&SUBACC_1=&SUBACC_0=>>.
4. Oestman, Fredrik, and Tom Kaas. "A self-tuning engine concept." 2013. Web: CIMAC Technical Paper Database. 25 December 2013 <https://tecfinder.wti-frankfurt.de/tecfinder/faces/facelets/search/extended_search.jsp?APPL=cimac-web-nm&CODE=9jRaN2YHtRUZtDhfWvcr&DB=cimc&SUBACC_1=&SUBACC_0=>>.
5. Ammer, Juergen, Thomas Brendle, and Roland Hirt. "Modular automation platform for efficient integration of new technologies and flexible adaption of customer requirements." 2013. Web: CIMAC Technical Paper Database. 10 January 2014 <https://tecfinder.wti-frankfurt.de/tecfinder/faces/facelets/search/extended_search.jsp?APPL=cimac-web-nm&CODE=9jRaN2YHtRUZtDhfWvcr&DB=cimc&SUBACC_1=&SUBACC_0=>>.
6. Shishkin, V. A., M. Yu Ivanov, and A. P. Petrov. "The use of electronic information technologies in testing marine diesel engines." *Scientific and technical collection of Russian Maritime Register of Shipping* 29 (2006): 43-57.
7. Starke, F., and U. Hopmann. "Caterpillars electronically controlled injection systems for medium speed engines." *The 25th CIMAC World Congress on Combustion Engines, 21-24 May 2007, Vienna, Austria* 2 (2007): 1033-1039.
8. Levchenko, Alexander. "Next generation of engine control systems." 2013. Web: CIMAC Technical Paper Database. 10 January 2014 <https://tecfinder.wti-frankfurt.de/tecfinder/faces/facelets/search/extended_search.jsp?APPL=cimac-web-nm&CODE=9jRaN2YHtRUZtDhfWvcr&DB=cimc&SUBACC_1=&SUBACC_0=>>.
9. Rehbichler, Gerhard, Christoph Kendlbacher, and Martin Bernhaupt. "The bosch electronic diesel control system for medium and high speed engines." 2013. Web: CIMAC Technical Paper Database. 15 July 2014 <https://tecfinder.wti-frankfurt.de/tecfinder/faces/facelets/search/extended_search.jsp?APPL=cimac-web-nm&CODE=9jRaN2YHtRUZtDhfWvcr&DB=cimc&SUBACC_1=&SUBACC_0=>>.
10. Tsujimoto, K., T. Saeki, K. Kitagawa, and Y. Takahata. "Development of Medium Speed EUP Electronically-Controlled Diesel Engines." 2013. Web: CIMAC Technical Paper Database. 15 July 2014 <https://tecfinder.wti-frankfurt.de/tecfinder/faces/facelets/search/extended_search.jsp?APPL=cimac-web-nm&CODE=9jRaN2YHtRUZtDhfWvcr&DB=cimc&SUBACC_1=&SUBACC_0=>>.
11. Liu, Guodong, Enzhe Song, and Xiaohua Zhu. "Machine Test on fuzzy-PID control strategy of diesel engine basing on Microautobox." 2013. Web: CIMAC Technical Paper Database. 21 September 2014 <https://tecfinder.wti-frankfurt.de/tecfinder/faces/facelets/search/extended_search.jsp?APPL=cimac-web-nm&CODE=9jRaN2YHtRUZtDhfWvcr&DB=cimc&SUBACC_1=&SUBACC_0=>>.

12. Ivanov, M. Yu, V. A. Shishkin, and A. P. Petrov. "Modern medium and High-speed diesel engines with electronic control systems." *Dvigatelsestroyeniye* 4 (2006): 40–45.
13. Kendlbacher, Christoph, Thomas Lengenfelder, Dieter Blatterer, Martin Bernhaupt, and Christian Meisl. "The 2200 bar modular common rail injection system for large engine diesel and HFO engines." 2013. Web: CIMAC Technical Paper Database. 21 September 2014 <https://tecfinder.wti-frankfurt.de/tecfinder/faces/facelets/search/extended_search.jsp?APPL=cimac-web-nm&CODE=9jRaN2YHtRUZtDhfWvcr&DB=cimc&SUBACC_1=&SUBACC_0=>>.
14. Sugihara, M., K. Edo, and T. Tanida. "Creating a whole range of benefits with the Mitsubishi UEC eco-engine." 2007. Web: CIMAC Technical Paper Database. 21 September 2014 <https://tecfinder.wti-frankfurt.de/tecfinder/faces/facelets/search/extended_search.jsp?APPL=cimac-web-nm&CODE=9jRaN2YHtRUZtDhfWvcr&DB=cimc&SUBACC_1=&SUBACC_0=>>.
15. Imanaka, K., N. Hiraoka, A. Miyanagi, and M. Sugihara. "Exhaust Emission Control of Mitsubishi UE Diesel Engine." 2013. Web: CIMAC Technical Paper Database. 21 September 2014 <https://tecfinder.wti-frankfurt.de/tecfinder/faces/facelets/search/extended_search.jsp?APPL=cimac-web-nm&CODE=9jRaN2YHtRUZtDhfWvcr&DB=cimc&SUBACC_1=&SUBACC_0=>>.
16. Shishkin, V. A, A. P. Petrov, and M. Yu. Ivanov. "The development of low-speed two-stroke internal combustion engine with electronic control." *Dvigatelsestroyeniye* 2 (2006): 26–31.
17. Miller, R. H., and H. U. Lieberherr. "The Miller supercharging system for diesel and gas engines operating characteristics." *CIMAC Congress, 1957 Zurich, June 15-22 (1957)*: 787–803.
18. Zappa, G., and T. Franca. "A 4-Stroke High Speed Diesel Engine with Two-Stage of Supercharging and Variable Compression Ratio." *13th International Congress on Combustion Engines* (1979): D19-1.
19. Edwards, S. P., G. R. Frankel, F. Wirbeleit, and A. Raab. *The Potential of a Combined Miller Cycle and Internal EGR Engine for Future Heavy Duty Truck Applications*. No. 980180. SAE Technical Paper, 1998.
20. Stebler, H., G. Weisser, H. Hörler, and K. Boulouchos. *Reduction of NOx emissions of DI diesel engines by application of the Miller-system: an experimental and numerical investigation*. No. 960844. SAE Technical Paper, 1996.
21. Noehre, C., M. Andresson, B. Johansson, and A. Hultvist. *Characterization of partially premixed combustion*. No. 2006-01-3412. SAE Technical Paper, 2006.
22. Benajes, J., S. Molina, R. Novella, and S. Arthozoul. *Advanced Injection Strategies to Attain Partially Premixed Combustion Process in a Heavy Duty Diesel Engine*. No. 2008-01-0642. SAE Technical Paper, 2008.
23. Segercrantz, H. "MAN looks forward to next-generation diesel-electric power." *The Motor ship*. 2012. Web. 25 November 2014 <<http://www.motorship.com/news101/engines-and-propulsion/man-looks-forward-to-next-generation-diesel-electric-power>>.
24. "Sailing towards IMO Tier 3." *The Motor ship*. 2011. Web. 25 November 2014 <<http://www.motorship.com/news101/engines-and-propulsion/sailing-towards-imo-tier-3>>.
25. Imperato, Matteo, Jussi Nurmiranta, Teemu Sarjovaara, Martti Larmi, and Christer Wik. "Multi-injection and advanced Miller timing in largebore CI engine." 2013. Web: CIMAC Technical Paper Database. 25 November 2014 <https://tecfinder.wti-frankfurt.de/tecfinder/faces/facelets/search/extended_search.jsp?APPL=cimac-web-nm&CODE=9jRaN2YHtRUZtDhfWvcr&DB=cimc&SUBACC_1=&SUBACC_0=>>.
26. Jacobsen, Stig Baungaard, and Carl-Erik Egeberg. "Service Experience of MAN B&W Two Stroke Diesel Engines." 2007. Web: CIMAC Technical Paper Database. 25 November 2014 <https://tecfinder.wti-frankfurt.de/tecfinder/faces/facelets/search/extended_search.jsp?APPL=cimac-web-nm&CODE=9jRaN2YHtRUZtDhfWvcr&DB=cimc&SUBACC_1=&SUBACC_0=>>.
27. Tsiplenkin, G. E., and V. I. Iovlev. "Improving fuel efficiency by optimizing engine-supercharging systems." *Dvigatelsestroyeniye* 3 (2014): 16–22.
28. Tsiplenkin, G. E., and V. I. Iovlev. "Improving fuel efficiency by optimizing engine-supercharging systems." *Dvigatelsestroyeniye* 4 (2014): 19–28.
29. Kyrtatos, Panagiotis, Klaus Hoyer, Peter Obrecht, and Konstantinos Boulouchos. "Recent developments in the Understanding of the Potential of In-Cylinder NOx Reduction though Extreme Miller Valve Timing." 2013. Web: CIMAC Technical Paper Database. 18 January 2015 <https://tecfinder.wti-frankfurt.de/tecfinder/faces/facelets/search/extended_search.jsp?APPL=cimac-web-nm&CODE=9jRaN2YHtRUZtDhfWvcr&DB=cimc&SUBACC_1=&SUBACC_0=>>.

30. Millo, Federico, Marco Gianoglio Bernardi, Emanuele Servetto, and Diego Delneri. "Computational Analysis of Different EGR systems Combined with Miller Cycle Concept for a Medium Speed Marine Diesel Engine." 2013. Web: CIMAC Technical Paper Database. 18 January 2015 <https://tecfinder.wti-frankfurt.de/tecfinder/faces/facelets/search/extended_search.jsp?APPL=cimac-web-nm&CODE=9jRaN2YHtRUZtDhfWvcr&DB=cimc&SUBACC_1=&SUBACC_0=>.

31. Kaltoft, Johan, and Mikkel Preem. "Development of integrated EGR system for two-stroke diesel engines." 2013. Web: CIMAC Technical Paper Database. 15 March 2015 <https://tecfinder.wti-frankfurt.de/tecfinder/faces/facelets/search/extended_search.jsp?APPL=cimac-web-nm&CODE=9jRaN2YHtRUZtDhfWvcr&DB=cimc&SUBACC_1=&SUBACC_0=>.

32. Higashida, Masanori, Takuroh Nakamura, Ikumi Onishi, Katsuhiro Yoshizawa, Hirotaka Takata, and Takamichi Hosono. "Newly developed combined EGR & WEF system to comply with IMO NOx Regulation Tier III for two-stroke diesel engine." 2013. Web: CIMAC Technical Paper Database. 15 March 2015 <https://tecfinder.wti-frankfurt.de/tecfinder/faces/facelets/search/extended_search.jsp?APPL=cimac-web-nm&CODE=9jRaN2YHtRUZtDhfWvcr&DB=cimc&SUBACC_1=&SUBACC_0=>.

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

Петров Александр Павлович —
кандидат технических наук, доцент.
ФГБОУ ВО «ГУМРФ имени
адмирала С. О. Макарова»
app.polab@inbox.ru
Живлюк Григорий Евгеньевич —
кандидат технических наук, доцент.
ФГБОУ ВО «ГУМРФ имени
адмирала С. О. Макарова»
spb-engine-prof@mail.ru

INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Petrov Aleksandr Pavlovich —
Candidate of Engineering, associate professor.
Admiral Makarov State University of Maritime
and Inland Shipping
app.polab@inbox.ru
Zhivlyuk Gregory Evgenyevich —
Candidate of Engineering, associate professor.
Admiral Makarov State University of Maritime
and Inland Shipping
spb-engine-prof@mail.ru

УДК 62-83:629.1

**А. В. Саушев,
Д. И. Троян**

ИДЕНТИФИКАЦИЯ ЭЛЕКТРОПРИВОДОВ ПОРТОВЫХ ПЕРЕГРУЗОЧНЫХ МАШИН

В статье приводится анализ методов идентификации динамических систем применительно к электроприводам портовых перегрузочных машин. Показано, что электроприводы этих машин являются сложными электромеханическими системами, механическая часть которых содержит элементы с упругими связями и является многомассовой. Проанализированы особенности этих систем, требующие при решении задач моделирования и идентификации учета зазоров в зубчатых передачах; упругостей, возникающих в валах; изменение моментов инерции в зубчатых венцах; изменение жесткости упругих элементов в муфтах. Предложено использование принципа декомпозиции и выделение основных элементов электроприводов, подлежащих идентификации. На основе теории управления предложены методы идентификации элементов электроприводов портовых перегрузочных машин. Показано, что для этой цели возможно использование частотных методов и методов, работающих во временной области. Установлено, что перспективными являются методы активной идентификации на основе теории планирования эксперимента и статистические методы, основанные на разложении импульсных переходных функций в ряд по системе ортонормированных преобразованных функций Лагерра.

Ключевые слова: идентификация, электропривод, портовые перегрузочные машины, метод.

ОДНИМ из перспективных методов оценки технического состояния электроприводов является идентификация по динамическим характеристикам, которая отличается широкими возможностями фильтрации помех и возмущений. Под идентификацией системы понимают определение структуры и параметров ее математической модели, которые обеспечивают наилучшую близость выходных величин модели и объекта при одинаковых входных воздействиях [1]. Задача идентификации динамических систем в общем случае сводится к определению оператора модели системы, преобразующего ее входные воздействия в выходные величины.

В настоящее время значительную часть грузов, проходящих через морские порты, составляют навалочные грузы. Для разгрузки угля применяется такое высокопроизводительное средство как вагоноопрокидыватель [2]. В его состав входят следующие механизмы: поворота ротора вагоноопрокидывателя, системы зажима вагонов, дробильной машины, ленточных питателей. С целью непрерывной доставки навалочного груза на склад и перемещения его со склада используют систему ленточных конвейеров и комбинированный штабелеукладчик стакер-реклаймер. Погрузка угля на судно осуществляется с помощью судопогрузочной машины. Большую часть грузопотока также составляют тарно-штучные грузы. Для размещения на складе контейнеров и погрузки их на автомобильный транспорт используются козловые краны на пневмоходу RTG. В состав этих кранов входят такие механизмы как: механизм передвижения крана, механизм передвижения тележки, главные лебедки и вспомогательные лебедки. Разгрузка контейнеров с судна и погрузка их на судно производится при помощи причальных контейнерных перегружателей STS. В состав перегружателей STS входят следующие механизмы: передвижения крана, вылета стрелы, передвижения тележки, лебедка и механизм выравнивания положения спредера.

Все перечисленные механизмы составляют сложные механические системы, которые в большинстве случаев являются многомассовыми. Рассмотрим более подробно вагоноопрокидыватель, который в настоящее время является наиболее мощным и эффективным средством для автоматической механизированной разгрузки навалочных грузов. На рис. 1 представлен внешний вид роторного стационарного четырехопорного вагоноопрокидывателя типа ВРС-125, предназначенного для разгрузки сыпучих материалов из железнодорожных полувагонов, грузоподъемностью от 63 до 125 т, путем опрокидывания полувагонов во вращающемся роторе.



Рис. 1. Вагоноопрокидыватель роторный стационарный четырехопорный

Электропривод механизма поворота ротора является важнейшим узлом данной машины. На рис. 2 приведена кинематическая схема электропривода, из которой следует, что он представ-

ляет собой сложную электромеханическую систему с большим числом упругих элементов и связей между ними [3]. Анализ показывает, что особенностью электроприводов портовых перегрузочных машин (ПТМ) является необходимость учета при их моделировании и идентификации следующих факторов: зазоров в зубчатых передачах; упругостей, возникающих в валах; изменение моментов инерции в зубчатых венцах; изменение жесткости упругих элементов в упругих муфтах. Следует также иметь в виду, что механическая часть электропривода, как правило, представляет собой многомассовую разветвленную механическую схему со связями, параметры которой требуется идентифицировать [4].

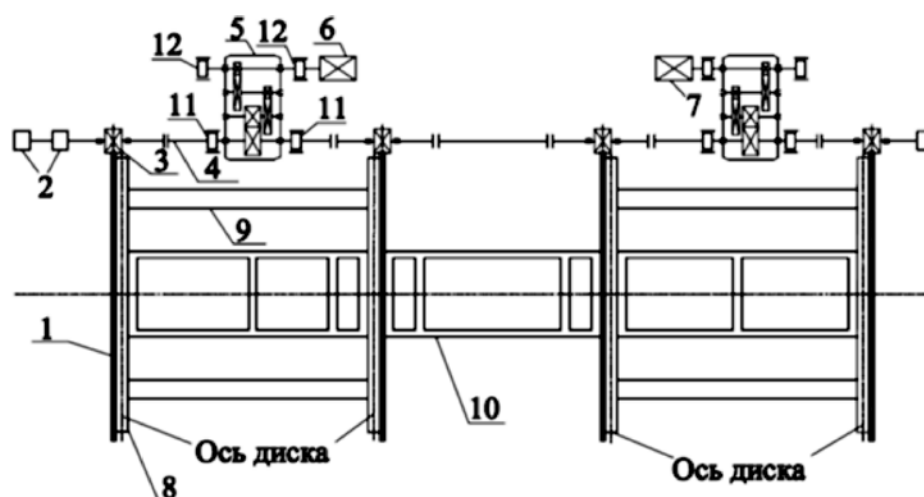


Рис. 2. Кинематическая схема электропривода механизма опрокидывания вагоноопрокидывателя ВРС-125:

- 1 — зубчатый венец; 2 — командоаппарат; 3 — шестерня; 4 — промежуточный вал; 5 — редуктор; 6 — электродвигатель подачи; 7 — электродвигатель выдачи; 8 — кольцевой диск; 9 — продольная трубчатая ферма; 10 — верхняя балка; 11 — кулачковая муфта; 12 — упругая муфта

Целью работы является анализ методов идентификации электромеханических систем применительно к электроприводам ПТМ и разработка стратегии их практического применения. Для решения задач идентификации динамических систем разработано достаточно много методов. Дадим их краткую характеристику применительно к электроприводам ПТМ.

По способу тестирования исследуемого объекта методы идентификации делятся на активные и пассивные. Применение активных методов предполагает подачу на вход объекта специально сформированных воздействий — детерминированных или случайного характера. При использовании пассивных методов идентификации параметры модели находят по результатам статистической обработки наблюдений естественных изменений величин на входе и выходе объекта. Для идентификации электроприводов ПТМ следует, по возможности, применять активные методы [1], [5].

Для идентификации применяют как детерминированные, так и статистические методы обработки данных наблюдений, что определяется характером анализируемых сигналов. Детерминированные методы могут быть использованы только при активной идентификации [1], [6]. По временным затратам методы идентификации подразделяют на оперативные и ретроспективные. При оперативной идентификации обеспечивается отслеживание меняющихся параметров объекта. В процессе оперативной идентификации время переходного процесса в идентификаторе и время переходного процесса системы являются величинами одного порядка. Введение идентификатора понижает чувствительность системы к изменению параметров элементов электроприводов ПТМ. Методы ретроспективной идентификации позволяют многократно обращаться к накопленным экспериментальным данным и подбирать наиболее эффективные алгоритмы их анализа [1]. При синтезе алгоритмов идентификации электроприводов ПТМ принципиально возможны как разомкнутые, так и замкнутые схемы [7], [8].

Результатом решения задачи идентификации электропривода является математическая модель, представленная во временной или частотной области. Построение математической модели электропривода может производиться аналитическим, экспериментальным и экспериментально-аналитическим методами. При этом полученная модель должна быть адекватна объекту по поведению, т. е. по динамическим свойствам, в соответствии с выбранным при идентификации критерием подобия.

При всем разнообразии приемов и алгоритмов, применяемых для выполнения идентификации электроприводов ПТМ, есть некоторая общая специфика, заключающаяся в том, что в большинстве случаев необходимо учитывать априорные данные об электроприводе. При этом задача синтеза алгоритма идентификации электроприводов основывается на представлении о том, что обрабатываемый сигнал (например, экспериментальная переходная функция) состоит из низкочастотной полезной составляющей и высокочастотного шума.

В качестве примера, на рис. 3, *а* приведены спектральные плотности полезного сигнала и шума. Для увеличения отношения «сигнал-шум» целесообразно использовать такой алгоритм, действие которого аналогично действию фильтра нижних частот [9]. Частотная характеристика фильтра на графике показана пунктирной линией.

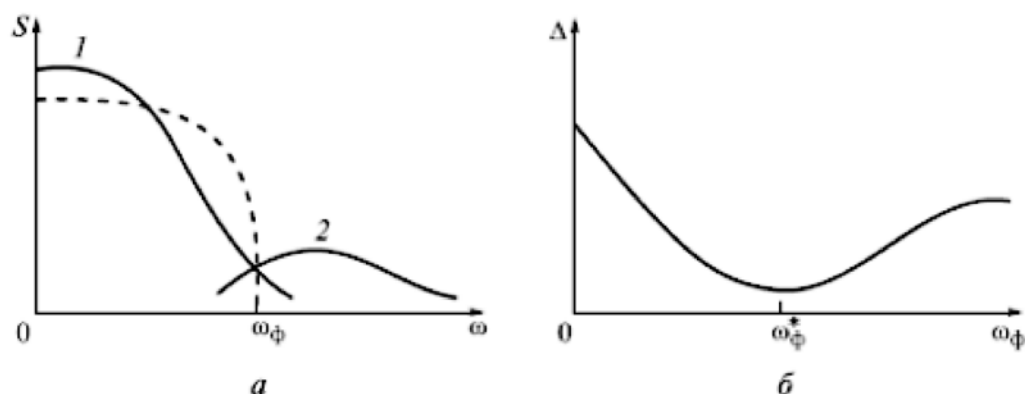


Рис. 3. Сглаживание экспериментальных характеристик:
а — спектральные плотности полезного сигнала (1) и шума (2)
(пунктирной линией показана частотная характеристика фильтра);
б — погрешность результата фильтрации

Из рис. 3, *б* видно, что погрешность Δ результата зависит от частоты среза фильтра ω_ϕ (увеличение погрешности на частотах $\omega_\phi < \omega_\phi^*$ связано с тем, что отфильтровывается полезная часть сигнала). В каждом фильтрующем алгоритме имеется параметр, аналогичный ω_ϕ . При этом важен вид зависимости, представленной на рис. 3, *б*. Ее характер является универсальным для фильтрующих алгоритмов.

Важным моментом является формализация постановки задачи идентификации. В теории управления часто используют прием, состоящий в том, что задача формулируется как оптимизационная в рамках триады, в которой получение удовлетворительного решения может потребовать нескольких итераций с корректировкой структуры и (или) изменением критерия. После выбора структуры оператора и критерия осуществляется переход к третьей составляющей — поиску параметров математической модели. Этот этап является формализованной процедурой, которая состоит в применении того или иного метода численного определения параметров, что можно трактовать как задачу нахождения экстремума функции многих переменных.

$$Q(X) \rightarrow \text{extr},$$

где X — множество параметров электропривода, подлежащих идентификации.

В рамках такого подхода задачу идентификации можно рассматривать как задачу аппроксимации экспериментальных данных динамическим оператором выбранной структуры по выбран-

ному критерию. Для нахождения экстремума могут быть использованы различные поисковые методы нелинейного программирования [10]. При таком представлении различные трудности, возникающие в процессе идентификации, можно представить в виде геометрической интерпретации. Например, сопоставить сложность функции $Q(\mathbf{X})$ со сложностью топологии гиперповерхности, оценить трудность реализации численного алгоритма с учетом особенностей поверхности. Описанный прием может оказаться полезным для многих задач, так как открывает путь к типизации их постановки.

Для идентификации электроприводов находят применение частотные методы [11] – [13] и методы, работающие в пространстве состояний [14], [15].

Спектральные методы идентификации основаны на использовании аппарата матричных операторов. Эти методы являются дальнейшим развитием частотных методов и основываются на разложении сигналов объекта по ортонормированным функциям [6], [16]. Результатом идентификации является определение ядра интегрального уравнения электропривода, которое в простейшем случае линейных одномерных систем совпадает с функцией веса. Эти методы можно отнести к непараметрическим методам идентификации. Они могут применяться для идентификации электроприводов как нестационарных систем, параметры которых, и в частности ядро интегрального уравнения, изменяются во времени.

Для идентификации динамических систем все более широкое применение находит статистическая идентификация в базисе ортогональных функций [6]. Применительно к системам управления электроприводов может применяться процедура вычисления коэффициентов разложения их импульсных переходных функций в ряд по системе ортонормированных преобразованных функций Лагерра [17] — [20]. При этом импульсная переходная функция идентифицируемой системы представляется моделью в виде ряда

$$\omega(\tau) = \sum_{j=0}^{\infty} \beta_{ja} l_{ja}(\tau), \quad (1)$$

где β_{ja} — коэффициент разложения, $l_{ja}(\tau)$ — базисные функции Лагерра.

Модель (1) удобно использовать в тех случаях, когда необходимо знать реакцию системы на то или иное воздействие, а ее структура и параметры (вид передаточной функции, постоянные времени, коэффициенты усиления) не представляют интереса. Такой подход характерен, например, для анализа и синтеза самонастраивающихся электроприводов [1], [7].

Для идентификации электроприводов ПТМ могут найти применение энергетический метод, позволяющий исследовать нелинейные элементы системы [21], [22]; методы, основанные на использовании корреляционного анализа [23], [24], искусственной нейронной сети [25]; планирования эксперимента [10], [26].

Для обеспечения возможности отдельного определения диссипативных параметров вязкого трения при их совместном действии в колебательной системе, что характерно для большинства электроприводов ПТМ, можно воспользоваться методом свободных колебаний, заключающемся в регистрации любых трех последовательных амплитуд отклонений системы от положения равновесия, по которым определяют искомые параметры [6].

Для повышения точности идентификации диссипативных параметров [4] можно использовать метод построения (демодуляции) мгновенной амплитуды (огнивающей) затухающего вибросигнала путем применения интегрального преобразования Гильберта [27].

В практике эксплуатации электроприводов ПТМ моменты сопротивления могут являться функциями времени. В этом случае для идентификации параметров можно воспользоваться подходом, изложенным в работе [28], основанным на введении в систему обратной связи по выходу и организации гармонических колебаний, частота которых позволяет оценить неизвестный параметр.

Процесс решения задачи идентификации технического состояния элементов механической системы электропривода при прецедентном подходе представляет собой идентификацию (распознавание) проблемной ситуации по заданному (вводимому пользователем) набору идентификационных признаков [4]. При этом основное внимание уделяется следующим этапам: поиск и извле-

чение похожих ситуаций (аналогов) и повторное использование решений, принятых в похожих ситуациях (включая их адаптацию к новой проблемной ситуации) [29].

Для идентификации диссипативных параметров сухого и вязкого трения при их совместном действии в колебательной системе применяются метод вибродиагностики амплитуд трех последовательных затухающих колебаний и метод построения функции мгновенной амплитуды [29]. Например, для массового контроля подшипников и измерения суммарной вибрации в машинах применяют измерительный прибор 805 Vibration Meter. Этот прибор позволяет измерять параметры состояния подшипника, суммарные вибрации машины, жесткость вибрации и обладает встроенной памятью. Доступны также три типа измерений: вибрация подшипника, суммарная вибрация и температура. Также одним из способов повышения эффективности статистического контроля состояния электроприводов ПТМ, характеризующихся большим числом идентифицируемых параметров, является применение карт Хотеллинга [30].

Математические модели систем с распределенными параметрами, разветвленной и лестничной структурой применяются для идентификации механической системы электропривода сложной конфигурации [31].

Анализ структур построения электроприводов ПТМ и методов идентификации их параметров показывает, что для решения рассматриваемой задачи следует использовать принцип декомпозиции, который предполагает рассмотрение системы в виде совокупности составляющих ее элементов. При этом целесообразно выделять электрическую и механическую части электропривода, а последнюю из них, используя метод аналогии [4], представлять в виде механической цепной схемы. Такой подход позволит использовать эффективные методы, пригодные для идентификации как электрической, так и механической систем электропривода.

Рассмотрим алгоритмы идентификации элементов электроприводов ПТМ.

С точки зрения теории автоматического регулирования электрическая система привода включает в себя звенья первого (регуляторы, силовой преобразователь), второго (электродвигатель постоянного тока) и более высоких порядков (синхронный и асинхронный электропривод). В качестве звена первого порядка рассмотрим наиболее часто применяемый в электроприводах ПТМ ПИ-регулятор, имеющий частотную характеристику

$$W_{\text{рег}}(j\omega) = \frac{u_{\text{вых}}(j\omega)}{u_{\text{вх}}(j\omega)} = K_{\text{рег}} \frac{1 + j\omega T_{\text{рег}}}{j\omega T_{\text{рег}}}.$$

Целью идентификации подобного звена является определение статического коэффициента преобразования $K_{\text{рег}}$ и постоянной времени $T_{\text{рег}}$. Эта операция может быть выполнена несколькими способами: по амплитудно-фазовой характеристике или логарифмической частотной характеристике звена. Однако наибольшая точность идентификации достигается при использовании квадрата модуля частотной характеристики [32]

$$|W_{\text{рег}}(j\omega)|^2 = K_{\text{рег}}^2 + \frac{K_{\text{рег}}^2}{T_{\text{рег}}^2} \frac{1}{\omega^2}. \quad (2)$$

Функция (2) линеаризуется в координатах $y = |W_{\text{рег}}(j\omega)|^2$ и $x = 1/\omega^2$:

$$y = a + bx,$$

где коэффициенты $a = K_{\text{рег}}^2$; $b = (K_{\text{рег}} / T_{\text{рег}})^2$.

Таким образом, можно рекомендовать следующий порядок идентификации ПИ-регуляторов электропривода:

- при помощи экспериментальных данных измерения амплитудных значений входного и выходного сигналов определяется амплитудно-частотная характеристика звена;
- в координатах $(x - y)$ наносятся экспериментальные точки квадрата модуля этой характеристики на график;

— проводится прямая линия, аппроксимирующая множество экспериментальных точек и, например, по графику, определяются параметры a и b аппроксимирующей прямой.

Параметр a равен отрезку, отсекаемому прямой на оси ординат. Параметр b является угловым коэффициентом прямой $b = (m_y / m_x) \operatorname{tg} \alpha$; m_y, m_x — масштабы по осям.

Далее находятся параметры исследуемого звена

$$K_{\text{рег}} = \sqrt{a}; T_{\text{рег}} = \frac{K_{\text{рег}}}{\sqrt{b}} = \sqrt{\frac{a}{b}}.$$

Линеаризация экспериментальных точек, как правило, автоматизируется методом наименьших квадратов [10]. Применительно к асинхронному электроприводу, рекуррентный метод наименьших квадратов, в силу своей природы, сам способен сглаживать помехи, наложенные на переменные состояния, и выполнять функцию фильтра.

Пусть в результате эксперимента получено n значений амплитудно-частотной характеристики A_j при частотах $\omega_j (j = 1 \dots q)$.

Определим координаты $y_j = (A_j)^2$ и $x_j = 1/\omega_j^2$. Составим разность

$$e = y_j - \bar{y}_j,$$

где $\bar{y}_j = a + bx_j$ — уравнение аппроксимирующей прямой.

Выберем коэффициенты a и b таким образом, чтобы сумма квадратов разностей, взятая по всем экспериментальным точкам, была наименьшей

$$\sum_{j=1}^n (y_j - \bar{y}_j)^2 = \sum_{j=1}^n (y_j - a - bx_j)^2. \quad (3)$$

Для этого продифференцируем исходное уравнение (3) по неизвестным коэффициентам a и b и приравняем произведение нулю. В результате получим систему двух линейных алгебраических уравнений

$$\begin{cases} aV_0 + bV_1 = C_0 \\ aV_1 + bV_2 = C_1, \end{cases} \quad (4)$$

где $V_k = \sum_{j=1}^n x_j^{(k)}$; $C_k = \sum_{j=1}^n y_j x_j^{(k)}$.

Решив систему (4), определим искомые коэффициенты:

$$a = \frac{C_0 V_2 - C_1 V_1}{V_0 V_2 - V_1^2}; \quad b = \frac{C_1 V_0 - C_0 V_1}{V_0 V_2 - V_1^2}.$$

Силовой преобразователь в электроприводе обычно приближенно описывается апериодическим звеном первого порядка [8]. Поэтому рассмотренная методика идентификации пригодна для определения как статического коэффициента преобразования, так и малой постоянной времени тиристорного преобразователя. Однако в этом случае следует использовать обратную частотную характеристику

$$W_n^{-1}(j\omega) = \frac{u_{\text{упр}}(j\omega)}{u_{\text{я}}(j\omega)} = \frac{1}{K_n} + j\omega \frac{\tau}{K_n},$$

где $u_{\text{упр}}$ — напряжение управления электродвигателем электропривода; $u_{\text{я}}$ — напряжение на якоре электродвигателя электропривода; K_n — статический коэффициент преобразования.

Квадрат модуля обратной частотной характеристики

$$y = |W_n^{-1}(j\omega)|^2 = \left(\frac{1}{K_n} \right)^2 + \left(\frac{\tau}{K_n} \right)^2 \omega^2.$$

Обозначив $\omega^2 = x$, получим уравнение прямой линии

$$y = a + bx, \text{ где } a = (1/K_n)^2; b = (\tau/K_n)^2.$$

Коэффициенты a и b определяются методом наименьших квадратов [10].

Далее вычисляются параметры силового преобразователя:

$$K_{\pi} = \frac{1}{\sqrt{a}}; \tau = K_{\pi} \sqrt{b} = \sqrt{\frac{b}{a}}.$$

Рассмотрим еще один способ идентификации параметров электродвигателя постоянного тока и тиристорного преобразователя, не требующий трудоемких измерений фазовых сдвигов сигнала [27].

Частотная характеристика подлежащего идентификации объекта имеет вид

$$W(j\omega) = \frac{K}{a_3(j\omega)^3 + a_2(j\omega)^2 + a_1(j\omega) + 1},$$

где $K = K_{\pi} K_{\text{д}}$; $a_1 = \tau + T_{\text{м}}$; $a_2 = T_{\text{м}}(\tau + T_{\text{я}})$; $a_3 = \tau T_{\text{я}} T_{\text{м}}$; τ — малая постоянная времени; $T_{\text{я}}$ — электромагнитная постоянная цепи якоря; $T_{\text{м}}$ — электромеханическая постоянная; $K_{\text{д}}$ — статический коэффициент преобразования.

Найдем полином с постоянными коэффициентами и придадим ему вид квадрата модуля обратной частотной характеристики

$$\bar{y} = |W^{-1}(j\omega)|^2 = b_3\omega^6 + b_2\omega^4 + b_1\omega^2 + b_0, \quad (5)$$

где $b_0 = 1/K^2$; $b_1 = (a_1^2 - 2a_2)/K^2$; $b_2 = (a_2^2 - 2a_1a_3)/K^2$; $b_3 = a_3^2/K^2$.

Подберем коэффициенты полинома (5) так, чтобы они обеспечивали среднеквадратическое приближение к экспериментальной характеристике $y = y(\omega)$, представленной $(n+1)$ экспериментальными значениями.

Для каждой экспериментальной точки определим погрешность аппроксимации $\varepsilon_k = \bar{y}(\omega_k) - y(\omega_k)$.

На основе метода наименьших квадратов вычислим сумму квадратов разностей $\sum_{k=0}^n \varepsilon_k^2 = \sum_{k=0}^n (\bar{y} - y)^2 = E$ и продифференцируем это выражение по всем искомым коэффициентам. Приравняв производные нулю, получим систему линейных уравнений относительно коэффициентов b_j :

$$\begin{cases} \frac{\partial E}{\partial b_0} = 2 \sum_{k=0}^n \varepsilon_k = 2(V_0 b_0 + V_2 b_1 + V_4 b_2 + V_6 b_3 - U_0) = 0 \\ \frac{\partial E}{\partial b_1} = 2 \sum_{k=0}^n \varepsilon_k \omega_k^2 = 2(V_2 b_0 + V_4 b_1 + V_6 b_2 + V_8 b_3 - U_2) = 0 \\ \frac{\partial E}{\partial b_2} = 2 \sum_{k=0}^n \varepsilon_k \omega_k^4 = 2(V_4 b_0 + V_6 b_1 + V_8 b_2 + V_{10} b_3 - U_4) = 0 \\ \frac{\partial E}{\partial b_3} = 2 \sum_{k=0}^n \varepsilon_k \omega_k^6 = 2(V_6 b_0 + V_8 b_1 + V_{10} b_2 + V_{12} b_3 - U_6) = 0 \end{cases},$$

или в матричной форме

$$\begin{bmatrix} V_0 & V_2 & V_4 & V_6 \\ V_2 & V_4 & V_6 & V_8 \\ V_4 & V_6 & V_8 & V_{10} \\ V_6 & V_8 & V_{10} & V_{12} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} b_0 \\ b_1 \\ b_2 \\ b_3 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} U_0 \\ U_2 \\ U_4 \\ U_6 \end{bmatrix},$$

где $V_j = \sum_{k=0}^n \omega_k^{(j)}$; $U_j = \sum_{k=0}^n y_k \omega_k^{(j)}$.

В сокращенной форме эту систему линейных уравнений можно записать в виде

$$\mathbf{Vb} = \mathbf{U}.$$

Решение данной системы имеет вид

$$\mathbf{b} = \mathbf{V}^{-1}\mathbf{U}. \quad (6)$$

Процедура обращения матрицы $\mathbf{V}$ достаточно трудоемка. Существенно упростить ее можно только путем введения ограничений, накладываемых на методику проведения эксперимента.

Рассмотрим случай идентификации при равных интервалах частотного диапазона $\Delta\omega$, начиная с исходной частоты ω_0 . При этом

$$\omega_k = \omega_0 + k\Delta\omega, \quad (7)$$

где $k = 1, 2, \dots, n$.

Если дополнительно принять $\Delta\omega = \omega_0$, то полученные формулы еще более упростятся

$$\omega_k = (1 + k) \omega_0,$$

где $k = 1, 2, \dots, n$.

Это позволяет получить простые выражения для всех функций V_j

$$V_j = \omega_0^j \sum_{k=1}^z k^j,$$

где $z = n + 1$ — общее число экспериментальных точек, по которым производится идентификация.

Для фиксированного числа измерений функции V_j имеют конкретные числовые значения [21]. Так, например, для числа $z = 5$ измерений получаем $V_0 = 5$; $V_2 = 55\omega_0^2$; $V_4 = 979\omega_0^4$; $V_6 = 20515\omega_0^6$; $V_8 = 462979\omega_0^8$; $V_{10} = 10874275\omega_0^{10}$; $V_{12} = 261453379\omega_0^{12}$.

На основе (8) можно конкретизировать и функции U_j

$$U_j = \omega_0^{(j)} \sum_{k=0}^n (1+k)^{(j)} y_k = \omega_0^{(j)} \bar{U}_j. \quad (8)$$

Для случая пяти измерений получим

$$\begin{cases} \bar{U}_0 = \sum_{k=0}^4 y_k \\ \bar{U}_2 = y_0 + 4y_1 + 9y_2 + 16y_3 + 25y_4 \\ \bar{U}_4 = y_0 + 16y_1 + 81y_2 + 256y_3 + 625y_4 \\ \bar{U}_6 = y_0 + 64y_1 + 729y_2 + 4096y_3 + 15625y_4. \end{cases} \quad (9)$$

После несложных преобразований с учетом (7) и (8) запишем решение системы (6) следующим образом

$$\begin{bmatrix} B_0 \\ B_1 \\ B_2 \\ B_3 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1,82 & -0,638 & 5,37 \cdot 10^{-2} & -1,25 \cdot 10^{-3} \\ -0,638 & 0,315 & -2,95 \cdot 10^{-2} & 7,21 \cdot 10^{-4} \\ 5,37 \cdot 10^{-2} & -2,95 \cdot 10^{-2} & 2,94 \cdot 10^{-3} & -7,41 \cdot 10^{-5} \\ -1,25 \cdot 10^{-3} & 7,21 \cdot 10^{-4} & -7,41 \cdot 10^{-5} & 1,905 \cdot 10^{-6} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \bar{U}_0 \\ \bar{U}_2 \\ \bar{U}_4 \\ \bar{U}_6 \end{bmatrix}. \quad (10)$$

Для обеспечения независимости матрицы $[V]$ от начальной частоты ω_0 , в (10) введены новые коэффициенты

$$B_j = b_j \omega_0^{(2j)}. \quad (11)$$

Таким образом, комбинация уравнений (9) – (11) позволяет по экспериментальным данным (в данном случае должно быть произведено пять измерений с равными частотными интервалами) определить коэффициенты b_j в исходной характеристике (5).

Далее определим параметры идентифицируемой системы через коэффициенты b_j .

Вычислим коэффициент $K = 1/\sqrt{b_0}$. Составим систему нелинейных уравнений

$$\begin{cases} (\tau T_M T_{\text{я}})^2 = b_3 K^2 \\ (T_M T_{\text{я}})^2 + \tau^2 T_M^2 - 2\tau^2 T_M T_{\text{я}} = b_2 K^2 \\ T_M^2 + \tau^2 - 2T_M T_{\text{я}} = b_1 K^2. \end{cases} \quad (12)$$

Обозначив $(T_M T_{\text{я}})^2 = q$ перейдем к системе двух уравнений

$$\begin{cases} \tau^2 q = b_3 K^2 \\ q + \tau^2 b_1 K^2 - \tau^4 = b_2 K^2. \end{cases}$$

В полученную систему параметр q входит линейно и легко исключается. Поэтому получаем уравнение третьей степени относительно коэффициента τ^2

$$\tau^6 - b_1 K^2 \tau^4 + b_2 K^2 \tau^2 - b_3 K^2 = 0. \quad (13)$$

Можно показать, что для реальных параметров тиристорного преобразователя и большинства электродвигателей уравнение (13) имеет единственный действительный корень, который легко выделить.

После решения уравнения (13) и определения значения малой постоянной времени τ , вычисляются постоянные электродвигателя.

Из первого уравнения (12) найдем $(T_M T_{\text{я}})^2 = q = (b_3 K^2) / \tau^2$.

Откуда

$$T_M = \sqrt{b_1 K^2 + 2\sqrt{q} - \tau^2}, \quad T_{\text{я}} = \frac{\sqrt{q}}{T_M}. \quad (14)$$

Выполним идентификацию системы тиристорный преобразователь-двигатель по квадрату модуля обратной частотной характеристики.

Исходные данные для расчета следующие:

$$k = 0; 1; 2; 3; 4; f_1 = 5; 10; 15; 20; 25 \text{ Гц}; y = |W^{-1}(j\omega)|^2 \cdot 10^3 = 3,95; 4,2; 5,05; 7,24; 12,04.$$

Начальное значение частоты и ее приращение равны между собой. При этом $f_0 = 5 \text{ Гц}$, а угловая частота $\omega_0 = 2\pi f_0 \approx 31,4 \text{ рад/с}$.

На основании (10) определим функции $\bar{U}_j$:

$$\bar{U}_0 = \sum_{k=0}^4 y_k = (3,95 + 4,2 + 5,05 + 7,24 + 12,04) \cdot 10^{-3} = 0,032.$$

$$\bar{U}_2 = \sum_{k=0}^4 (1+k)^2 y_k = (3,95 + 4,2 \cdot 4 + 5,05 \cdot 9 + 7,24 \cdot 16 + 12,04 \cdot 25) \cdot 10^{-3} = 0,483.$$

$$\bar{U}_4 = \sum_{k=0}^4 (1+k)^4 y_k = (3,95 + 4,2 \cdot 16 + 5,05 \cdot 81 + 7,24 \cdot 256 + 12,04 \cdot 625) \cdot 10^{-3} = 9,859.$$

$$\bar{U}_6 = \sum_{k=0}^4 (1+k)^6 y_k = (3,95 + 4,2 \cdot 64 + 5,05 \cdot 729 + 7,24 \cdot 4096 + 12,04 \cdot 15625) \cdot 10^{-3} = 221,734.$$

Используя выражения (10) определим коэффициенты B_j :

$$B_0 = 1,82 \cdot 0,032 - 0,638 \cdot 0,483 + 5,37 \cdot 10^{-2} \cdot 9,859 - 1,25 \cdot 10^{-3} \cdot 221,734 = 2,347 \cdot 10^{-3}.$$

$$B_1 = -0,638 \cdot 0,032 + 0,315 \cdot 0,483 - 2,95 \cdot 10^{-2} \cdot 9,859 + 7,21 \cdot 10^{-4} \cdot 221,734 = 7,587 \cdot 10^{-4}.$$

$$B_2 = 5,37 \cdot 10^{-2} \cdot 0,032 - 2,95 \cdot 10^{-2} \cdot 0,483 + 2,94 \cdot 10^{-3} \cdot 9,859 - 7,41 \cdot 10^{-5} \cdot 221,734 = 2,487 \cdot 10^{-5}.$$

$$B_3 = -1,25 \cdot 10^{-3} \cdot 0,032 + 7,21 \cdot 10^{-4} \cdot 0,483 - 7,41 \cdot 10^{-5} \cdot 9,859 + 1,905 \cdot 10^{-6} \cdot 221,734 = 9,437 \cdot 10^{-8}.$$

Откуда статический коэффициент преобразования объекта $K^2 = 1/B_0 = 426,112$. Следовательно $K = 1/\sqrt{B_0} = 20,642$.

Вычислим коэффициенты кубического уравнения (13). Прежде чем перейти к решению уравнения (13), целесообразно изменить масштаб вычисления по постоянной времени τ . Если τ вычисляется в миллисекундах, то все коэффициенты увеличиваются, и не будет больших отрицательных степеней. При этом

$$\tau^6 - 3,279 \cdot 10^{-4} \tau^4 + 1,09 \cdot 10^{-8} \tau^2 - 4,195 \cdot 10^{-14} = 0.$$

Полученное уравнение может быть решено любым известным численным методом. В результате вычислений получим: $\tau = 2,984 \text{ мс} = 2,984 \cdot 10^{-3} \text{ с}$.

Дальнейшие вычисления постоянных времени удобнее производить в секундах. Найдем вспомогательную величину — произведение двух постоянных времени:

$$b_3 = \frac{4,195 \cdot 10^{-14}}{K^2} = 0; T_m T_y = \sqrt{q} = \frac{K \sqrt{b_3}}{\tau} = 6,864 \cdot 10^{-5}.$$

Используя формулу (14), определим электромеханическую и электромагнитную постоянные времени

$$T_m = \sqrt{3,279 \cdot 10^{-4} + 2 \cdot (6,864 \cdot 10^{-5}) - \tau^2} = 0,021 \text{ с};$$

$$T_y = \sqrt{q} / T_m = 6,864 \cdot 10^{-5} / 0,021 = 3,269 \cdot 10^{-3} \text{ с}.$$

Отметим, что точные значения параметров следующие: $K = 16$; $\tau = 3 \cdot 10^{-3}$; $T_m = 0,1 \text{ с}$; $T_y = 5 \cdot 10^{-3} \text{ с}$.

Значения вычисленных параметров незначительно отличаются от найденных значений, что подтверждает достаточно высокую точность рассмотренного метода идентификации.

Для идентификации параметров машин переменного тока можно воспользоваться методикой, изложенной в работе [33], или рассмотренными методами статистической идентификации. Алгоритмы, реализующие методы идентификации параметров электропривода, должны обеспечивать возможность решения задачи в реальном масштабе времени.

Анализ, разработка и применение методов идентификации объектов управления и способов оценки их текущего состояния позволяют повысить эффективность эксплуатации технических систем. Для идентификации электроприводов ПТМ следует использовать рассмотренные в статье детерминированные методы, а также статистические методы, основанные на разложении импульсных переходных функций в ряд по системе ортонормированных преобразованных функций Лагерра.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Алексеев А. А.* Идентификация и диагностика систем / А. А. Алексеев, Ю. А. Корблев, М. Ю. Шестопалов. — М.: Академия, 2009. — 352 с.
2. *Андрианов Е. Н.* Моделирование механических систем морской перегрузочной техники методом электрической аналогии / Е. Н. Андрианов, А. В. Саушев, Д. И. Троян // Морской вестник. — 2015. — № 1 (53). — С. 49–52.
3. *Саушев А. В.* Моделирование электромеханической системы вагоноопрокидывателя в речном порту Усть-Луга / А. В. Саушев, Д. И. Троян // Речной транспорт (XXI век). — 2013. — № 2 (61). — С. 61–69.
4. *Саушев А. В.* Математическое описание механической системы электропривода / А. В. Саушев. — СПб.: Изд-во СПГУВК, 2010. — 137 с.
5. *Дейч А. М.* Методы идентификации динамических объектов / А. М. Дейч. — М.: Энергия, 1974. — 240 с.
6. *Бессонов А. А.* Методы и средства идентификации динамических объектов / А. А. Бессонов, Ю. В. Загашвили, А. С. Маркелов. — Л.: Энергоатомиздат, 1989. — 280 с.
7. *Егунов Н. Д.* Методы классической и современной теории автоматического управления: в 5 т. / Н. Д. Егунов, К. А. Пупков. — М.: Изд-во МГТУ им. Н. Э. Баумана, 2004. — Т. 2. — 640 с.

8. Самосейко В. Ф. Теоретические основы управления электроприводом / В. Ф. Самосейко. — СПб.: Элмор, 2007. — 464 с.
9. Водовозов А. М. Помехозащищенные алгоритмы параметрической идентификации электромеханических систем / А. М. Водовозов, А. С. Елюков // Известия высших учебных заведений. Приборостроение. — 2009. — Т. 52. — № 12. — С. 40–43.
10. Саушев А. В. Планирование эксперимента в электротехнике / А. В. Саушев. — СПб.: Изд-во СПГУВК, 2012. — 273 с.
11. Романов С. А. Частотная идентификация электромеханической системы / С. А. Романов, И. С. Полющенко // Труды XII межд. науч.-технич. конф. «Информационные технологии, энергетика и экономика»: в 3 т. Сер. Электроэнергетика, электротехника и теплотехника, математическое моделирование и информационные технологии в производстве. — Смоленск: Универсум, 2015. — С. 140–145.
12. Кузнецов Н. К. Идентификация параметров и моделирование динамики трехмассовой мехатронной системы / Н. К. Кузнецов, А. Ю. Перелыгина, Р. В. Кононенко // Вестник Иркутского государственного технического университета. — 2010. — № 3(43). — С. 6–12.
13. Идентификация параметров механической системы на примере вибрационного электромеханического преобразователя энергии / А. С. Глазырин, В. В. Тимошкин, С. В. Цурпал, Т. А. Глазырина // Известия Томского политехнического университета. — 2010. — Т. 316. — № 4. — С. 174–177.
14. Малафеев С. И. Колебательные методы идентификации параметра демпфирования / С. И. Малафеев, А. И. Копейкин // Трение и смазка в машинах и механизмах. — 2007. — № 5. — С. 35–41.
15. Винокуров С. А. Синтез регуляторов для электромеханических систем с бесконтактным двигателем постоянного тока по импульсной переходной характеристике / С. А. Винокуров, А. А. Киселева, В. Е. Букатова // Электротехнические комплексы и системы управления. — 2007. — № 2. — С. 77–80.
16. Петров В. Л. Идентификация моделей электромеханических систем с использованием спектральных методов анализа в базисах непрерывных ортонормированных функций / В. Л. Петров // Мехатроника, автоматизация, управление. — 2003. — № 10. — С. 29–36.
17. Маркелов А. С. Взаимосвязь структуры и параметров линейной САУ с коэффициентами разложения передаточной функции в ряд Лагерра / А. С. Маркелов // Известия АН СССР. Техническая кибернетика. — 1982. — № 4. — С. 160–165.
18. Нивин А. Е. Синтез ортогональных фильтров при статистической идентификации динамических систем / А. Е. Нивин, А. В. Саушев, В. А. Шошмин // Известия высших учебных заведений. Приборостроение. — 2013. — Т. 56. — № 10. — С. 5–10.
19. Нивин А. Е. Идентификация системы управления электропривода на основе функций Лагерра / А. Е. Нивин, А. В. Саушев, В. А. Шошмин // Журнал университета водных коммуникаций. — 2013. — № 2. — С. 46–50.
20. Петров В. Л. Математическое обеспечение для идентификации электромеханической системы горных машин на основе представления оператора рядом функций Лаггера / В. Л. Петров // Горный информационно-аналитический бюллетень. — 2002. — № 1. — С. 19–21.
21. Расширение возможностей энергетического метода в задачах идентификации нелинейностей электромеханических систем / Д. И. Родькин, Д. А. Мосюндз, А. П. Черный [и др.] // Электромеханические системы, методы оптимизации и моделирования. — 2012. — № 2 (18). — С. 10–16.
22. Родькин Д. И. Энергетический метод идентификации электромеханических устройств и систем / Д. И. Родькин, Ю. В. Ромашин // Известия высших учебных заведений и энергетических объединений СНГ. Энергетика. — 2011. — № 3. — С. 10–20.
23. Акиншин Р. Н. Алгоритм идентификации параметров электропривода на основе корреляционного метода / Р. Н. Акиншин, П. И. Абрамов, Э. А. Амирбеков // Научный вестник Московского государственного технического университета гражданской авиации. — 2013. — № 193. — С. 123–125.
24. Боловин Е. В. Критический экспертный анализ методов идентификации параметров асинхронных двигателей / Е. В. Боловин // Научный вестник Новосибирского государственного технического университета. — 2015. — Т. 58. — № 1. — С. 7–27.
25. Анисимов А. А. Идентификация электромеханических систем с использованием искусственной нейронной сети / А. А. Анисимов, М. Н. Горячев // Вестник Ивановского государственного энергетического университета. — 2008. — № 3. — С. 55–58.
26. Солодов В. С. Применение методов планирования эксперимента для идентификации судового комплекса / В. С. Солодов, Ю. И. Юдин // Вестник Мурманского государственного технического университета. — 2006. — Т. 9. — № 2. — С. 187–190.

27. Николайчук О. А. Применение прецедентного подхода для автоматизированной идентификации технического состояния деталей механических систем / О. А. Николайчук, А. Ю. Юрин // Автоматизация и современные технологии. — 2009. — № 5. — С. 3–9.

28. Арановский С. В. Метод идентификации электромеханической системы при переменном моменте трения / С. В. Арановский, С. Ю. Ловлин, С. А. Александрова // Информационно-управляющие системы. — 2012. — № 1. — С. 8–11.

29. Клячкин В. Н. Диагностика многопараметрического технологического процесса по результатам статистического контроля / В. Н. Клячкин // Автоматизация и современные технологии. — 2009. — № 2. — С. 20–24.

30. Клячкин В. Н. Повышение эффективности статистического контроля многопараметрического технологического процесса на основе карты Хотеллинга с предупреждающей границей / В. Н. Клячкин, Ю. А. Кравцов // Автоматизация и современные технологии. — 2013. — № 10. — С. 35–37.

31. Петров Ю. С. Математическая модель системы электровзрывания как соединение линии с распределенными параметрами и лестничной цепи / Ю. С. Петров, Ю. В. Саханский // Автоматизация процессов управления. — 2013. — № 3 (33). — С. 44–51.

32. Михайлов О. П. Динамика электромеханического привода металлорежущих станков / О. П. Михайлов. — М.: Машиностроение, 1989. — 224 с.

33. Идентификация активного сопротивления статора и ротора асинхронного двигателя / С. Пересяда, С. Ляшевский, С. Ковбаза, М. Коноплянский // Электротехнические и компьютерные системы. — 2013. — № 9 (85). — С. 7–15.

IDENTIFICATION OF ELECTRIC DRIVES OF PORT RELOADING CARS

The analysis of methods of identification of dynamic systems in relation to electric drives of port reloading cars is provided. It is shown that electric drives of these cars are difficult electromechanical systems which mechanical part contains elements with elastic communications and is multimass. The features of these systems demanding at the solution of problems of modeling and identification of the accounting of gaps in tooth gearings are analysed; the uprugost arising in shaft; change of the moments of inertia in gear wreaths; change of rigidity of elastic elements in couplings. Use of the principle of decomposition and allocation of basic elements of the electric drives which are subject to identification is offered. On the basis of the theory of management methods of identification of elements of electric drives of port reloading cars are offered. It is shown that for this purpose use of the frequency methods and methods working in a time domain is possible. It is established that methods of active identification on the basis of the theory of planning of experiment and the statistical methods based on decomposition of pulse transitional functions in a row on system of the orthonormalized transformed Laguerre's functions are perspective.

Keywords: identification, electric drive, port reloading machines, method.

REFERENCES

1. Alekseev, A. A., Ju. A. Korablev, and M. Ju. Shestopalov. *Identifikacija i diagnostika sistem*. M.: Akademiya, 2009.
2. Andrianov, E. N., A. V. Saushev, and D. I. Trojan. "Modelirovanie mehanicheskikh sistem morskoy peregruzochnoy tehniki metodom jelektricheskoy analogii." *Morskoy vestnik* 1(53) (2015): 49-52.
3. Saushev, A. V., and D. I. Trojan. "Modelling of electromechanical system of car dumper in river port Ust-Luga." *River transport (XXIst century)* 2(61) (2013): 61-69.
4. Saushev, A. V. *Matematicheskoe opisanie mehanicheskoy sistemy jelektricheskogo privoda*. SPb.: SPGUVK, 2010.
5. Dejch, A. M. *Metody identifikacii dinamicheskikh obektov*. M.: Jenergija, 1974.
6. Bessonov, A. A., and et. al. *Metody i sredstva identifikacii dinamicheskikh obektov*. — L.: Jenergoatomizdat, 1989.
7. Egupov, N. D., and K. A. Pupkov. *Metody klassicheskoy i sovremennoj teorii avtomaticheskogo upravleniya. Tom. 2. Statisticheskaja dinamika i identifikacija sistem avtomaticheskogo upravleniya*. M.: MG TU im. N. Je Bauman, 2004.
8. Samosejko, V. F. *Teoreticheskie osnovy upravleniya jelektricheskimi privodami*. SPb.: Jelmor, 2007.

9. Vodovozov, A. M., and A. S. Eljukov. "Algorithms of parametrical identification of electromechanical systems protected against hindrance." *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedeniy. Priborostroenie* 52.12 (2009): 40–43.
10. Saushev, A. V. *Planirovanie jeksperimenta v jelectrotehnike*. SPb.: FBOU VPO SPGUVK, 2012.
11. Romanov, S. A., and I. S. Poljushhenkov. "Chastotnaja identifikacija jelectromehaničeskoj sistemy." *Trudy XII mezhd. nauchno-tehnich. konf. «Informacionnye tehnologii, jenergetika i jekonomika» v 3-h tomah. Ser. Jelectroznergetika, jelectrotehnika i teplotehnika, matematičeskoe modelirovanie i informacionnye tehnologii v proizvodstve*. Smolensk: Universum, 2015: 140-145.
12. Kuznecov, N. K., A. Ju. Pereygina, and R. V. Kononenko. "Parameters identification and simulation of three-mass mechatronic system dynamics." *Bulletin of Irkutsk State Technical University* 3(43) (2010): 6-12.
13. Glazyrin, A. S., V. V. Timoshkin, S. V. Curpal, and T. A. Glazyrina. "Identifikacija parametrov mehaničeskoj sistemy na primere vibracionnogo jelectromehaničeskogo preobrazovatelja jenerгии." *Bulletin of the Tomsk Polytechnic University* 316.4 (2010): 174-177.
14. Malafeev, S. I., and A. I. Kopejkin. "Oscillatory method of the damping parameter definition." *Trenie i smazka v mashinah i mehanizmah* 5 (2007): 35-41.
15. Vinokurov, S. A., A. A. Kiseleva, and V. E. Bukatova. "Sintez reguljatorov dlja jelectromehaničeskikh sistem s beskontaktnym dvigatelem postojannogo toka po impulsnoj perehodnoj harakteristike." *Jelectrotehničeskie komplekсы i sistemy upravlenija* 2 (2007): 77-80.
16. Petrov, V. L. "Identifikacija modelej jelectromehaničeskikh sistem s ispolzovaniem spektralnykh metodov analiza v bazisah nepreryvnyh ortonormirovannykh funkcij." *Mechatronics, automation, control* 10 2003: 29–36.
17. Markelov, A. S. "Vzaimosvjaz' struktury i parametrov linejnoj SAU s koeficientami razložhenija peredatočnoj funkcii v rjad Lagerra." *Izv. AN SSSR. Tehničeskaja kibernetika* 4 (1982): 160-165.
18. Nivin, A. E., A. V. Saushev, and V. A. Shoshmin. "Synthesis of orthogonal filters in statistical identifications of dynamic system." *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedeniy. Priborostroenie* 56.10 (2013): 5-10.
19. Nivin, A. E., A. V. Saushev, and V. A. Shoshmin. "Identifikacija sistemy upravlenija jelectroprivoda na osnove funkcij Lagerra." *Zhurnal universiteta vodnykh kommunikacij* 2 (2013): 46-50.
20. Petrov, V. L. "Matematičeskoe obespečenie dlja identifikacii jelectromehaničeskoj sistemy gornyh mashin na osnove predstavlenija operatora rjadom funkcij Lagerra." *Mining informational and analytical bulletin (scientific and technical journal)* 1 (2002): 19-21.
21. Rodkin, D. I., D. A. Mosjundz, A. P. Chernyj, and T. V. Korenkova. "Rasshirenie vozmožnostej jenergetičeskogo metoda v zadachah identifikacii nelinejnostej jelectromehaničeskikh system." *Jelectromehaničeskie sistemy, metody optimizacii i modelirovanija* 2(18) (2012): 10-16.
22. Rodkin, D. I., and Ju. V. Romashihin. "Energy Method for Identification of Electromechanical Devices and Systems." *Energetika. Proceedings of CIS higher education institutions and power engineering associations* 3 (2011): 10-20.
23. Akinshin, R. N., P. I. Abramov, and Je. A. Amirbekov. "Electric drive parameter identification algorithm on the basis of correlation method." *Nauchnyj vestnik Moskovskogo gosudarstvennogo tehničeskogo universiteta grazhdanskoj aviacii* 193 (2013): 123-125.
24. Bolovin, E. V. "Critical expert analysis of the induction motor parameters identification methods." *Scientific Bulletin of NSTU* 58.1 (2015): 7-27.
25. Anisimov, A. A., and M. N. Gorjachev. "Identification of electromechanical systems with using of artificial neural network." *Vestnik IGEU* 3 (2008): 55-58.
26. Solodov, V. S., and Ju. I. Judin. "Primenenie metodov planirovanija jeksperimenta dlja identifikacii sudovogo kompleksa." *Vestnik of MSTU* 9.2 (2006): 187-190.
27. Nikolajchuk, O. A., and A. Ju. Jurin. "An application of case-based reasoning for technical state automatic identification of the mechanical systems details." *Avtomatizacija i sovremennye tehnologii* 5 (2009): 3-9.
28. Aranovskij, S. V., S. Ju. Lovlin, and S. A. Aleksandrova. "Identification Method for the Electromechanical System with the Variable Friction Torque." *Informacionno-upravliaiushchie sistemy* 1 (2012): 8-11.
29. Kljachkin, V. N. "Diagnostics of the multiparameter technological process on the basis of statistical control results." *Avtomatizacija i sovremennye tehnologii* 2 (2009): 20-24.

30. Kljachkin, V. N., and Ju. A. Kravcov. "Povyshenie jeffektivnosti statisticheskogo kontrolja mnogoparametricheskogo tehnologicheskogo processa na osnove karty Hotellinga s preduprezhdajushhej granicej." *Avtomatizacija i sovremennye tehnologii* 10 (2013): 35-37.

31. Petrov, Ju. S., and Ju. V. Sahanskij. "A mathematical model of the electric-blasting system as a connection of line with distributed parameters and the chain ladder." *Automation of Control Processes* 3(33) (2013): 44-52.

32. Mihajlov, O. P. *Dinamika jelectromehaničeskogo privoda metallovezhushhih stankov*. M.: Mashinostroenie, 1989.

33. Peresada, S., S. Ljashevskij, S. Kovbaza, and M. Konoplinskij. "Identification of stator and rotor resistances of induction motors." *Electrotechnic and computer systems* 9(85) (2013): 07-15.

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

Саушев Александр Васильевич —
кандидат технических наук, доцент,
старший научный сотрудник.
ФГБОУ ВО «ГУМРФ имени
адмирала С. О. Макарова»
saushev@bk.ru, ep-gumrf@bk.ru
Троян Дмитрий Игоревич — аспирант.
ФГБОУ ВО «ГУМРФ имени
адмирала С. О. Макарова»
Научный руководитель:
Саушев Александр Васильевич
ep-gumrf@bk.ru

INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Saushev Alexander Vasilyevich —
Candidate of Engineering, associate professor,
senior research associate.
Admiral Makarov State University
of Maritime and Inland Shipping
saushev@bk.ru, ep-gumrf@bk.ru
Trojan Dmitry Igorevich — postgraduate.
Admiral Makarov State University
of Maritime and Inland Shipping
Supervisor:
Saushev Alexander Vasilyevich
ep-gumrf@bk.ru

ИНФОРМАЦИОННЫЕ ТЕХНОЛОГИИ И АВТОМАТИЗАЦИЯ НА ТРАНСПОРТЕ

УДК 004.056.53 : 004.4

А. Н. Люльченко,
А. П. Нырков,
В. Г. Швед

МОДЕЛЬ СИСТЕМЫ ОБЕСПЕЧЕНИЯ ИНФОРМАЦИОННОЙ БЕЗОПАСНОСТИ НА ТРАНСПОРТЕ

В статье рассматриваются особенности моделирования системы обеспечения информационной безопасности (СОИБ) на объектах защиты органов управления транспортом. В качестве основных отличительных факторов выделены достаточно большое многообразие и разнородность СОИБ и обрабатываемой информации в них. Исследование СОИБ возможно с использованием методов моделирования процессов их функционирования. В качестве математической схемы для описания динамики системы обеспечения информационной безопасности предлагается дискретный метод представления процессов обеспечения информационной безопасности, который соответствует их содержанию и значительно облегчает их математическое описание. Показано, что важнейшим этапом, оказывающим влияние на качество принимаемого решения при управлении информационной безопасностью организации, является оценка фактического состояния системы обеспечения информационной безопасности. Представленная система отображений позволяет выявить взаимозависимость и взаимовлияние различных факторов, оказывающих воздействие на систему обеспечения информационной безопасности организации, и служит методологической базой для разработки конкретных методик. Процесс разработки формальной схемы позволяет структурировать и четко сформулировать суть задачи оценки состояния системы обеспечения информационной безопасности.

Ключевые слова: информационная безопасность, модель, формализация, управление, информационная система, оценка состояния.

В НАСТОЯЩЕЕ время Министерством транспорта Российской Федерации и подведомственными ему федеральными агентствами и службой создается система информационного обеспечения безопасности населения на транспорте. Эта система осуществляет интеграцию информационных ресурсов органов исполнительной власти всех уровней в области обеспечения транспортной безопасности в единое защищенное закрытое информационное пространство [1]. В рамках системы информационного обеспечения безопасности населения на транспорте создается Единая государственная информационная система обеспечения транспортной безопасности (ЕГИС ОТБ). Укрупненная структура ЕГИС ОТБ представлена на рис. 1. Как видно, она представляет собой трехуровневую систему: на первом уровне находятся объекты информатизации (ОИ) Минтранса России; на втором уровне — ОИ подведомственных агентств и службы (шесть объектов); на нижнем уровне — ОИ территориальных органов федеральных агентств и службы (31 объект) [1]. В структурных подразделениях Минтранса России, подведомственных агентств и службе, территориальных органах федеральных агентств и службы (далее — организации) осуществляется обработка персональных данных как своих сотрудников (в кадровых подразделениях и бухгалтериях), так и пассажиров, а также возможна обработка служебной и другой информации ограниченного доступа [2], [3].

Скопление больших объемов информации приводит к увеличению вероятности утечки информации ограниченного доступа, а значит, и к необходимости принятия мер по обеспечению безопасности информации. Совершенствуются средства и способы несанкционированного доступа к информации, ее искажения, уничтожения или подмены. К этим проблемам обеспечения безопасности обрабатываемой информации добавляются вопросы защиты в каналах передачи данных и в мультисервисных сетях транспортной отрасли [4] — [7]. В связи с этим появляется необходимость в постоянном совершенствовании способов и средств обеспечения информационной безопасности [8] — [13]. В указанных организациях объектами защиты являются [11]:

- информация, обрабатываемая и содержащаяся в информационных системах;
- технические средства (в том числе средства вычислительной техники, машинные носители информации, средства и системы связи и передачи данных, технические средства обработки буквенно-цифровой, графической, видео- и речевой информации);
- общесистемное, прикладное, специальное программное обеспечение;
- информационные технологии, а также средства защиты информации.



Рис. 1. Структура единой государственной информационной системы обеспечения транспортной безопасности

Информационная безопасность достигается путем реализации соответствующего комплекса мероприятий по управлению информационной безопасностью с целью защиты информации от широкого диапазона угроз для обеспечения конфиденциальности, целостности и доступности информации в организациях [14], [15]. Для обеспечения выполнения требований по конфиденциальности, целостности и доступности информации в рамках ЕГИС ОТБ должна создаваться система обеспечения информационной безопасности и соответствующая ей система управления информационной безопасностью (СУИБ).

Специфическими особенностями при решении задач создания системы обеспечения информационной безопасности (СОИБ) являются:

- неполнота и неопределенность исходной информации о характерных угрозах информационной безопасности;
- многокритериальность задачи создания и оценки состояния СОИБ, связанная с необходимостью учета большого числа частных показателей (требований) системы обеспечения информационной безопасности;
- наличие как количественных, так и качественных показателей, которые необходимо учитывать при решении задач разработки и внедрения СОИБ;
- невозможность применения классических методов оптимизации.

Следовательно, система обеспечения информационной безопасности является носителем свойств сложной системы. Определение оптимальных (рациональных) вариантов ее построения и обеспечения результативности мероприятий по нейтрализации угроз информационной безопасности может быть выполнено при тщательном и глубоком знании ее функционирования, что обуславливает необходимость использования методов математического моделирования. Практическая

задача обеспечения информационной безопасности состоит в разработке модели представления системы информационной безопасности, которая позволяла бы решать задачи создания, использования и оценки эффективности СОИБ как для проектируемых, так и существующих систем.

В качестве математической схемы для описания динамики системы обеспечения информационной безопасности примем дискретный метод представления процессов обеспечения информационной безопасности. Под процессом обеспечения информационной безопасности будем понимать совокупность последовательных действий, направленную на достижение требуемой защищенности информации и информационной структуры организации от актуальных угроз безопасности информации. Представление функционирования СОИБ как конечного дискретного процесса соответствует его содержанию и значительно облегчает его математическое описание.

В общем случае элементами внутреннего состояния системы обеспечения информационной безопасности являются органы управления R , организационно-распорядительные документы D , а также средства обеспечения информационной безопасности Z . Средства обеспечения информационной безопасности включают технологии, физические, технические, программные, криптографические, правовые, организационные средства, а также средства сбора, формирования, обработки, передачи или приёма информации о состоянии информационной безопасности организации и мерах по её совершенствованию.

Под внутренним состоянием элементов системы обеспечения информационной безопасности будем понимать векторы S^R, S^D, S^Z , определенные на области возможных значений параметров описания элементов R, D и Z соответственно. Тогда матрица внутреннего состояния элементов СОИБ будет определяться вектором $S = (S^R, S^D, S^Z)$.

В свою очередь, состояние системы обеспечения информационной безопасности зависит от [16]:

- множества угроз информационной безопасности актуальных для данной организации $W = \{W^A, W^T\}$, где W^A, W^T — множества антропогенных и техногенных угроз информационной безопасности;

- множества требований, предъявляемых к системе обеспечения информационной безопасности $P = \{P^R, P^D, P^Z\}$, где P^R, P^D, P^Z — множества требований, предъявляемых к состоянию элементов R, D и Z системы S соответственно;

- множества управляющих воздействий на элементы системы обеспечения информационной безопасности $U = \{U_l\}$, где U_l — значение управляющего параметра, определяющего характер функционирования l -го элемента СОИБ.

Переменные S, W, P образуют многомерное пространство состояния системы обеспечения информационной безопасности. Точку $G = (S, W, P)$ в этом пространстве назовем состоянием системы обеспечения информационной безопасности. Тогда процесс функционирования СОИБ можно представить через изменение во времени ее состояния: $G = (S, W, P)$.

Для описания динамики состояния системы обеспечения информационной безопасности примем дискретный метод представления процессов обеспечения информационной безопасности. Такое представление функционирования СОИБ, как правило, соответствует его содержанию и особенно периодичности контроля (аудита), а также позволяет упростить его математическое описание. Описание процессов функционирования СОИБ дискретной математической схемой представляет собой временную последовательность состояний системы, определяемую положением точки G в многомерном пространстве параметров ее состояния.

С учетом ранее изложенного, выражение, описывающее движение точки G во времени, имеет следующий вид:

$$G(0), F_1 : \{G(0)\} \rightarrow G(1), F_2 : \{G(1)\} \rightarrow G(2), \dots, F_n : \{G(n-1)\} \rightarrow G(n), \dots, F_N : \{G(N-1)\} \rightarrow G(N).$$

Для упрощения дальнейшего анализа будем полагать, что операторы преобразования F_n не зависят от времени, а зависят от n -го номера шага процесса функционирования системы обеспечения информационной безопасности. Примем, что $F : \{G(n)\}, \forall n \in 1..N$ есть процесс функци-

онирования СОИБ, где n — номер шага процесса, а N — число шагов, определяющих рассматриваемую продолжительность функционирования системы. Изменение состояния СОИБ представляет собой функцию управления $G(n) = G_U(U(n))$. На любом n -м шаге процесса поведение системы обеспечения информационной безопасности определяется вектором управления $U = (U_i)$.

Изменение состояния СОИБ определяется изменением модели угроз информационной безопасности, функционированием ее элементов и их взаимодействием в процессе этого функционирования в соответствии с управляющими воздействиями, которые формируются СУИБ. В ходе функционирования элементы системы обеспечения информационной безопасности меняют свое внутреннее состояние, следовательно, для дискретного описания процесса изменения состояния СОИБ $G(n)$ необходимо определить последовательность изменения составляющих состояния на каждом n -м шаге процесса ее функционирования.

С учетом содержания процессов функционирования СОИБ последовательность изменения состояния $G(n)$ может быть представлена следующим образом. На $(n + 1)$ шаге изменяются угрозы информационной безопасности $W(n + 1)$, что обуславливает изменение требований к системе обеспечения информационной безопасности $P(n + 1)$. С появлением новых требований осуществляется оценка соответствия состояния СОИБ предъявляемым требованиям и вырабатываются управляющие воздействия $U(n + 1)$ на изменение внутреннего состояния элементов $S = \{S^R, S^D, S^2\}$ системы обеспечения информационной безопасности с целью нейтрализации новых угроз информационной безопасности. Тем самым формируется вектор внутреннего состояния $S(n + 1)$ на $(n + 1)$ -м шаге процесса ее функционирования.

Представим процесс $F : \{G(n)\} \rightarrow G(n + 1)$ изменения состояния и управления системы на $(n + 1)$ -м шаге следующей системой операторов:

$$M_1 : \{W(n), P(n), U(n), S(n)\} \rightarrow W(n + 1);$$

$$M_2 : \{W(n + 1), P(n), U(n), S(n)\} \rightarrow P(n + 1);$$

$$M_3 : \{W(n + 1), P(n + 1), U(n), S(n)\} \rightarrow U(n + 1);$$

$$M_4 : \{W(n + 1), P(n + 1), U(n + 1), S(n)\} \rightarrow S(n + 1).$$

Оператор преобразования F представляет собой последовательность операторов M_1, M_2, M_3, M_4 .

Следующим шагом формализации процессов обеспечения информационной безопасности является описание управляющих воздействий $U = (U_i)$, вырабатываемых системой управления информационной безопасностью.

Деятельность службы обеспечения информационной безопасности в общем случае представляет собой приведенную последовательность действий:

- сбор информации о состоянии системы обеспечения информационной безопасности;
- оценка состояния системы обеспечения информационной безопасности;
- разработка плана деятельности организации по совершенствованию СОИБ;
- выработка управляющих воздействий.

Для осуществления деятельности службы обеспечения информационной безопасности необходимо фактическое состояние системы G перевести в его информационный образ G^Φ :

$$M_5 : \{G\} \rightarrow G^\Phi,$$

где $G^\Phi = \{W^\Phi, P^\Phi, S^\Phi\}$.

Следовательно, должен существовать некоторый оператор отображения M_6 , предназначенный для формирования информационного образа о фактическом состоянии системы обеспечения информационной безопасности G^I на момент $n = 0$:

$$M_6 : \{G^\Phi, Q\} \rightarrow G^I,$$

где Q — множество показателей качества системы, $Q = \{Q^R, Q^D, Q^Z\}$, Q^R, Q^D, Q^Z — множества показателей качества элементов R, D и Z системы S соответственно.

Множество G^I представляет собой состояние системы обеспечения информационной безопасности, исходя из которого принимается решение для изменения системы $S = \{S^R, S^D, S^Z\}$. Оператор M_6 имеет важное значение в деятельности службы обеспечения информационной безопасности, так как от качества его реализации зависит полнота отображения состояния СОИБ G_Π^Φ :

$$M_6 : \{G_\Pi^\Phi, Q\} \rightarrow G^I \equiv G.$$

Важнейшим этапом, оказывающим влияние на качество принимаемого решения, является оценка фактического состояния СОИБ [17], [18]. В оценку состояния системы O^S входят: параметры элементов системы обеспечения информационной безопасности S ; перечень актуальных угроз информационной безопасности W и возможный ущерб $Y = \{Y_i\}$ от их реализации; состояние информационной инфраструктуры организации S^I , $S^I = \{S^I_i\}$, где S^I_i — параметры информационных систем, осуществляющих обработку информации в организации; требования, предъявляемые к СОИБ, $P = \{P^R, P^D, P^Z\}$. Оценка состояния системы обеспечения информационной безопасности можно представить оператором вида

$$M_7 : \{W, Y, S^I, P, Q, S\} \rightarrow O^S.$$

Тогда процесс получения информационного образа и оценка состояния системы определяется последовательностью следующих операторов:

$$M_5 : \{G\} \rightarrow G^\Phi;$$

$$M_6 : \{G_\Pi^\Phi, Q\} \rightarrow G^I;$$

$$M_7 : \{W, Y, S^I, P, Q, S\} \rightarrow O^S.$$

Для формирования информационного образа и оценки состояния системы обеспечения информационной безопасности в организациях проводится аудит информационной безопасности, направленный на выявление несоответствия системы предъявляемым требованиям, выработку решений на устранение существующих противоречий, формирование плана реализации решений [19] — [21].

Рассмотренные свойства СУИБ и принятые предположения позволяют перейти к процессу формализации управления в системе обеспечения информационной безопасности. Процесс функционирования системы управления информационной безопасностью на $(n + 1)$ -м шаге может быть представлен следующим отображением:

$$F : \{G(n), U(n)\} \rightarrow G(n+1),$$

где $G(n) = (W(n), P(n), U(n), S(n))$ — вектор состояния системы обеспечения информационной безопасности на n -м шаге ее функционирования.

Управление СОИБ представляет собой целенаправленную деятельность. Цели C (например, обеспечение целостности, доступности и конфиденциальности информации), которые задаются на определенный период функционирования системы обеспечения информационной безопасности n^* , т. е. $C(n^*)$. Цель считается достигнутой, если $G(n) \subset C(n^*)$. Управляющие воздействия содержат в себе ограничения, которые определяют параметры системы $G^*(n)$ на период выполнения поставленных задач (например, ограничения на выделение материальных и финансовых ресурсов), а также ограничения на управление $U^*(n)$ (например, последовательность решения, поставленных задач, расхода во времени материальных и финансовых ресурсов). С учетом ранее изложенного управляющее воздействие может быть представлено отображением вида:

$$U = \{C(n^*), G^*(n), U^*(n)\}.$$

Процесс принятия решения можно представить как формирование общего плана действий M_8 , последовательность процедур во времени и пространстве, в результате реализации кото-

рых достигается цель C , поставленная перед системой обеспечения информационной безопасности (нейтрализация угроз информационной безопасности), а состояние элементов СОИБ приводится в соответствие с требованиями в области обеспечения информационной безопасности $S^B = \{S_B^R, S_B^D, S_B^Z\}$:

$$M_1 : \{W(n), P(n), U(n), S(n)\} \rightarrow W(n+1);$$

$$M_2 : \{W(n+1), P(n), U(n), S(n)\} \rightarrow P(n+1);$$

$$M_3 : \{W(n+1), P(n+1), U(n), S(n)\} \rightarrow U(n+1);$$

$$M_4 : \{W(n+1), P(n+1), U(n+1), S(n)\} \rightarrow S(n+1);$$

$$G(n+1) = \{W(n+1), P(n+1), S(n+1)\};$$

$$M_5 : \{G(n+1), U(n)\} \rightarrow G^\Phi(n+1);$$

$$M_6 : \{G^\Phi(n+1), U(n)\} \rightarrow G^I(n+1);$$

$$M_7 : \{W(n+1), Y(n+1), S^I(n+1), P(n+1), S(n+1), O^S(n)\} \rightarrow O^S(n+1);$$

$$M_8 : \{G^I(n+1), O^S(n+1), U(n), C(n), S^\pi(n)\} \rightarrow C(n+1);$$

$$M_9 : \{G^I(n+1), O^S(n+1), U(n), C(n+1), S^\pi(n)\} \rightarrow U(n+1);$$

$$M_{10} : \{C(n+1), O^S(n+1), U(n+1), S^\pi(n)\} \rightarrow S^\pi(n+1),$$

где M_{10} — оператор приведения элементов СОИБ в соответствии с требованиями нормативных правовых актов и нормативных документов в области обеспечения информационной безопасности.

Как видно из приведенных операторов, управляющие воздействия направлены на приведение СОИБ в соответствие требованиям, предъявляемым к ней $S^\pi(n+1)$. Важнейшим этапом, определяющим эффективность решения, является оценка соответствия системы обеспечения информационной безопасности M_7 предъявляемым требованиям.

Сформулируем постановку задачи реализации оператора формирования управляющих воздействий с учётом положений, изложенных в работе [22]. Пусть в процессе управления информационной безопасностью на $(n+1)$ -м шаге функционирования СОИБ изменились угрозы информационной безопасности $W(n+1)$, что приводит к изменению требований $P = \{P^R, P^D, P^Z\}$. В результате оценки состояния M_7 фиксируются отклонения отдельных показателей состояния элементов СОИБ: $S = \{S^R, S^D, S^Z\}$, от требуемых значений: $P = \{P^R, P^D, P^Z\}$. Причины отклонения в результате изменения угроз информационной безопасности $W(n+1)$ известны, а средства достижения требуемых значений заранее не определены. Такое состояние в управлении информационной безопасностью в дальнейшем понимается как стандартная ситуация в обеспечении информационной безопасности. Оценка состояния осуществляется с учетом системы показателей качества СОИБ: $Q = \{Q^R, Q^D, Q^Z\}$, $Q = Q^R \cup Q^D \cup Q^Z$, $Q = \{q_i\}$, где q_i — единичный показатель качества из множества Q , где $i = \overline{1, N}$, N — количество единичных показателей.

По значениям q_i требуется:

- оценить сложившуюся ситуацию $S = \{S^R, S^D, S^Z\}$ (например, $S_{кр}$ — критическая, $S_{нд}$ — неудовлетворительная, S_n — нормальная);
- найти первопричины g_x , обусловившие возникновение S ;
- предложить альтернативные решения $\{r_i\}$;
- выбрать и обосновать оптимальное (рациональное) решение R_j .

Цель решения задачи — вернуть СОИБ в состояние нормального функционирования, т. е. отвечающую предъявляемым требованиям: $S^\pi = \{S_t^R, S_t^D, S_t^Z\}$. При этом может возникнуть два случая.

Первый случай, когда в результате изменения угроз информационной безопасности W система оказывается в критической ситуации. В зависимости от существующих ограничений на G^* и U^* она может быть переведена сразу в состояние нормального функционирования S_n либо сначала в состояние неудовлетворительного функционирования $S_{нд}$, а затем в состояние S_n :

$$\Psi(Q) : S_{кр} \rightarrow S_n \cup S_{нд} \rightarrow S_n, S_n \equiv S^r.$$

Второй случай, когда в результате изменения угроз информационной безопасности W система оказывается в состоянии неудовлетворительного функционирования $S_{нд}$. Тогда независимо от существующих ограничений система должна быть переведена в состояние S_n :

$$\Psi(Q) : S_{нд} \rightarrow S_n, S_n \equiv S^r.$$

Формула управления упрощенно может быть представлена следующим выражением:

$$\Psi(Q) \subset I(Q), O^S(S), L(g_x), M(R_j),$$

где $I(Q)$ — измерение вектора Q ; $O^S(S)$ — оценка ситуации; $L(g_x)$ — поиск показателей первопричин, давших отклонение от требуемых значений; $M(R_j)$ — поиск класса решений R_j . Эта операция последовательно повторяется для уточнения класса R_j и выхода на операцию $R_{опт}$.

Результаты решения задачи могут быть представлены в виде диаграммы, изображенной на рис. 2, где приведен пример оценки состояния защиты ПДн — персональных данных, КТ — коммерческой тайны, СЛИ — служебной информации и интегральной оценки состояния информационной безопасности организации [22].

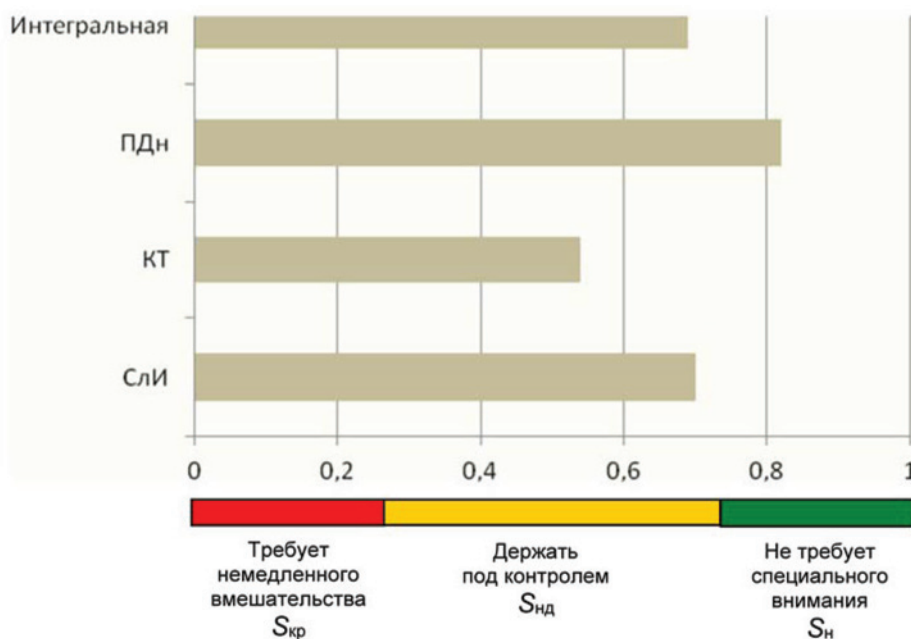


Рис. 2. Диаграмма оценки состояния защиты персональных данных, коммерческой тайны и служебной информации

Таким образом, предлагаемый метод формализованного описания систем обеспечения информационной безопасности способствует созданию четких организационных механизмов управления информационной безопасностью организации. Рассмотренные формальные модели позволяют выявить взаимозависимость и взаимовлияние различных факторов, оказывающих воздействие на систему обеспечения информационной безопасности организации, и служат методологической базой для разработки конкретных методик. Процесс разработки формальной схемы позволяет структурировать и четко сформулировать суть задачи оценки состояния системы обеспечения информационной безопасности. Практическая реализация предложенной модели позволит повы-

ситель эффективность системы обеспечения информационной безопасности на этапах ее создания, функционирования и дальнейшего развития.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Смирнов В. В.* Системы информационного обеспечения безопасности на транспорте / В. В. Смирнов, Е. П. Шабуров [Электронный ресурс]. — Режим доступа: <http://federalbook.ru/files/BEZOPASNOST/soderhanie/NB%20I/VIII/Smirnov.pdf> (дата обращения: 29.07.2015).
2. Указ Президента РФ от 06 марта 1997 г. № 188 «Об утверждении Перечня сведений конфиденциального характера» (с изменениями и дополнениями) [Электронный ресурс]. — Режим доступа: <http://base.garant.ru/10200083/> (дата обращения: 29.07.2015).
3. Федеральный закон Российской Федерации от 27.07.2006 №149-ФЗ «Об информации, информационных технологиях и о защите информации» [Электронный ресурс]. — Режим доступа: <http://ivo.garant.ru/#/document/12148555/paragraph/3471:2> (дата обращения: 29.07.2015).
4. *Нырков А. П.* Мультисервисная сеть транспортной отрасли / А. П. Нырков, С. С. Соколов, А. С. Белоусов // Вестник компьютерных и информационных технологий. — 2014. — № 4. — С. 33–38. — DOI: 10.14489/vkit.2014.04. — Р. 033–038.
5. *Нырков А. П.* Обеспечение необходимого режима информационной защищенности активов мультисервисной сети транспортной отрасли / А. П. Нырков, С. С. Соколов, Е. А. Мустакаева [и др.] // Проблемы информационной безопасности. Компьютерные системы. — 2014. — № 1. — С. 47–51.
6. *Nyrkov A. P.* Algorithmic support of optimization of multicast data transmission in networks with dynamic routing / A. P. Nyrkov, S. S. Sokolov, A. S. Belousov // Modern Applied Science. — 2015. — Vol. 9. — No. 5. — С. 162–176. — DOI: 10.5539/mas.v9n5p162.
7. *Нырков А. П.* Обеспечение безопасного функционирования мультисервисной сети транспортной отрасли / А. П. Нырков, С. С. Соколов, А. С. Белоусов [и др.] // Доклады Томского государственного университета систем управления и радиоэлектроники. — 2014. — № 2 (32). — С. 143–149.
8. *Запечников С. В.* Информационная безопасность открытых систем: в 2 т. — Т. 1. Угрозы, уязвимости, атаки и подходы к защите / С. В. Запечников, Н. Г. Милославская, А. И. Толстой [и др.] — М.: Горячая Линия – Телеком, 2006. — 536 с.
9. *Соколов С. С.* Модель угроз информационной безопасности организации / С. С. Соколов // Журнал университета водных коммуникаций. — 2009. — № 2. — С. 176–180.
10. *Вихров Н. М.* О безопасности инфраструктуры водного транспорта / Н. М. Вихров, Ю. Ф. Каторин, А. П. Нырков [и др.] // Морской вестник. — 2014. — № 4 (52). — С. 99–102.
11. *Нырков А. П.* Обеспечение безопасности объектов информатизации транспортной отрасли / А. П. Нырков, А. А. Нырков, С. С. Соколов [и др.] — СПб.: Изд-во Политехн. ун-та, 2015. — 544 с.
12. *Мищенко В. И.* Защита информации в государственных информационных системах / В. И. Мищенко, А. К. Шилов // Вестник компьютерных и информационных технологий. — 2015. — №3. — С. 45–47. — DOI: 10.14489/vkit.2015.03. — PP.045–047.
13. *Нырков А. П.* Основные принципы построения защищенных информационных систем автоматизированного управления транспортно-логистическим комплексом / А. П. Нырков, Ю. Ф. Каторин, С. С. Соколов [и др.] // Проблемы информационной безопасности. Компьютерные системы. — 2013. — № 2. — С. 54–58.
14. *Нырков А. П.* Контроль целостности данных при мониторинге транспортных средств / А. П. Нырков, Н. Ю. Вайгандт // Журнал университета водных коммуникаций. — 2013. — № 1. — С. 54–61.
15. *Нырков А. П.* Методика проектирования безопасных информационных систем на транспорте / А. П. Нырков, А. В. Башмаков, С. С. Соколов // Проблемы информационной безопасности. Компьютерные системы. — 2010. — № 3. — С. 58–61.
16. *Язов Ю. К.* Основы методологии количественной оценки эффективности защиты информации в компьютерных системах / Ю. К. Язов. — Ростов н/Д: Изд-во СКНЦ ВШ, 2006. — 274 с.
17. *Хорев А. А.* Оценка эффективности защиты вспомогательных технических средств / А. А. Хорев // Специальная техника. — 2007. — № 2. — С. 48–60; — № 3. — С. 50–63.
18. *Шивдяков Л. А.* Система показателей оценки состояния обеспечения безопасности информации в автоматизированной системе по результатам контроля / Л. А. Шивдяков, И. Н. Бозарный, Ю. К. Язов // Информация и безопасность. — Воронеж: Воронежский гос. техн. ун-т, 2009. — Вып. 2. — С. 251–257.

19. Нырков А. П. Методика аудита объектов информатизации по требованиям информационной безопасности / А. П. Нырков, С. А. Рудакова // Журнал университета водных коммуникаций. — 2012. — № 3. — С. 146–149.
20. Жигулин Г. П. Понятие, основные этапы и виды аудита информационной безопасности на предприятии / Г. П. Жигулин, А. С. Згурский, А. Н. Люльченко // Актуальные проблемы гуманитарных и естественных наук. — 2012. — № 10. — С. 57–60.
21. Сердюк В. А. Аудит информационной безопасности – основа эффективной защиты предприятия / В. А. Сердюк // ВУТЕ/Россия. — 2006. — № 4 (92). — С. 32–35.
22. Макаров А. Д. Инновационный подход в российской экономике – формальная модель управления информационной безопасностью / А. Д. Макаров, Д. В. Швед, В. Г. Швед // Актуальные направления научных исследований: от теории к практике: материалы V Междунар. науч.-практ. конф. — Чебоксары: ЦНС «Интерактив плюс», 2015. — С. 37–42.

MODEL OF THE SYSTEM PROVIDING INFORMATION SECURITY ON TRANSPORT

The features of the modeling system, which ensure information security at the transport management have been considered in this article. A big variety of such systems and of the information, which is processed in the information systems, were allocated as the main distinguishing factors. It is possible to research such systems, using methods of modeling different processes of their functioning. The discrete method of presenting information security processes is offered as a mathematical scheme for describing the dynamics of a system which provides information security. This method corresponds to their content and facilitates their mathematical description greatly. Evaluation of the actual state of the information security system is the most important step, which affects to the quality of decisions in the management of information security in the organization. This system of displaying helps to reveal the interdependence and mutual influence of various factors, which affect the system of providing the information security in organization. Also this system can be used as methodological basis for the development of specific techniques. Developing of a formal scheme allows you to structure and articulate the essence of the problem of the evaluation of the actual state of the information security system.

Key words: information security, the model, formalization, management, information system, evaluation.

REFERENCES

1. Smirnov, V., and E. Shaburov. *Information System Transportation Safety*. Web. 29 July 2015 <<http://federalbook.ru/files/BEZOPASNOST/soderzhanie/NB%20I/VIII/Smirnov.pdf>>.
2. Presidential Decree of March 06, 1997 № 188 “On Approval of the List of confidential information” (as amended). Web. 29 July 2015 <<http://base.garant.ru/10200083/>>.
3. Federal Law of the Russian Federation of 27.07.2006 №149-FZ “On information, information technologies and information protection”. Web. 29 July 2015 <<http://ivo.garant.ru/#/document/12148555/paragraph/3471:2>>.
4. Nyrkov, A. P., S. S. Sokolov, and A. S. Belousov. “Multiservice Network of Transportation Industry.” *Vestnik komp’iuternykh i informatsionnykh tekhnologii (Herald of computer and information technologies)* 4 (2014): 33 – 38. DOI: 10.14489/vkit.2014.04.pp.033–038.
5. Nyrkov, A. P., S. S. Sokolov, E. A. Mustakaeva, and V. A. Malcev. “Providing the necessary information security regime assets multiservice network transport industry.” *Information security problems. Computer systems*. 1 (2014): 47–51.
6. Nyrkov, A. P., S. S. Sokolov, and A. S. Belousov. “Algorithmic support of optimization of multicast data transmission in networks with dynamic routing.” *Modern Applied Science* 9.5 (2015): 162-176. DOI: 10.5539/mas.v9n5p162.
7. Nyrkov, A. P., S. S. Sokolov, A. S. Belousov, N. M. Kovalnogova, and V. A. Malcev. “Ensuring safe operation of multiservice network in transport industry.” *Proceedings of Tomsk State University of Control Systems and Radioelectronics* 2 (2014): 143–149.
8. Zapechnikov, S., N. G. Miloslavskaja, A. I. Tolstoj, D. V. Ushakov. *Information security of open systems. Vol. 1. Threats, vulnerabilities, attacks and approaches to protect*. M.: Hotline – Telecom, 2006.

9. Sokolov, S. S. "Model of threats of organization's information security". *Journal of University of Water Communications* 2 (2009): 176-180.
10. Vikhrov, N. M., Ju. F. Katorin, A. P. Nyrkov, et al. "On the safety of water transport infrastructure". *Maritime Bulletin* 4 (2014): 99-102.
11. Nyrkov, A. P., A. A. Nyrkov, S. S. Sokolov, and A. A. Shnurenko. *Securing objects of information transport industry*. SPb.: Publishing House of the Polytechnic. University Press, 2015.
12. Mishchenko, V. I., and A. K. Shilov. "Protecting information in state information systems." *Vestnik komp'yuternykh i informatsionnykh tekhnologii (Herald of computer and information technologies)* 3 (2015): 45-47. DOI: 10.14489/vkit.2015.03.pp.045-047.
13. Nyrkov, A. P., Ju. F. Katorin, S. S. Sokolov, and V. N. Ezhgurov. "Basic principles of secure information systems of automated management of transport and logistics complex." *Information security problems. Computer systems*. 2 (2013): 54-58.
14. Nyrkov, A. P., and N. Y. Vaygandt. "Data integrity control in the transport monitoring." *Journal of University of Water Communications* 1 (2013): 54-61.
15. Nyrkov, A. P., A. V. Bashmakov, and S. S. Sokolov. "Technique of designing secure information systems in transport." *Information security problems. Computer systems*. 3 (2010): 58-61.
16. Yazov, Y. K. *Fundamentals methodology quantifying the effectiveness of information security in computer systems*. Rostov-na-Donu: Publishing House of SKNC VS, 2006.
17. Horev, A. A. "Evaluating the effectiveness of the protection of assistive technology." *Special equipment*. 2 (2007): 48-60; 3 (2007): 50-63.
18. Shivdyakov, L. A., I. N. Bozarnyj, Ju. K. Jazov. "System of indicators to measure the state of information security in the automated system for monitoring results." *Information and Security*. 2 (2009): 251-257.
19. Nyrkov, A. P., and S. A. Rudakova. "The technique of audit of information objects for information security requirements." *Journal of University of Water Communications* 3 (2012): 146-149.
20. Zhigulin, G. P., A. S. Zgurskij, and A. N. Ljulchenko. "Concept, the main stages and types of information security audit in the enterprise." *Actual problems of the humanities and the natural sciences* 10 (2012): 57-60.
21. Serdyuk, V. A. "Information security audit – the basis of the effective protection of enterprise." *BYTE / Russia* 4 (2006): 32-35.
22. Makarov, A. D., D. V. Shved, and V. G. Shved. "Innovative approach in the Russian economy – the formal model of information security management." *Actual research directions: from theory to practice: the materials V Intern. scientific and practical. Conf Cheboksary: CNS "Interactive plus"*, 2015: 37-42.

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

Лютьченко Андрей Николаевич –
соискатель, генеральный директор.
ООО «РАЦ «ПРОМЭКСПЕРТ»
school@gkspr.ru
Нырко́в Анато́лий Па́влович –
доктор технических наук, профессор.
ФГБОУ ВО «Государственный университет
морского и речного флота
имени адмирала С. О. Макарова»
kaf.koib@gmail.com
Швед Виктор Григорьевич –
доктор технических наук, доцент.
НОУ ДПО «Учебный центр «СпецПроект»
school@gkspr.ru

INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Lyulchenko Andrei Nikolaevich –
competitor, General director.
LLC RAC "PromEkspert"
school@gkspr.ru
Nyrkov Anatoliy Pavlovich –
Doctor of Engineering, professor.
Admiral Makarov State University
of Maritime and Inland Shipping
kaf.koib@gmail.com
Shved Viktor Grigorievich –
Doctor of Engineering, associate professor.
Private educational establishment of additional
vocational training "Training Center "SpecProject"
school@gkspr.ru

АВТОМАТИЗАЦИЯ ОПРЕДЕЛЕНИЯ КРИТИЧЕСКОГО ПУТИ В ЛОГИСТИЧЕСКОЙ СИСТЕМЕ

В современных условиях продолжительность жизненного цикла продукции становится все короче, а скорость изменений в производственных и логистических технологиях все выше, что предъявляет к логистическим системам материальных грузопотоков дополнительные требования. Они должны быть более гибкими в отношении выполняемых задач, быстро и с малыми затратами времени и ресурсов адаптироваться к постоянно меняющимся запросам в системе. С целью повышения эффективности и качества функционирования логистической системы в работе предлагается производить анализ и синтез сети со сложной топологией методами компьютерного моделирования с применением в качестве средства решения ориентированного графа, по которому определяется критический путь как наиболее эффективный для достижения заданного критерия качества. В результате разработаны алгоритм и процедура оптимизации, позволяющие сократить время, необходимое для перемещения грузопотока от исходного в конечный пункт, согласно критерию качества. Алгоритм реализован с помощью разработанной программы в кодах MatLAB, простота и технологическая прозрачность которой не требуют дополнительного лицензирования. Рассмотрен конкретный пример определения критического пути для подтверждения корректности предложенных технических решений.

Ключевые слова: автоматизация, алгоритм, логистика, ориентированный граф, критический путь, целевой функционал, модель, критерий качества.

В АЖНЕЙШЕЙ задачей, стоящей сегодня перед логистическими компаниями и перед транспортной системой России в целом, является быстрая адаптация к новым, более высоким требованиям рынка к объему и, главное, качеству предоставляемых услуг. Поскольку продолжительность жизненного цикла продукции становится все короче, а скорость изменений в производственных и логистических технологиях все выше, системы материальных грузопотоков должны быть более гибкими в отношении выполняемых ими задач и вносимых новшеств. Они должны быстро и с малыми затратами адаптироваться к постоянно меняющимся запросам рынка. Всем этим требованиям соответствуют автоматические системы, использующие транспорт, работающий без участия человека [1].

Основой таких систем являются различные транспортные средства, такие, например, как робокары, «сердцем» которых являются устройства навигации и связи. Компьютер более высокого уровня обеспечивает диспозицию машин путем оптимизации маршрута движения и временных затрат на выполнение операций [2]. Эта тенденция стимулируется многочисленными инновациями в автоматических транспортных системах [3]. Поэтому повышение эффективности таких логистических систем является важной управленческой и инновационной задачей [4], [5].

Основной моделью большинства логистических схем доставки грузов является ориентированный граф, с помощью которого определяется критический путь как наиболее эффективный с точки зрения заданного критерия качества. В середине 50-х годов XX в. в теории графов сформировалась потоковая задача поиска искомого пути на сетке. Соответствующая методология получила название *сетевое планирование и управление* (СПУ) [6].

В терминологии теории графов сетевым графиком является конечный ориентированный граф без контуров, в котором имеется единственная вершина с отсутствующими прообразами и единственная вершина, не имеющая образов. Сетевым графиком можно назвать ориентированную транспортную сеть с одним входом и одним выходом, в которой нет путей с повторяющимися вершинами. Узлы в этой сетке — *события*, а дуги — *операции* (работы). Последние изображаются *стрелками (дугами)*, которые соединяют *вершины (узлы)*, представляющие события. Начало

и окончание любой работы описываются парой событий, которые называются *начальным* и *конечным* событиями. Для указания конкретной работы используют код работы (i, j) , состоящий из номеров начального (i -го) и конечного (j -го) событий. Таким образом, концы входящих в событие и начала выходящих из него дуг имеют свой кодовый признак (номер) [7], [8].

В сетевом графике реализованы два принципа:

- операция начинается только тогда, когда достигнуто ее начальное событие;
- событие считается достигнутым, если исполнены все операции, которые являются входами.

Для расчета сетевого графика обычно используют два метода:

– **метод критического пути** (*Critical Path Method (CPM)*), где длительность операций однозначно определена и задана конкретными числами [9];

– **метод анализа и просмотра программ** (*Program Evaluation and Review Technique*), где длительность операций не определена, и их задают с помощью определенных вероятностных оценок [10].

Цель обоих методов одинакова и состоит в определении минимальной продолжительности выполнения всех операций проекта. Оказалось, что для определения минимального срока выполнения всего проекта, графической и математической моделью которого является сетевой график, нужно найти в конфигурации ту длину пути, которая соединяет начальный узел с конечным. Этот путь называют **критическим путем**. Операции, которые в него входят, называют **критическими**. Они должны быть исполнены в определенный срок, поскольку их задержка приведет к увеличению длительности проекта. Все остальные операции не критические. Они имеют резерв времени. Следовательно, основное внимание должно быть сосредоточено на критических работах [11], [12].

В большинстве известных методов вычисление критического пути производится табличным способом (с применением табличного процессора) посредством вычисления ранних и поздних времен наступления событий в узлах сетевого графика. Способ этот рутинный и затратный по времени, к тому же он не обладает универсальностью для различных структур сетевой модели. Указанные обстоятельства, а также значительно возросшая мощность современных вычислительных сред, в частности среды MatLAB (version 7.9.0.529, R2009b, august 12, 2009, license number: 161051), подтолкнули авторов к созданию универсального алгоритма вычисления критического пути на основе компьютерной модели сетевого графика. С этой целью для построения сетевой модели используется математический аппарат дискретного программирования, в котором искомые переменные принимают только целочисленные или логические (булевы или бинарные) значения: нуль или единицу [13].

Математическую модель сетевой задачи построим на примере сетевого графика (рис. 1), заданного в виде ориентированного графа, который состоит из девяти узлов (событий) и 13 дуг (операций). Нужно найти критический путь от узла № 1 к узлу № 9.

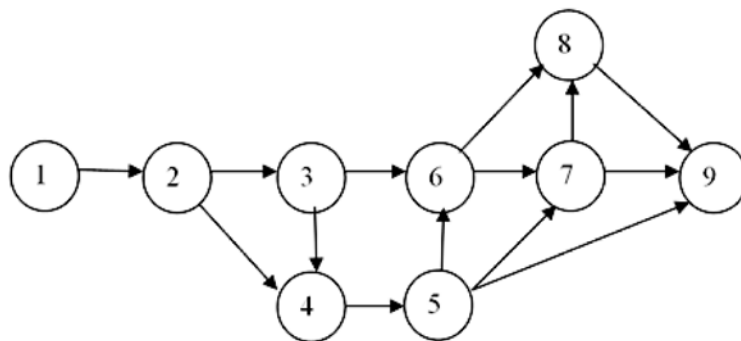


Рис. 1. Исходный ориентированный граф

Численные значения продолжительности операций (дуг), а также индексов, соответствующих началам и концам операций (дуг), приведены в табл. 1. Неизвестными в этой задаче являются

бинарные переменные x_{ij} , имеющие смысл наличия или отсутствия факта принадлежности операции (дуги) критическому пути.

Таблица 1

Исходные данные по операциям сетевого графика

Начало i	1	2	2	3	3	4	5	5	5	6	6	7	7	8
Конец j	2	3	4	4	6	5	6	7	9	7	8	8	9	9
Продолжительность T_{ij}	3	8	5	5	6	9	3	2	5	4	7	6	5	10

Тогда математическую модель задачи можно записать как совокупность следующих составляющих:

– целевой функции

$$F = \sum_{i,j}^{14} T_{ij} x_{ij} \rightarrow \min; \quad (1)$$

– ограничения-баланса (в каждом узле)

$$A_2 - A_1 = B \in \begin{cases} 1, & k=1; \\ 0, & 1 < k < 9; \\ -1, & k=9; \end{cases} \quad (2)$$

– входного потока

$$\sum_{j=2}^9 x_{ij} = \begin{cases} x_{ij} = 1, & j = k \\ x_{ij} = 0, & j \neq k \end{cases} = A_1, \quad k \in [1, 9]; \quad (3)$$

– выходного потока

$$\sum_{i=1}^9 x_{ij} = \begin{cases} x_{ij} = 1, & i = k \\ x_{ij} = 0, & i \neq k \end{cases} = A_2, \quad k \in [1, 9]; \quad (4)$$

– граничного условия $x_{ij} \in [0, 1] \geq 0, \quad i = 1, \dots, 9; \quad j = 2, \dots, 9,$

где x_{ij} — бинарные переменные состояния, фиксирующие факт принадлежности каждой из заданной в табл. 1 операции (дуги) критическому пути; i, j — индексы, соответствующие началам и концам дуг; T_{ij} — продолжительность операции (дуги) с индексами (i, j) ; k — номер (индекс) узла сетевого графика.

Левая часть ограничения (3) представляет сумму входящих потоков узла, т. е. суммируются потоки по тем дугам, концы которых совпадают с поточным узлом. Аналогично, левая часть ограничения (4) представляет собой сумму выходящих из узла потоков, т. е. суммируются потоки по тем дугам, начала которых совпадают с поточным узлом.

Таким образом, требуется найти вектор неизвестных из целевой функции (1), чтобы выполнялись условия сохранения баланса потоков для каждого узла в выражении (2):

- для узла-источника — $Выход - Вход = 1$;
- для промежуточных узлов — $Выход - Вход = 0$;
- для узла-стока — $Выход - Вход = -1$;
- все неизвестные — неотрицательные переменные.

Требуется среди множества решений системы (1) — (4) найти такое неотрицательное решение, которое составляет минимум целевой функции (1).

Реализация в среде MatLAB. Для решения задачи дискретного программирования в MatLAB используется универсальная функция `linprog`. Область поиска для нее задается следующими условиями [14]:

$A^*x \leq b$ — линейные неравенства (A — матрица, b — вектор);

$Aeq \cdot x = beq$ — линейные уравнения (Aeq — матрица, beq — вектор);

$lb \leq x \leq ub$ — ограничения на координаты (lb — вектор нижних границ и ub — вектор верхних границ).

Целевая функция $f^* \cdot x$ в `linprog` задается вектором коэффициентов f .

Форма обращения к этой функции:

$[x, J] = \text{linprog}(f, A, b, Aeq, beq, lb, ub)$,

где J — значение целевого функционала.

Для обращения к функции `linprog` подготовим входную информацию:

– вектор коэффициентов целевой функции

$f = [3 \ 8 \ 5 \ 5 \ 6 \ 9 \ 3 \ 2 \ 5 \ 4 \ 7 \ 6 \ 5 \ 10]$;

– массив номеров узлов

$Yz = [1; 2; 3; 4; 5; 6; 7; 8; 9]$;

– массив индексов i — начало дуг (операций)

$Dn = [1; 2; 2; 3; 3; 4; 5; 5; 5; 8; 6; 7; 7; 8]$;

– массив индексов j — концов дуг (операций)

$Dk = [2; 3; 4; 4; 6; 5; 6; 7; 9; 7; 8; 8; 9; 9]$;

– матрица коэффициентов системы линейных равенств (уравнений баланса), иначе, матрица инцидентий

$Aeq = A2 - A1$,

где $A1 = []$ — матрица коэффициентов линейных ограничений потоков по входу (вычисляется автоматически по заданному массиву D_k индексов j -концов дуг путем циклических итераций);

$A2 = []$ — матрица коэффициентов линейных ограничений потоков по выходу (вычисляется автоматически по заданному массиву D_n индексов i -начала дуг путем циклических итераций);

– вектор свободных (правых) членов системы линейных равенств баланса

$beq = [1; 0; 0; 0; 0; 0; 0; 0; -1]$;

– вектор нижних границ переменных

$lb = \text{zeros}(14, 1)$;

– вектор верхних границ переменных

$ul = []$.

По синтаксису функции `linprog` находится минимум. В случае максимизации критерия необходимо сменить знак коэффициентов целевой функции f либо поставить знак «минус» перед именем этого вектора:

$[x, J] = \text{linprog}(-f, [], [], Aeq, beq, lb, [])$.

Для реализации алгоритма разработана программа в кодах MatLAB и получены следующие результаты.

Матрица коэффициентов системы линейных ограничений по потокам (в ориентированном графе — матрица инцидентий):

$$Aeq = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ -1 & 1 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & -1 & 0 & 1 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & -1 & -1 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & -1 & 1 & 1 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & -1 & 0 & -1 & 0 & 0 & 1 & 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & -1 & 0 & -1 & 0 & 1 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & -1 & -1 & 0 & 1 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & -1 & 0 & 0 & 0 & -1 & -1 \end{bmatrix};$$

Вектор переменных состояния (дуг)

$x = [x1 \ x2 \ x3 \ x4 \ x5 \ x6 \ x7 \ x8 \ x9 \ x10 \ x11 \ x12 \ x13 \ x14] = [1 \ 0 \ 1 \ 0 \ 0 \ 1 \ 0 \ 0 \ 1 \ 0 \ 0 \ 0 \ 0 \ 0]$.

Длина минимального пути — критического пути $J_{\min} = 22$.

Если в качестве критерия оптимизации задается максимальное значение целевого функционала J , то вектор переменных состояния (дуг)

$$x=[x_1 \ x_2 \ x_3 \ x_4 \ x_5 \ x_6 \ x_7 \ x_8 \ x_9 \ x_{10} \ x_{11} \ x_{12} \ x_{13} \ x_{14}]=[1 \ 1 \ 0 \ 1 \ 0 \ 1 \ 1 \ 0 \ 0 \ 1 \ 0 \ 1 \ 0 \ 1],$$

а значение функционала J соответствует длине максимального пути: $J_{\max} = 48$.

Вычислительный алгоритм позволяет получить вектор состояния x для любых промежуточных значений J в диапазоне от 22 до 48 путем введения ограничений-неравенств. Расчетные значения для различных J приведены в табл. 2.

Таблица 2

Значения вектора состояния для экстремальных и промежуточных значений J

Экстремальные и промежуточные значения	Значения вектора состояния													
	x_1	x_2	x_3	x_4	x_5	x_6	x_7	x_8	x_9	x_{10}	x_{11}	x_{12}	x_{13}	x_{14}
$L_{\max} = 48$	1	1	0	1	0	1	1	0	0	1	0	1	0	1
$L_{\min} = 22$	1	0	1	0	0	1	0	0	1	0	0	0	0	0
$J = 25$	1	0	1	0	0	1	0	1	0	0	0	0	1	0
$J = 30$	1	1	0	1	0	1	0	0	1	0	0	0	0	0
$J = 35$	1	0	1	0	0	1	0	1	0	0	0	1	0	1
$J = 40$	1	0	1	0	0	1	1	0	0	1	0	1	0	1
$J = 45$														

Анализ результата. Найденные критические пути в выделенных графах табл. 3 представляют оценку максимальной продолжительности по вектору состояния, равную 48 ч.

Таблица 3

Операции с выделенными столбцами критических работ

Начало i	1	2	2	3	3	4	5	5	5	6	6	7	7	8
Конец j	2	3	4	4	6	5	6	7	9	7	8	8	9	9
Продолжительность T_{ij}	3	8	5	5	6	9	3	2	5	4	7	6	5	10

Выводы

1. Разработан эффективный алгоритм оптимизации временных затрат и материальных ресурсов в системах материальных грузопотоков экстремальными методами на основе компьютерных моделей для применения в логистических системах.

2. Предложена модель для выполнения технологических расчетов, представленная уравнениями целевой функции, ограничениями баланса (в каждом узле), входным и выходным потоками при соответствующих ограничениях. Введены бинарные переменные состояния, что позволило фиксировать принадлежность каждой заданной операции (дуги) соответствующему критическому пути и использовать для расчетов функции линейного программирования, содержащиеся в инструментарии Optimization Toolbox среды MatLAB.

3. Корректность и эффективность предложенных решений подтверждена на конкретном примере автоматизации расчета критического пути с полным анализом возможных вариантов с размерностью вектора состояния $\dim(X) = 14$.

4. Приведенная модель расчета, реализованная в кодах MatLAB, может быть использована не только для автоматизации логистических систем на водном транспорте, но и в телекоммуникационных системах пакетной передачи данных [3], в системах оптимизации маршрутных карт российских регионов [15], а также в других системах автоматизации и управления высокой размерности [15], [16] различного назначения.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Гузаиров М. Б. Моделирование транспортной сети поставок в строительной индустрии / М. Б. Гузаиров, В. А. Тарасова // Вестник Уфимского государственного авиационного технического университета. — 2008. — Т. 10. — № 2. — С. 58–63.
2. Разработка технологических дорожных карт // Российские нанотехнологии. — 2009. — Т. 4. — № 3–4. — С. 10–12.
3. Слядников Е. Е. Моделирование распределенных информационно-телекоммуникационных систем пакетной передачи данных / Е. Е. Слядников // Известия Томского политехнического университета. — 2008. — Т. 313. — № 5. — С. 55–60.
4. D'Ambrosio C. Mathematical programming techniques in water network optimization / C. D'Ambrosio, A. Lodi, S. Wiese, C. Bragalli // European Journal of Operational Research. — 2015. — Vol. 243. — Issue 3. — Pp. 774–788.
5. Reich D. A linear programming approach for linear programs with probabilistic constraints / D. Reich // European Journal of Operational Research. — 2013. — Vol. 230. — Issue 3. — Pp. 487–494.
6. Оре О. Теория графов / О. Оре. — М.: Либроком, 2009. — 354 с.
7. Бояринцева Т. И. Теория графов: методические указания к выполнению домашнего задания по курсу «Дискретная математика» / Т. И. Бояринцева, А. А. Мاستихина. — М.: МГТУ им. Н. Э. Баумана, 2014. — 40 с.
8. Рассел Д. Диаграмма состояний (теория автоматов) / Д. Рассел. — Изд-во: VSD, 2012. — 96 с.
9. Харари Ф. Теория графов / Пер. с англ. и предисл. В. П. Козырева / Под ред. Г. П. Гаврилова. — Изд. 2-е / Ф. Харари. — М.: Едиториал УРСС, 2003. — 296 с.
10. Этов В. И. 08.01-01B.254. Параллельный алгоритм для определения критического пути в диаграмме PERT. Paralleel algorithm for determining critical paths in PERT CHART. Migita Masahiro, Tada Akio, Itokawa Tsuyoshi, Nakamura Ryozi. Joho Shori Gakkai Ronbunshi=IPSS J. 2006. 47, N I 7. — С. 2212–2223, 13 Ил. Библ. 6. яп., Рез. англ. // Автоматика и вычислительная техника. — 2008. — № 1–3. — С. 254–254.
11. Сахаров В. В. Алгоритм оптимального планирования группового взаимодействия роботов / В. В. Сахаров, А. А. Чертков, Д. С. Тормашев // Морской вестник. — 2014. — № 4 (52). — С. 119–122.
12. Зарипова Э. Р. Дискретная математика: в 3 ч. / Э. Р. Зарипова, М. Г. Кокотчикова. — М.: Изд-во РУДН, 2013. — Ч. III. — 179 с.
13. Калмыков Г. И. Древесная классификация помеченных графов / Г. И. Калмыков. — М.: ФИЗМАТЛИТ, 2003. — 192 с.
14. Мироновский Л. А. Введение в MATLAB: учеб. пособие / Л. А. Мироновский, К. Ю. Петрова. — СПб.: СПбГУАП, 2005. — 122 с.
15. Вайнберг Аллен А. Графы для анализа структурных соотношений между переменными и их приложение к изучению российских регионов / Аллен А. Вайнберг // Прикладная эконометрика. — 2008. — № 4. — С. 42–70.
16. Бурков В. Н. Теория графов в управлении организационными системами / В. Н. Бурков, А. Ю. Заложнев, Д. А. Новиков. — М.: СИНТЕГ, 2001. — 124 с.

AUTOMATION TO DEFINE CRITICAL WAY IN LOGISTICAL SYSTEM

In modern conditions the product's life cycle duration is getting short, and changes the rate in the production and logistics technologies all above applies to the logistic material flow of additional requirements. They need to be more flexible with regard quick to tasks and reduction time investment and funds with adaptation to the constantly changing demands on the system. For efficiency and quality rise the analysis and synthesis with complex logistics networks topology is realized by a computer modeling methods for networks with a directed graph that identifies critical path. Effective processes estimation is executed. As the result the algorithm and time amount optimization procedure are considered that takes to move freight from the starting point to the final destination at the specified quality criteria. Algorithm implement realization program in MatLAB codes is constructed. According to the program and algorithm critical path definition example is discussed which is the maximum target functionality is considered.

Keywords: automation, algorithm, logistic, directed graph, critical path, the target functionality, model quality criterion.

REFERENCES

1. Guzairov, M. B., and V. A. Tarasova. "Modelirovanie transportnoj seti postavok v stroitelnoj industrii". *Vestnik UGATU* 10.2 (2008): 58–63.
2. "Razrabotka tehnologicheskikh dorozhnykh kart". *Rossijskie nanotehnologii* 4.3-4 (2009): 10–12.
3. Sljadnikov, E. E. "Simulation of distributed information telecommunication systems with batch communication." *Bulletin of the Tomsk Polytechnic University* 313.5 (2008): 55–60.
4. D'Ambrosio, C., A. Lodi, S. Wiese, and C. Bragalli. "Mathematical programming techniques in water network optimization." *European Journal of Operational Research* 243.3 (2015): 774–788.
5. Reich, Daniel. "A linear programming approach for linear programs with probabilistic constraints." *European Journal of Operational Research* 230.3 (2013): 487–494.
6. Ore, O. *Teoriya grafov*. Izdatelstvo: Librokom, 2009: 354 p.
7. Bojarinceva, T. I., and A. A. Mastihina. "Teoriya grafov: metodicheskie ukazaniya k vypolneniju domashnego zadaniya po kursu «Diskretnaja matematika»". M.: MGTU im. N. Je. Bauman, 2014: 40 p.
8. Rassel, Dzhessi. "Diagramma sostojanij (teoriya avtomatov)". Izd-vo: VSD, 2012: 96 p.
9. Harari, F. "Teoriya grafov" / Per. s angl. i predisl. V. P. Kozyreva. Pod red. G. P. Gavrilova. Izd. 2-e. M.: Editorial URSS, 2003: 296 p.
10. Jetov, V. I. "08.01-01V.254. Parallelnyj algoritm dlja opredelenija kriticheskogo puti v diagramme PERT. Paralleel algorithm for determining critical paths in PERT CHART. Migita Masahiro, Tada Akio, Itokawa Tsuyoshi, Nakamura Ryozyo. Joho Shori Gakkai Ronbunshi=IPSJ J. 2006. 47, NI 7, C. 2212–2223, 13 II. Bibl. 6. Jap.; Rez. Angl." *Avtomatika i vychislitel'naja tehnika* 1-3 (2008): 254–254.
11. Saharov, V. V., A. A. Chertkov, and D. S. Tormashev. "Algoritm optimal'nogo planirovaniya gruppovogo vzaimodejstviya robotov". *Morskoy Vestnik* 4(52) (2014): 119–122.
12. Zaripova, Je. R., and M. G. Kokotchikova. "Diskretnaja matematika". Chast III. *Teoriya grafov*. M.: Izd-vo RUDN, 2013: 179 p.
13. Kalmykov, G. I. "Drevesnaja klassifikacija pomechennykh grafov". M.: FIZMATLIT, 2003: 192 p.
14. Mironovskij, L. A., and K. Ju. Petrova. "Vvedenie v MATLAB. Uchebnoe posobi". SPb.: SPbGUAP, 2005: 122 p.
15. Allen, A. Vajnberg. "Graphical Methods of Structural Relations between Variables and their Application to Russian Regions (Part Two)". *Applied econometrics* 4 (2008): 42–70.
16. Burkov, V. N., A. Ju. Zalozhnev, and D. A. Novikov. "Teoriya grafov v upravlenii organizacionnymi sistemami". M.: Sinteg, 2001: 124 p.

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

Чертков Александр Александрович –
кандидат технических наук, доцент.
ФГБОУ ВО «ГУМРФ имени
адмирала С.О. Макарова»
chertkov51@mail.ru
Вардомская Анна Александровна –
аспирант.
ФГБОУ ВО «ГУМРФ имени
адмирала С.О. Макарова»
kaf_osnpr@gumrf.ru
Дмитриев Александр Александрович –
аспирант.
ФГБОУ ВО «ГУМРФ имени
адмирала С.О. Макарова»
kaf_osnpr@gumrf.ru

INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Chertkov Alexandr Alexandrovich –
Candidate of Engineering, associate professor.
Admiral Makarov State University
of Maritime and Inland Shipping
chertkov51@mail.ru
Vardomsкая Anna Alexandrovna –
Post-graduate student.
Admiral Makarov State University
of Maritime and Inland Shipping
kaf_osnpr@gumrf.ru
Dmitriev Alexandr Alexandrovich –
Post-graduate student.
Admiral Makarov State University
of Maritime and Inland Shipping
kaf_osnpr@gumrf.ru

МОДИФИКАЦИЯ И АНАЛИЗ ФИЛЬТРОВ ВЫДЕЛЕНИЯ КОНТУРОВ ИЗОБРАЖЕНИЙ

Рассмотрены два различных подхода к выделению границ (контуров) изображений, предназначенных для совершенствования работ систем управления и для систем автоматического распознавания морских и речных судов в случае курсов на столкновение и при подходе к портам или узким каналам. В первом подходе предлагается новая диагональная маска к фильтру Собеля, выделяющая дискретные производные в двух взаимно перпендикулярных направлениях под углом к направлению сканирования. Для сопоставления результатов работы фильтра с различными масками предлагается количественная оценка. Второй подход связан с модификацией порогового фильтра и основан на послойной независимой обработке изображения. Алгоритмы реализованы в системе компьютерной математики Maple. Показано, что несмотря на существенное усложнение порогового фильтра, скорость работы и качество порогового фильтра заметно превосходят аналогичные характеристики фильтра Собеля.

Ключевые слова: фильтр, Собель, изображение, контур, Maple.

Постановка задачи

Современные системы навигации и управления [1], [2] включают в себя как одну из важных составных частей программные комплексы выделения контуров объектов. Одним из наиболее востребованных и известных методов является алгоритм Собеля, основанный на дискретном дифференцировании изображения с помощью специальной матрицы-маски. Известны работы по улучшению работы алгоритма [3] — [19] и практике его применения в различных практических проблемах и задачах. Наиболее успешной являются работы Щарра [20], предложившего свою матрицу-маску, отличающуюся от маски Собеля несколько иным (но подобным) заполнением матрицы маски. В настоящей работе предлагается принципиально иной вариант маски к алгоритму Собеля. Для оценки качества работы алгоритма и его скорости применяется так называемый пороговый фильтр, или фильтр без маски [21], [22].

Фильтр Собеля и его модификация

Фильтр Собеля в его первоначальной трактовке [20] основан на обработке изображения специальными масками A_1 и A_2 , действие которых фактически равносильно дискретному дифференцированию функции распределения интенсивностей пикселей, находящихся под ней. Эти матрицы взаимно транспонированные и имеют вид

$$A_1 = M = \begin{bmatrix} -1 & -2 & -1 \\ 0 & 0 & 0 \\ 1 & 2 & 1 \end{bmatrix}, \quad A_2 = M^T = \begin{bmatrix} -1 & 0 & 1 \\ -2 & 0 & 2 \\ -1 & 0 & 1 \end{bmatrix}. \quad (1)$$

Изображение представляет собой матрицу интенсивностей пикселей. Первая матрица собирает информацию вокруг пикселя α_{ij} на строке i и столбце j изображения в виде суммы

$$X = \sum_{k=1}^3 \sum_{m=1}^3 A_{1,km} b_{km},$$

где b_{km} — элементы подматрицы изображения вокруг пикселя с интенсивностью α_{ij} .

Аналогичную сумму, имеющую смысл дискретной производной по направлению, перпендикулярному первому собирает вторая транспонированная матрица

$$Y = \sum_{k=1}^3 \sum_{m=1}^3 A_{2,km} b_{km}.$$

Затем интенсивность α_{ij} заменяется новым значением $\sqrt{X^2 + Y^2}$.

В настоящей работе предлагается альтернативный диагональный вариант масок:

$$A_1 = \begin{bmatrix} -1 & -2 & 0 \\ -2 & 0 & 2 \\ 0 & 2 & 1 \end{bmatrix}, \quad A_2 = \begin{bmatrix} 0 & 2 & 1 \\ -2 & 0 & 2 \\ -1 & -2 & 0 \end{bmatrix}. \quad (2)$$

Выделение дискретных производных здесь производится не вдоль осей x и y , а под углом 45° к ним. При этом матрицы не являются взаимно транспонированными. Пример обработки изображения приведен на рис. 1 и 2.



Рис. 1. Исходное изображение



Рис. 2. Результат обработки с маской (2)

Результаты обработки изображения с масками (1) и (2) различаются не сильно. Сумма модулей элементов матриц (2) равна десяти, а матриц (1) — восьми. Отсюда интенсивность линий в модифицированном варианте больше. Для более точного сопоставления результатов можно ввести поправочный коэффициент $4/5$ для всех пикселей изображения. За меру сравнения качества работы фильтра Собеля с различными видами масок можно принять параметр концентрации, имеющий смысл среднего минимума интенсивности по h строкам:

$$\gamma = \frac{1}{h} \sum_i^h \min_{j=1 \dots w}(\alpha_{ij}),$$

где число столбцов матрицы интенсивности изображения равно w (предполагается, что черный цвет имеет интенсивность, равную нулю).

Опыт показывает, что фильтр с матрицей маски диагонального вида (2) имеет лучшие (меньшие) показатели по сравнению с матрицей (1). Так, для изображения шириной $w = 100$ px это, соответственно, $\gamma_{(2)} = 0,128$ и $\gamma_{(1)} = 0,203$. Для изображений большего размера разрыв показателей растет. При ширине $w = 400$ px имеем $\gamma_{(2)} = 0,0614$ и $\gamma_{(1)} = 0,125$.

Отметим, что у фильтра Собеля есть одна характерная черта — он выделяет не только контуры, но и полутона изображений, тени. С точки зрения художественной, это, конечно, только украшает картину. Однако, если целью фильтрации является получение упрощенного изображения для его дальнейшего распознавания или коррекции (например, нейронной сетью Хопфилда), то такое «украшение» образа является только помехой, некоторым дефектом фильтрации. Качество фильтрации *edge detection* обычно сказывается на контрастности контура, и полутона снижают качество работы фильтра. Кроме того, скорость работы фильтра Собеля с любой матрицей маски невелика. Для динамических задач, например, для распознавания движущегося судна или, тем более, самолета, он пригоден только в случае достаточно быстродействующих компьютеров. Фильтру Щарра [20] присущи те же особенности. Известен пороговый фильтр, лишенный недостатков алгоритмов на основе дискретного дифференцирования изображения [21], [22].

Пороговый фильтр и его модификация

Алгоритм фильтра реализован в системе компьютерной математики Maple [23], [24]. Используется специальный пакет этой системы ImageTools, предназначенный для обработки изображений. Принята следующая система обозначений: белый цвет пикселя соответствует интенсивности 1, черный — 0. Пороговый фильтр работает по принципу сканера. Сначала изображение переводится в черно-белое и применяется пороговое преобразование пикселей с заранее выбранным порогом H . Значение порога подбирается опытным путем, обычно, для изображений со средней контрастностью $H = 0,5$. Затем пиксели, интенсивность которых меньше порога, переводятся в черные, остальные — в белые. Сканируя построчно изображение попиксельно в одном направлении, фильтр выделяет в каждой строке границы частей изображения, заменяя внутренние его части белыми пикселями и расставляя на границах черные. Аналогичное сканирование производится в перпендикулярном направлении. Затем результаты складываются. В системе Maple это эквивалентно перемножению интенсивностей пикселей. Скорость фильтра, оценка которой выполнена в работе [21], значительно превышает скорость работы фильтра Собеля и эффект от его применения растет с увеличением размера изображения. Однако и у этого фильтра имеется заметный недостаток. При обработке изображений со слабо выделенными границами он плохо работает, пропуская совершенно очевидные границы (рис. 3).



Рис. 3. Пороговая фильтрация



Рис. 4. Модификация пороговой фильтрации

Для улучшения работы алгоритма предлагается операцию перевода изображения в черно-белое (команда RGBtoGray в Maple) заменить на операцию расслоения (GetLayer) цветного изображения на три слоя, с дальнейшей работой с каждым слоем в отдельности. Затем результаты работы с каждым слоем следует сложить. В цикле по строкам и столбцам имеем

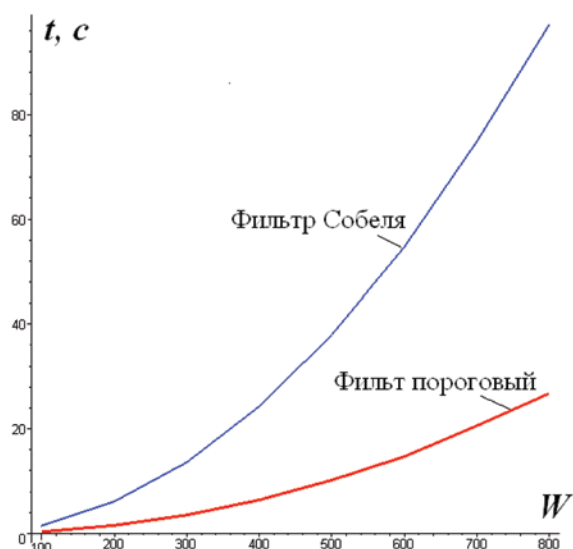


Рис. 5. Сравнение времени работы фильтров

где $\alpha_{ij} = \alpha_{ij}^{(1)} \alpha_{ij}^{(2)} \alpha_{ij}^{(3)}$, где $\alpha_{ij}^{(k)}$ — интенсивность пикселя ij слоя: $k = 1, 2, 3$. Изображение (рис. 4) получается тщательно проработанным и без теней, присущих фильтру Собеля. Сравнивая скорость работы фильтров на одном и том же объекте, но с разными размерами W (в пикселях по горизонтали — рис. 5), следует отметить, что запас быстродействия у порогового фильтра, несмотря на то, что модификация в три раза увеличила время счета, еще значителен по сравнению с фильтром Собеля. Скорость работы фильтра особенно важна в работе систем

распознавания при опасном сближении морских судов в сложных погодных условиях и, тем более, в авиации.

Выводы

1. Предложены и исследованы варианты алгоритмов выделения контуров изображений. Количественное сравнение качества работы фильтра Собеля с различными вариантами масок проводится с помощью скалярного коэффициента концентрации.

2. Проведенные опыты с несколькими вариантами изображений показывают, что маска диагонального вида выделяет более четкий контур. Пороговый фильтр принципиально отличается от фильтра Собеля и по качеству работы, и по скорости. С увеличением размера изображения преимуществ порогового фильтра только увеличиваются.

3. Система компьютерной математики Maple использована в работе как удобная платформа для моделирования. Практическое использование рассмотренных алгоритмов предполагает применение алгоритмических языков высокого уровня. Maple-программа для пороговой фильтрации доступна по адресу [25], программа для фильтра Собеля с матрицей маски (1) описана в источнике [23].

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Нырков А. П. Автоматизированное управление транспортными системами / А. П. Нырков, С. С. Соколов, А. А. Шнуренко. — СПб.: Изд-во ГУМРФ им. адм. С. О. Макарова, 2013.
2. Кузнецов В. Н. Алгоритм построения вектора признаков при распознавании судов / В. Н. Кузнецов, А. А. Матвеев, А. П. Нырков // Вестник Государственного университета морского и речного флота имени адмирала С. О. Макарова. — 2015. — № 3 (31). — С. 187–192.
3. Демин А. Ю. Распараллеливание алгоритма выделения границ объектов на основе структурно-графического представления / А. Ю. Демин, В. А. Дорофеев // Известия Томского политехнического университета. — 2013. — Т. 323. — № 5. — С. 159–164.
4. Гашников М. В. Методы компьютерной обработки изображений / М. В. Гашников, Н. И. Глумов, В. А. Сойфер. — М.: Физматлит, 2003. — 784 с.
5. Ying-Dong Q. A fast subpixel edge detection method using Sobel–Zernike moments operator / Q. Ying-Dong, C. Cheng-Song, C. San-Ben, L. Jin-Quan // Image and Vision Computing. — 2005. — Vol. 23. — № 1. — Pp. 11–17.
6. Yang W. Efficient registration of optical and infrared images via modified Sobel edging for plant canopy temperature estimation / W. Yang, X. Wang, B. Moran, A. Wheaton [etc.] // Computers & Electrical Engineering. — 2012. — Vol. 38. — № 5. — Pp. 1213–1221.
7. Kittler J. On the accuracy of the Sobel edge detector / J. Kittler // Image and Vision Computing. — 1983. — Vol. 1. — Issue 1. — Pp. 37–42.
8. Topal C. Edge Drawing: A combined real-time edge and segment detector / C. Topal, C. Akinlar // Journal of Visual Communication and Image Representation. — 2012. — Vol. 23. — № 6. — Pp. 862–872.
9. Ватутин Э. И. Программная оптимизация оператора Собеля с использованием SIMD-расширений процессоров семейства x86 / Э. И. Ватутин, С. Ю. Мирошниченко, В. С. Титов // Телекоммуникации. — 2006. — № 6. — С. 12–16.
10. Арбузов С. А. Использование градиентных фильтров для автоматизированного дешифрирования антропогенных объектов / С. А. Арбузов // Вестник Сибирской государственной геодезической академии. — 2011. — № 15 (2). — С. 62–66.
11. Тараненко С. С. Методика подготовки данных для восстановления трёхмерной структуры сцены / С. С. Тараненко, О. Ф. Ковалёв // Вестник Донского государственного технического университета. — 2014. — Т. 14. — № 3 (78). — С. 145–151.
12. Меженнин А. В. Реконструкция трёхмерных моделей по растровым изображениям / А. В. Меженнин, В. Т. Тозик // Научно-технический вестник информационных технологий, механики и оптики. — 2007. — № 45. — С. 203–207.
13. Бойко Д. А. Метод визуализации патологических структур на маммограммах / Д. А. Бойко, А. Е. Филатова // Вестник Национального технического университета Харьковский политехнический институт. Серия: Информатика и моделирование. — 2013. — № 39 (1012). — С. 9–14.

14. Topal C. Edge drawing: a heuristic Approach to Robust Real-Time Edge Detection / C. Topal, C. Akinlar, Y. Genc // Pattern Recognition (ICPR), 2010 20th International Conference on. — IEEE, 2010. — Pp. 2424–2427.
15. Topal C. Edge drawing: a combined real-time edge and segment detector / C. Topal, C. Akinlar // Journal of Visual Communication and Image Representation. — 2012. — Vol. 23. — №. 6. — Pp. 862–872.
16. Perona P. Scale-space and edge detection using anisotropic diffusion / P. Perona, J. Malik // Pattern Analysis and Machine Intelligence, IEEE Transactions on. — Vol. 12. — №. 7. — Pp. 629–639.
17. Kanopoulos N. Design of an image edge detection filter using the Sobel operator / N. Kanopoulos, N. Vasanthavada, R. L. Baker // Solid-State Circuits, IEEE Journal. — 1988. — Vol. 23. — №. 2. — Pp. 358 – 367.
18. Yasri I. Performance analysis of FPGA based Sobel edge detection operator / I. Yasri, N. H. Hamid, V. V. Yap // Electronic Design. ICED. International Conference. — 2008. — Pp. 1–4.
19. Wang W. Reach on Sobel operator for vehicle recognition / W. Wang // Artificial Intelligence, 2009. JCAI '09. International Joint Conference on. — IEEE, 2009. — Pp. 448–451.
20. Оператор Собеля // Википедия. 2013. Дата обновления: 13.03.2013. URL: <http://ru.wikipedia.org/?oldid=53441014> (дата обращения: 19.08.2015).
21. Kirsanov A. Processing Contours / A. Kirsanov, A. Vavilin, Jo K-H. // Proceedings. The 5th International Forum on Strategic Technology. Oct. 13 – 15. — Ulsan, Korea, 2010.
22. Груничев А.В. Детектирование границ объекта методом пороговой фильтрации карты насыщенности цветного изображения / А. В. Груничев, Д. В. Демкин, М. Н. Кирсанов // Инновационные технологии: Материалы междунар. науч.-практ. конф. — М.: Московский ин-т электроники и математики НИУ ВШЭ, 2013. — Т. 2. — С. 183–187.
23. Кирсанов М. Н. Maple и Maplet. Решение задач механики / М. Н. Кирсанов. — СПб.: Изд-во «Лань», 2012. — 512 с.
24. Голоскоков Д. П. Практический курс математической физики в системе Maple / Д. П. Голоскоков. — СПб.: Изд-во «ПаркКом», 2010. — 644 с.
25. <http://vuz.exponenta.ru/b-filter.rar> (дата обращения: 19.08.2015).

MODIFICATION AND ANALYSIS OF EDGE DETECTION FILTERS

We considered two different approaches to the edge detecting of images intended for the improvement of work management systems and systems for automatic recognition of marine and river vessels in case of crash courses and at the approach to the ports or narrow channels. In the first approach proposes a new diagonal mask to the Sobel filter, allocating discrete derivative in two mutually perpendicular directions at an angle to the scanning direction. The quantitative assessment to compare the results of the filter operation with different masks is proposed. The second approach is associated with a modification of the threshold filter based on layer-by-layer independent image processing. The algorithms are implemented in the computer algebra system Maple. It is shown that despite significant complication of a threshold filter, the speed and the quality threshold filter markedly superior to similar characteristics of the Sobel filter.

Keywords: filter, edge detecting, Irvin Sobel, Maple.

REFERENCES

1. Nyrkov, A. P., S. S. Sokolov, and A. A. SHnurenko. *Avtomatizirovannoe upravlenie transportnymi sistemami*. Sankt-Peterburg: Izd-vo GUMRF imeni admirala S.O. Makarova, 2013.
2. Kuznecov, V. N., A. A. Matveev, and A. P. Nyrkov. “The signs detection algorithm in ship recognition solution.” *Vestnik gosudarstvennogo universiteta morskogo i rechnogo flota imeni admirala S.O. Makarova* 3(31) (2015): 187-192.
3. Demin, A. YU., and V. A. Dorofeev. “Parallelization of algorithm for detecting borders on the basis of structural and graphic presentation.” *Bulletin of the Tomsk Polytechnic University* 323.5 (2013): 159-164.
4. Gashnikov, M. V., N. I. Glumov, and V. A. Sojfer. *Metody komp'yuternoj obrabotki izobrazhenij*. M.: Fizmatlit, 2003.
5. Ying-Dong, Q., C. Cheng-Song, C. San-Ben, and L. Jin-Quan. “A fast subpixel edge detection method using Sobel–Zernike moments operator.” *Image and Vision Computing* 23.1 (2005): 11-17.

6. Yang, W., X. Wang, B. Moran, A. Wheaton, and N. Cooley. "Efficient registration of optical and infrared images via modified Sobel edging for plant canopy temperature estimation." *Computers & Electrical Engineering* 38.5 (2012): 1213-1221.
7. Kittler, J. "On the accuracy of the Sobel edge detector." *Image and Vision Computing* 1.1 (1983): 37-42.
8. Topal, C., and C. Akinlar. "Edge Drawing: A combined real-time edge and segment detector." *Journal of Visual Communication and Image Representation* 23.6 (2012): 862-872.
9. Vatutin, E.H. I., S. YU. Miroshnichenko, and V. S. Titov. "Programmnyaya optimizatsiya operatora Sobela s ispol'zovaniem SIMD-rasshirenij processorov semeystva x86." *Telecommunications and Radio Engineering* 6 (2006): 12—16.
10. Arbuzov, S. A. "Ispolzovanie gradientnykh filtrov dlya avtomatizirovannogo deshifirovaniya antropogennykh oektov." *Vestnik Sibirskoy gosudarstvennoy geodezicheskoy akademii* 15-2 (2011): 62-66.
11. Taranenko, S. S., and O. F. Kovalyov. "Data preparation methods for recovering three-dimensional structure of the scene." *Vestnik of DSTU* 14.3(78) (2014): 145-151.
12. Mezhenin, A. V., and V. T. Tozik. "Rekonstrukciya trekhmernykh modelej po rastrovym izobrazheniyam." *Scientific and Technical Journal of Information Technologies, Mechanics and Optics* 45 (2007): 203-207.
13. Bojko, D. A., and A. E. Filatova. "The method of visualization of pathological structures of mammogram." *Vestnik Nacionalnogo tekhnicheskogo universiteta Harkovskij politekhnicheskij institut. Seriya: Informatika i modelirovanie* 39(1012) (2013): 9-14.
14. Topal, C., C. Akinlar, Y. Genc. "Edge Drawing: A Heuristic Approach to Robust Real-Time Edge Detection." *Pattern Recognition (ICPR), 2010 20th International Conference on*. IEEE, 2010: 2424-2427.
15. Topal, C., and C. Akinlar. "Edge drawing: a combined real-time edge and segment detector." *Journal of Visual Communication and Image Representation* 23.6 (2012): 862–872.
16. Perona, Pietro, and Jitendra Malik. "Scale-space and edge detection using anisotropic diffusion." *Pattern Analysis and Machine Intelligence, IEEE Transactions on* 12.7 (1990): 629-39.
17. Kanopoulos, Nick, Nagesh Vasanthavada, and Robert L. Baker. "Design of an image edge detection filter using the Sobel operator." *Solid-State Circuits, IEEE Journal* 23.2. (1988): 358 – 367.
18. Yasri, I., N. H. Hamid, and V. V.Yap. "Performance analysis of FPGA based Sobel edge detection operator." *Electronic Design. ICED. International Conference on*. IEEE, 2008: 1-4.
19. Wang, W. "Reach on Sobel operator for vehicle recognition." *Artificial Intelligence, 2009. JCAI '09. International Joint Conference on*. IEEE, 2009: 448 - 451.
20. Operator Sobelya//Vikipediya. 2013-2013. Data obnovleniya: 13.03.2013. Web. 19 Aug. 2015 <<http://ru.wikipedia.org/?oldid=53441014>>.
21. Kirsanov, A., A. Vavilin, and Jo K-H. "Processing Contours." *Proceedings. The 5th International Forum on Strategic Technology. Oct. 13-15. Ulsan, Korea, 2010*.
22. Grunichev, A. V., D. V. Demkin, and M. N. Kirsanov. "Detektirovanie granic ob'ekta metodom porogovoj fil'tracii karty nasyshchennosti cvetnogo izobrazheniya." *Innovacionnye tekhnologii: Materialy mezhdunarodnoj nauchno-prakticheskoy konferencii. Tom 2./Gl. red. S.U. Uvajsov. M.:MIEHM NIU VSHEH, 2013: 183-187*.
23. Kirsanov, M. N. *Maple i Maplet. Reshenie zadach mekhaniki*. SPb.: Izd-vo Lan, 2012.
24. Goloskokov, D. P. *Prakticheskij kurs matematicheskoy fiziki v sisteme Maple*. SPb.: Izd-vo ParkKom, 2010.
25. Web. 19 Aug. 2015 <<http://vuz.exponenta.ru/b-filter.rar>>.

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРЕ

Кирсанов Михаил Николаевич –
доктор физико-математических наук, профессор.
Национальный исследовательский университет
«Московский энергетический институт»
C216@Ya.ru

INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Kirsanov Mikhail Nikolaevich –
doctor of physico-mathematical sciences, professor.
National Research University "Moscow Power
Engineering Institute".
C216@Ya.ru

МОДЕЛИРОВАНИЕ КОНФОРМНЫХ ОТОБРАЖЕНИЙ ВАРИАЦИОННЫМ МЕТОДОМ В СИСТЕМЕ СИМВОЛЬНЫХ ВЫЧИСЛЕНИЙ MAPLE

Конформные отображения применяются при решении многочисленных технических задач, возникающих на водном транспорте. Это, прежде всего, задачи расчета плоских гармонических векторных полей в гидромеханике (русловые процессы, поля скоростей в водопроводных галереях судоходных шлюзов) и теории фильтрации (при проектировании плотин, камер судоходных шлюзов). В статье рассмотрен приближенный метод построения конформных отображений в системе символьных вычислений Maple, основанный на использовании свойств минимума площади и минимума длины контура при преобразовании области на круг и применении метода Рунца. В связи с существующими проблемами реализации аналитических методов на ЭВМ, связанными с вычислительной неустойчивостью большинства из них, излагается новый подход к решению указанных задач на основе использования возможностей символьных вычислений. Разработан алгоритм решения задачи о построении конформного отображения заданной области на круг. Методика использования системы Maple продемонстрирована на двух примерах построения конформных отображений эллипса и пятиугольника на круг единичного радиуса. Показана эффективность применения вариационного метода в совокупности с системой аналитических вычислений Maple к решению указанных задач.

Ключевые слова: конформное отображение, область, круг, метод Рунца, минимум функционала, уравнение Лапласа, комплексная переменная.

Введение

Идея применения вариационного метода к построению функций, осуществляющих приближенное конформное отображение области на круг не нова, ей посвящен, в частности, один из разделов монографии Л. В. Канторовича и В. И. Крылова [1]. Однако, из-за трудностей, возникающих при реализации данного метода, полноценно использовать его стало возможным лишь с появлением систем компьютерной математики.

Конформное преобразование и уравнение Лапласа

Конформные отображения имеют многочисленные приложения в механике, физике и технике, прежде всего для расчетов плоских гармонических векторных полей в гидро- и аэродинамике, теории фильтрации, теории электрических и магнитных полей, теории теплопередачи, теории упругости. Вопросы применения теории конформных отображений к решению задач из различных областей науки рассмотрены в работах Г. Карслоу, Н. Е. Кочина, М. А. Лаврентьева, Л. И. Седова, А. Н. Тихонова, а также других отечественных и зарубежных ученых.

Многие стационарные задачи математической физики сводятся к решению простейшего из уравнений эллиптического типа — уравнения Лапласа:

$$\frac{\partial^2 u}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 u}{\partial y^2} = 0.$$

При этом искомая функция $u(x, y)$, решающая поставленную проблему, определяется, во-первых, областью, в которой она ищется, и, во-вторых, граничными условиями, которые должны быть выполнены на контуре этой области.

Часто для простейших областей: круга, квадрата, кругового кольца, плоскости с разрезами и т. п., задача может быть просто решена даже для достаточно сложных краевых условий. Если же область имеет сложное строение, то решение задачи непосредственно для этой области представляет подчас весьма большие затруднения даже для такой простой задачи, какой является, например, проблема Дирихле. Поэтому пытаются предварительно преобразовать данную область к простейшему виду. При таких преобразованиях будет меняться, вообще говоря, не только об-

ласть, для которой ищется решение, и граничные условия, но и дифференциальное уравнение, которому должна удовлетворять искомая функция. Наибольшее значение будет, очевидно, иметь такое преобразование, относительно которого само дифференциальное уравнение остается инвариантным. Как известно, уравнение Лапласа остается инвариантным относительно конформных преобразований, доставляемых дифференцируемыми функциями комплексной переменной. Ответ на вопрос о существовании дифференцируемой функции, совершающей взаимно однозначное преобразование односвязных областей друг на друга, дается известной теоремой Римана.

Задача об эффективном построении функции, совершающей преобразование одной области на другую, даже в простом случае преобразования области на круг или круга на область, представляет часто весьма большие или даже непреодолимые затруднения. Поэтому большое значение имеют методы приближенного представления преобразующей функции. Обычно пытаются приблизиться к искомой функции, составляя известные комбинации из хорошо изученных функций. Наиболее простыми и чаще всего употребляемыми функциями являются *полиномы*. Относительно их применения К. Рунге было установлено, что в данной области всегда можно построить полином, который отличается от функции, преобразующей область на круг, как угодно мало в любой внутренней части области. Кроме того, Дж. Уолш установил, что если граница области есть простая кривая, то можно подобрать полином так, чтобы он отличался от преобразующей функции как угодно мало всюду в области, включая и её границу.

Среди функций, дающих конформное преобразование заданной односвязной однолистной области D на некоторую другую область, функция, отображающая на круг, обладает следующими экстремальными свойствами:

- свойством минимума площади при преобразовании области на круг;
- свойством минимума длины контура при преобразовании области на круг.

Указанные свойства позволяют дать сравнительно простой по идее и в некоторых случаях по вычислениям метод приближенного конформного преобразования области на круг.

Свойство минимума площади при преобразовании области на круг

Рассмотрим функцию

$$\zeta = f(z) = a_0 + a_1 z + a_2 z^2 + \dots \quad (1)$$

Допустим, нужно найти конформное преобразование однолистной области D на круг так, чтобы заданная внутренняя ее точка, которую всегда можно принять за начало координат, переходила в центр круга и определенное направление в этой точке, принимаемое за положительное направление вещественной оси, совпадало бы с положительным направлением вещественной оси преобразованной области. Эти условия равносильны требованиям:

$$f(0) = 0; \quad f'(0) = a_1 > 0.$$

Всегда можно добиться того, что $a_1 = 1$, для этого достаточно рассмотреть функцию $\frac{f(z)}{a_1}$, которая будет так же давать отображение D на круг, как и $f(z)$, но только может быть другого радиуса, что не существенно. Поэтому всегда можно предположить:

$$f(0) = 0; \quad f'(0) = 1. \quad (2)$$

Как показано в [1], функцию, дающую требуемое конформное преобразование, можно искать как решение следующей вариационной задачи: среди функций, регулярных в области D и удовлетворяющих условиям (2), найти ту, которая дает минимум интегралу

$$I = \iint_D f'(z) \overline{f'(z)} dx dy, \quad (3)$$

выражающему площадь преобразованной области по сравнению со всеми другими функциями, которые удовлетворяют требованиям условий (2).

Свойство минимума длины контура при преобразовании области на круг

Рассмотрим всевозможные конформные преобразования области D , совершаемые при помощи регулярных в области D функций $\zeta = f(z)$, удовлетворяющих условиям (2). Как показано в [1], среди таких функций функция, выполняющая конформное преобразование области D на круг, обладает тем свойством, что она дает наименьшее значение интеграла:

$$I = \int_L |f'(z)| ds, \quad (4)$$

равного длине изображения контура L .

Применение метода Ритца

Для решения задачи минимизации функционалов (3) и (4) будем использовать метод Ритца. При вычислениях по методу Ритца зачастую получаются плохо обусловленные системы уравнений. Приближенное решение таких систем известными методами приводит к большим погрешностям, что делает результат вычислений бесполезным. Однако применение систем компьютерной математики позволяет более эффективно использовать данный метод, устранить проблемы, связанные с плохой обусловленностью систем, а также получить достаточно точное решение задачи. Среди таких систем компьютерной математики следует отметить две наиболее мощные системы, такие как *Maple* и *Mathematica*.

Отметим, что используя свойство минимума площади при преобразовании области на круг, можно искать не непосредственно функцию $f(z)$, а $f'(z)$, так как под знак интеграла (3) $f(z)$ не входит, и по найденной производной $f'(z)$ восстановить функцию $f(z)$,

$$f(z) = \int_0^z f'(z) dz.$$

Используя свойство минимума длины контура при преобразовании области на круг при вычислениях удобнее искать приближения не непосредственно к производной $f'(z)$, ввиду линейности подынтегрального выражения относительно $|f'(z)|$, а к $\sqrt{f'(z)}$. Допустимыми будут все функции $\varphi(z)$, обращающиеся в единицу в начале координат. Среди них будем искать ту, которая дает наименьшее значение интеграла:

$$I = \int_L |\varphi(z)|^2 ds = \int_L \varphi(z) \overline{\varphi(z)} ds. \quad (5)$$

Если удастся разыскать решение вариационной задачи для функционала (5), то функция совершающая искомое преобразование, определится по формуле

$$f(z) = \int_0^z \varphi^2(z) dz.$$

Примеры построения конформных отображений

Рассмотрим методику применения метода Ритца в системе *Maple* на конкретных примерах.

Пример 1. Приблизительно построить конформное отображение эллипса с полуосями $a = 3$, $b = 2$, если начало координат в точке пересечения осей эллипса (рис. 1).

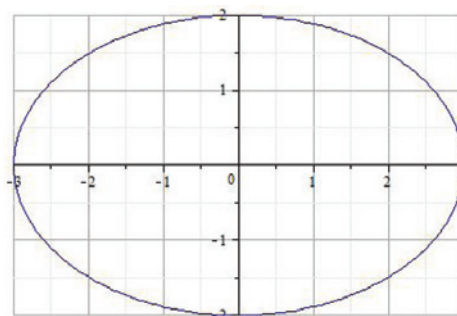


Рис. 1. Отображаемая область — эллипс

Все вычисления выполняем в системе *Maple*. Сначала подключаем необходимые пакеты:
> *with(VectorCalculus): with(Optimization):*

Для наглядности можно изобразить отображаемую область (рис. 1); в данном случае это эллипс. Набираем команду:

> *plot([3*cos(t), 2*sin(t), t = 0..2*pi], color = blue, scaling = constrained, gridlines = true).*

После нажатия клавиши «Enter» на экране монитора появится изображение эллипса (см. рис. 1).

Задаем степень полинома n и вычисляем выражения для функций $f'(z)$ и $\overline{f'(z)}$, которые обозначим как P и $P1$ соответственно; вычисляем подынтегральную функцию в функционале (3), которую обозначим как Q :

> $n := 4: P := 1 + \sum_{i=1}^n (a_i + I \cdot b_i) \cdot (x_i + I \cdot y_i)^i: P1 := 1 + \sum_{i=1}^n (a_i - I \cdot b_i) \cdot (x_i - I \cdot y_i)^i: Q := \text{expand}(P \cdot P1):$

Вычисляем функционал (3):

> $J := \text{int}\left(Q, [x, y] = \text{Ellipse}\left(\frac{x^2}{9} + \frac{y^2}{4} - 1\right)\right):$

Минимизируем функционал:

> $res := \text{Minimize}(J).$

Результат выполнения последней команды появляется на экране монитора:

$res := [16.7866843612400, [a_1 = 0., a_2 = -0.0984942061510830, a_3 = 0., a_4 = 0.00437728717667569, b_1 = 0., b_2 = 0., b_3 = 0., b_4 = 0.]]$.

Далее нужно присвоить вычисленные значения коэффициентам a_i и b_i . Это осуществляется командами

> $op(2, res): assign(\%):$

Таким образом, найдена производная отображающей функции $f'(z)$ — обозначим ее $p1$:

> $p1 := 1 + \sum_{i=1}^n (a_i + I \cdot b_i) \cdot z^i;$

$p1 := 1 + (-0.0984942061510830 + 0. I)z^2 + (0.00437728717667569 + 0. I)z^4.$

Восстанавливаем отображающую функцию > $p := \int_0^z p1 dz$

$p := z - 0.03283140205z^3 + 0.0008754574353z^5.$

Для последующего использования удобно преобразовать полученное выражение в функцию

> $p := \text{unapply}(p, z)$

$p := z \rightarrow z - 0.03283140205z^3 + 0.0008754574353z^5$

и функцию-отображение на единичный круг

> $w := \text{unapply}\left(\frac{p(z)}{\text{abs}(p(3))}, z\right)$

$w := z \rightarrow 0.4298693327z - 0.01411321289z^3 + 0.0003763323035z^5.$

Для проверки качества полученного решения параметризуем границу области D и построим график ее образа при отображении функцией $w(z)$ — рис. 2:

```
> z1 := 3 * cos(t) + 2 * sin(t):
pic1 := plot([evalc(Re(w(1))), evalc(Im(w(1))), t = 0..2 * pi]):
pic1 := plot([cos(t), sin(t), t = 0..2 * pi], color = blue, linestyle = dash, thickness = 2):
plots[display]({pic1, pic2}, tickmarks = [10, 10]).
```

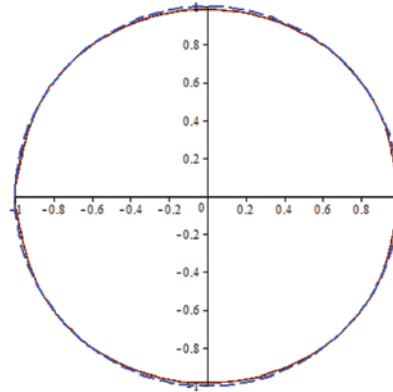


Рис. 2. Круг и его аппроксимация при отображении эллипса

На рис. 2 пунктиром показан точный единичный круг, сплошной линией — приближение к нему. Как видим, уже многочлен пятой степени дает достаточно точное приближение к кругу.

Можно оценить и погрешность вычислений:

```
> assume(t, real): abs_w1 := abs(exp and(w(z1))): Maximize(abs(abs_w1 - 1), {t ≤ 2 * pi, 0 ≤ t});
[0.00181516596201847236, [t ~ 1.02918393864730]].
```

Погрешность в данном случае составляет не более чем $\varepsilon = 0.002$.

Следует отметить, что точность и трудоемкость решения задачи зависит от характера отображаемой области. Так, для отображения на единичный круг эллипса с большим эксцентриситетом (например, с полуосями $a = 4$, $b = 1$ и эксцентриситетом $\eta = \frac{\sqrt{a^2 - b^2}}{a} = \frac{\sqrt{15}}{4} \approx 0.96825$) приходится использовать комплексный многочлен более высокой степени. На рис. 3 показан результат решения задачи при степени многочлена $n = 15$. Погрешность при этом составляет не более чем $\varepsilon = 0.02$, т.е. на порядок хуже, чем в предыдущем случае.

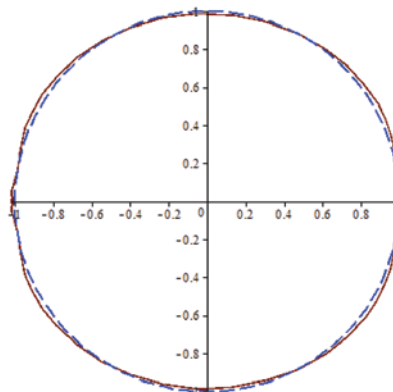


Рис. 3. Круг и его аппроксимация при отображении эллипса с эксцентриситетом 0,97.

Пример 2. Приблизительно построить конформное отображение пятиугольника с вершинами в точках $(-3, -1), (1, 3), (4, 0), (4, -2), (0, -3)$

Изобразим отображаемую область. Строим пятиугольник по его вершинам (рис. 4):

$\text{display}(\text{poligon}([[-3,-1],[1,3],[4,0],[4,-2],[0,-3]]), \text{color} = \text{gray}, \text{thickness} = 2)$.

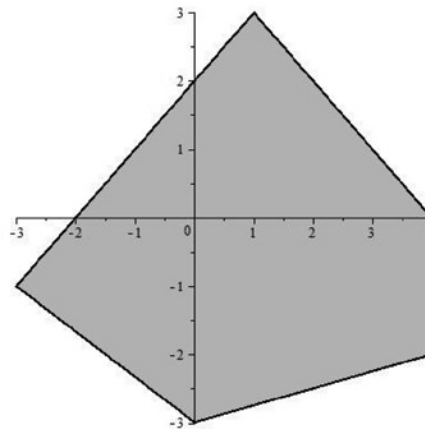


Рис. 4. Отображаемая область-пятиугольник

Задаем степень полинома n и выражения для $f'(z)$ и $\overline{f'(z)}$ — переменные P и $P1$, вычисляем подынтегральную функцию в функционале (3) — переменная Q .

Учитывая замечание о точности и трудоемкости решения задачи в конце примера 1, зададимся степенью полинома $\ll n = 40 \gg$ и увеличим число значащих цифр при выполнении расчетов ($\text{Digits} = 70$):

$\text{> } n := 40 : \text{Digits} := 70 :$

$$P := \exp \text{ and } \left(1 + \sum_{i=1}^n (a_i + I \cdot b_i) \cdot (x_i + I \cdot y_i)^i \right):$$

$$P1 := \exp \text{ and } \left(1 + \sum_{i=1}^n (a_i - I \cdot b_i) \cdot (x_i - I \cdot y_i)^i \right):$$

$$Q := \exp \text{ and } (P \cdot P1):$$

Будем вычислять функционал как сумму трех интегралов по трем треугольным областям (рис. 5):

$\text{> } T1 := \text{poligon}([[-3,-1],[1,3],[0,-3]], \text{color} = \text{gray}):$

$T2 := \text{poligon}([1,3],[4,-2],[0,-3], \text{color} = \text{green}):$

$T3 := \text{poligon}([1,3],[4,0],[4,-2], \text{color} = \text{red}):$

$\text{display}(\{T1, T2, T3\})$

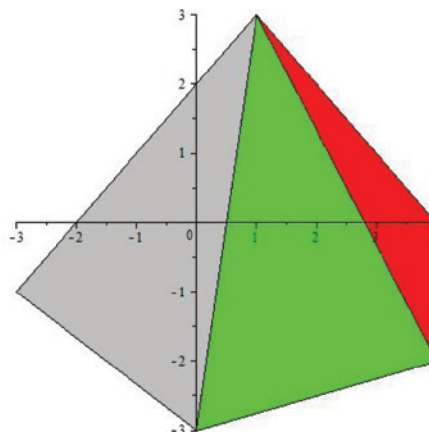


Рис. 5. Разбиение области на треугольники

Вычисляем функционал (3):

```
> J1 := int(Q,[x,y] = Triangle(<-3,-1>,<0,-3>,<1,3>)):
J2 := int(Q,[x,y] = Triangle(<0,-3>,<4,-2>,<1,3>)):
J3 := int(Q,[x,y] = Triangle(<1,3>,<4,-2>,<4,0>)):
J := J1 + J2 + J3:
```

Минимизируем функционал и восстанавливаем отображающую функцию

```
> res := Minimize(J): op(2,res): assign(%):
```

$$p1 := 1 + \sum_{i=1}^n (a_i + I \cdot b_i) \cdot z^i :$$

$$p := \int_0^z p1 dz : p := unapply(p, z):$$

$$w := unapply\left(\frac{p(z)}{\text{abs}(p(3))}, z\right):$$

Параметризуем границу области D и построим график ее образа при отображении функцией $w(z)$ — рис. 6:

```
> z1 := t + (t + 2) · I : z2 := t + (4 - t) · I : z3 := 4 + t · I : z4 := t + (t/4 - 3) · I : z5 := t - (2 · t/3 + 3) · I :
pic1 := plot([evalc(Re(w(z1))), evalc(Im(w(z1))), t = -3..1]):
pic2 := plot([evalc(Re(w(z2))), evalc(Im(w(z2))), t = 1..4]):
pic3 := plot([evalc(Re(w(z3))), evalc(Im(w(z3))), t = -2..0]):
pic4 := plot([evalc(Re(w(z4))), evalc(Im(w(z4))), t = 4..0]):
pic5 := plot([evalc(Re(w(z5))), evalc(Im(w(z5))), t = -3..0]):
pp := plot([cos(t), sin(t), t = 0..2 · π], style = point, numpoints = 5):
plots[display]({pic1, pic2, pic3, pic4, pic5, pp}):
```

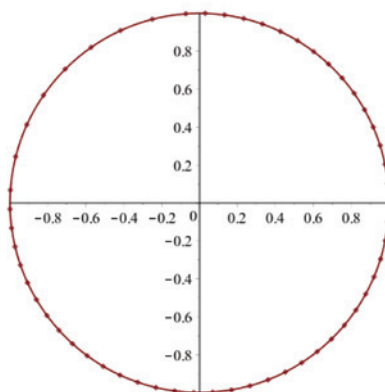


Рис. 6. Круг и его аппроксимация при отображении пятиугольника

Как видно из рис. 6, аппроксимирующая кривая практически совпадает с окружностью. Аналогично примеру 1 можно оценить и погрешность вычислений. В данном случае она не пре-

вышает $\varepsilon = 0.0005$. Обратим внимание на то, что для аппроксимации конформного отображения использовался полином степени $n = 40$, при этом расчеты выполнялись с числом значащих цифр $Digits = 70$.

Заключение

Рассмотренные примеры приближенного построения конформных отображений областей на круг единичного радиуса показывают эффективность применения вариационного метода в совокупности с системой аналитических вычислений *Maple* к решению указанных задач. Отметим, что в системе *Maple* также легко реализовать метод Ритца, основанный на свойстве минимума длины контура при конформном преобразовании области на круг. В системе *Maple* имеются эффективные средства вычисления контурных интегралов [2].

Как известно, реализация многих аналитических методов на цифровых компьютерах приводит к вычислительной неустойчивости большинства из них. Это связано с накоплением ошибок округления, возникающих при работе на множестве действительных чисел с ограниченным числом значащих цифр в мантиссе, которое реализуется на цифровых компьютерах. Выход из такого затруднительного положения видится в использовании для некоторых числовых расчетов систем аналитических вычислений, в которых проблемы, связанной с использованием ограниченного количества значащих цифр в мантиссе действительного числа, не существует.

Система *Maple* эффективно используется для решения различных задач математической физики: математического моделирования в механике деформируемого твердого тела при расчете различных судовых и гидротехнических конструкций, а также при решении задач теории упругости и теплопроводности [3] – [18].

Результаты, полученные в данной работе, могут быть использованы при решении многочисленных технических задач, возникающих на водном транспорте. Прежде всего, это относится к задачам расчета плоских гармонических векторных полей в гидромеханике (при проектировании русловых процессов или расчете полей скоростей в водопроводных галереях судоходных шлюзов), теории фильтрации (при проектировании плотин, камер судоходных шлюзов), теории теплопроводности (при решении различных задач, связанных с фазовыми переходами, в частности задач промерзания-оттаивания грунтов), а также при решении задач теории упругости, связанных с расчетами на прочность гидротехнических сооружений.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Канторович Л. В. Приближенные методы высшего анализа / Л. В. Канторович, В. И. Крылов. — М.: ГИТТЛ, 1950. — 695 с.
2. Голоскоков Д. П. Практический курс математической физики в системе Maple: учеб. пособие для вузов / Д. П. Голоскоков. — СПб.: ООО «ПаркКом», 2010. — 643 с.
3. Голоскоков Д. П. Примеры реализации в Maple энергетического метода для задач изгиба тонких плит / Д. П. Голоскоков // IV-й Междунар. семинар по математическому моделированию в системах компьютерной математики KAZCAS-2014. Междунар. школа по математическому моделированию в системах компьютерной математики KAZCAS-SCHOOL-2014; под общ. ред. Ю. Г. Игнатьева. — Казань: Изд-во Казан. ун-та, 2014. — С. 33–62.
4. Голоскоков Д. П. Расчет плоских затворов судоходных шлюзов на динамическое воздействие / Д. П. Голоскоков, А. В. Васин // Междунар. науч.-практ. конф. ИТОН-2014. IV-й Междунар. семинар и междунар. школа «Математическое и компьютерное моделирование фундаментальных объектов и явлений в системах компьютерной математики: материалы конф. и тр. семинара; под общ. ред. засл. деят. науки РТ д-ра физ.-мат. наук, проф. Ю. Г. Игнатьева. — Казань: Изд-во ООО «Фолиант», 2014. — С. 295–299.
5. Goloskokov D. P. Analyzing simply supported plates using Maple system / D. P. Goloskokov // 2014 International Conference on Computer Technologies in Physical and Engineering Applications (ICCTPEA). — 2014. — Pp. 55–56.

6. Goloskokov D. P. Simulation of the Dynamic Loads and Calculation of Plane Lock Bypass Galleries / D. P. Goloskokov, A. V. Vasin // International Conference on Computer Technologies in Physical and Engineering Applications (ICCTPEA), 2014 International Conference on. — IEEE, 2014. — Pp. 197–198.

7. Голоскоков Д. П. Моделирование температурных полей при частичном нарушении теплоизоляции / Д. П. Голоскоков // Журнал университета водных коммуникаций. — 2010. — № 4. — С. 53а–56.

8. Голоскоков Д. П. Математическое моделирование нестационарных температурных полей / Д. П. Голоскоков // Журнал университета водных коммуникаций. — 2011. — № 1 (9). — С. 79–83.

9. Голоскоков Д. П. Расчет плоских перекрытий в системах символьных вычислений / Д. П. Голоскоков // Вестник Государственного университета морского и речного флота имени адмирала С. О. Макарова. — 2015. — № 4 (32). — С. 119–125.

10. Голоскоков Д. П. Метод полиномов в задачах теории тонких плит / Д. П. Голоскоков, П. Г. Голоскоков. — СПб.: Изд-во СПбГУВК, 2008. — 254 с.

11. Голоскоков Д. П. Численно аналитические методы расчета упругих тонкостенных конструкций нерегулярной структуры / Д. П. Голоскоков. — СПб.: Изд-во А. Кардакова, 2006. — 270 с.

12. Матросов А. В. Расчет балочных перекрытий численно-аналитическим методом / А. В. Матросов // Вестник Государственного университета морского и речного флота имени адмирала С. О. Макарова. — 2012. — № 1. — С. 8–15.

13. Матросов А. В. Численно-аналитический алгоритм решения задач плоской деформации линейно-упругих тел сложной конфигурации / А. В. Матросов // Вестник Санкт-Петербургского университета. — Серия 10: Прикладная математика. Информатика. Процессы управления. — 2008. — № 3. — С. 70–84.

14. Матросов А. В. Алгоритмы получения замкнутых форм операторов метода начальных функций для пространственных задач теории упругости / А. В. Матросов, Г. Н. Ширунов // Вестник гражданских инженеров. — 2014. — № 1 (42). — С. 136–144.

15. Матросов А. В. Численно-аналитический расчет балок-стенок на линейно-упругом основании / А. В. Матросов // Вестник Государственного университета морского и речного флота имени адмирала С. О. Макарова. — 2011. — № 2. — С. 14а–21.

16. Ширунов Г. Н. Анализ напряженно-деформированного состояния упругого слоя под действием локальной нагрузки методом начальных функций / Г. Н. Ширунов // Вестник гражданских инженеров. — 2014. — № 5 (46). — С. 58–67.

17. Shirunov G. N. A method of initial functions in analyzing a stress and strain state of an elastic layer / G. N. Shirunov // Computer Technologies in Physical and Engineering Applications (ICCTPEA), 2014 International Conference on. — IEEE, 2014. — Pp. 166–167.

18. Matrosov A. V. Numerical-analytical computer modeling of a clamped isotropic thick plate / A. V. Matrosov, G. N. Shirunov // Computer Technologies in Physical and Engineering Applications (ICCTPEA), 2014 International Conference on. — IEEE, 2014. — Pp. 96–96.

MODELLING OF CONFORMAL MAPPINGS BY A VARIATION METHOD IN SYSTEM OF SYMBOLICAL EVALUATIONS MAPLE

Conformal mappings are applied at a solution of the numerous engineering problems arising on a water transport. It, first of all, problems of calculation of flat harmonious fields of vectors in a hydromechanics (river channel's processes, fields of velocities in water galleries of navigable sluices), filtration theories (at designing of dams, navigable sluice chamber).

In article the approximate method of creation of conformal mappings in system of character computation of Maple based on use of properties of a minimum of the area and a minimum of length of a circuit in case of conversion of area on a circle is considered, and application of a method of Ritz. Problems of realization of analytical methods on the computers connected with instability of the majority of them are known. The new approach to a solution of the specified problems on the basis of use of possibilities of symbolical evaluations is stated. The algorithm of a solution of a problem about construction of a conformal mapping of the set area on a circle is developed. The technique of use of Maple system is shown on two examples of creation of conformal mappings of an ellipse and a pentagon on a circle of single radius. Efficiency of application of a variation method in aggregate with system of analytical evaluations Maple to a solution of the specified problems is shown.

Keywords: conformal mapping, area, circle, Ritz method, functional minimum, the equation of Laplace, complex variable.

REFERENCES

1. Kantorovich, L. V., and V. I. Krylov. *Priblizhennyye metody vysshego analiza*. M.: GITTL, 1950.
2. Goloskokov, D. P. *Prakticheskij kurs matematicheskoy fiziki v sisteme Maple: uchebn. posobie dlja vuzov*. SPb.: OOO «ParkKom», 2010.
3. Goloskokov, D. P. "Primery realizacii v Maple jenergeticheskogo metoda dlja zadach izgiba tonkih plit." *IV-j mezhdunarodnyj seminar po matematicheskomu modelirovaniju v sistemah kompjuternoj matematiki KAZCAS-2014. Mezhdunarodnaja shkola po matematicheskomu modelirovaniju v sistemah komp'juternoj matematiki KAZCAS-SCHOOL-2014; pod obshh. red. Ju.G. Ignateva*. Kazan: Izd-vo Kazan. un-ta, 2014: 33–62.
4. Goloskokov, D. P., and A. V. Vasin. "Raschet ploskih zatvorov sudohodnyh shljuzov na dinamicheskoe vozdejstvie." *Mezhdunarodnaja nauchno-prakticheskaja konferencija ITON-2014. IV-j mezhdunarodnyj seminar i mezhdunarodnaja shkola «Matematicheskoe i kompjuternoe modelirovanie fundamentalnyh obektov i javlenij v sistemah kompjuternoj matematiki: materialy konferencii i trudy seminarov; pod obshh. red. zasl. dejat. nauki RT d.f.-m.n., prof. Ju.G. Ignateva*. Kazan: Izd-vo OOO «Foliant», 2014: 295–299.
5. Goloskokov, D. P. "Analyzing simply supported plates using Maple system." *2014 International Conference on Computer Technologies in Physical and Engineering Applications (ICCTPEA)*. 2014: 55–56.
6. Goloskokov, D. P., and A. V. Vasin. "Simulation of the Dynamic Loads and Calculation of Plane Lock Bypass Galleries." *International Conference on Computer Technologies in Physical and Engineering Applications (ICCTPEA), 2014 International Conference on*. IEEE, 2014: 197–198.
7. Goloskokov, D. P. "Modelling temperature fields at partial imbalance thermal covering." *Zhurnal universiteta vodnyh kommunikacij* 4 (2010): 53a–56.
8. Goloskokov, D. P. "Mathematical modelling of the non-stationary temperature fields." *Zhurnal universiteta vodnyh kommunikacij* 1 (2011): 79–83.
9. Goloskokov, D. P. "Calculation of plane overlappings in system of symbolical calculations." *Vestnik gosudarstvennogo universiteta morskogo i rechnogo flota imeni admirala S.O. Makarova*. 4(32) (2015): 119–125.
10. Goloskokov, D. P., and P. G. Goloskokov. *Metod polinomov v zadachah teorii tonkih plit*. SPb.: Izd-vo SPGUVK, 2008.
11. Goloskokov, D. P. *Chislenno analiticheskie metody rascheta uprugih tonkostennyh konstrukcij nereguljarnoj struktury*. SPb.: Izd-vo A. Kardakova, 2006.
12. Matrosov, A. V. "A numerical-analitic analysis of grillages." *Vestnik gosudarstvennogo universiteta morskogo i rechnogo flota imeni admirala S.O. Makarova* 1 (2012): 8–15.
13. Matrosov, A. V. "Chislenno-analiticheskij algoritm reshenija zadach ploskoj deformacii linejno-uprugih tel slozhnoj konfiguracii." *Vestnik Sankt-Peterburgskogo universiteta. Serija 10: Prikladnaja matematika. Informatika. Processy upravlenija*. 3 (2008): 70–84.
14. Matrosov, A. V., and G. N. Shirunov. "Algorithms for obtaining closed forms of the operators of the initial functions method for three-dimensional problems of the elasticity theory." *Vestnik grazhdanskikhingenerov* 1(42) (2014): 136–144.
15. Matrosov, A. V. "A numerically-analitical analysis of wall-beams on a linearly elastic foundation." *Vestnik gosudarstvennogo universiteta morskogo i rechnogo flota imeni admirala S.O. Makarova* 2 (2011): 14a–21.
16. Shirunov, G. N. "Analysis of the stress-strain state of elastic layer loaded locally by the initial functions method." *Vestnik grazhdanskikhingenerov* 5(46) (2014): 58–67.
17. Shirunov, G. N. "A method of initial functions in analyzing a stress and strain state of an elastic layer." *Computer Technologies in Physical and Engineering Applications (ICCTPEA), 2014 International Conference on*. IEEE, 2014: 166–167.
18. Matrosov, A. V., and G. N. Shirunov. "Numerical-analytical computer modeling of a clamped isotropic thick plate." *Computer Technologies in Physical and Engineering Applications (ICCTPEA), 2014 International Conference on*. IEEE, 2014: 96–96.

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРЕ

Голоскоков Дмитрий Петрович –
доктор технических наук, профессор.
ФГБОУ ВО «ГУМРФ имени
адмирала С. О. Макарова»
GoloskokovDP@gumrf.ru

INFORMATION ABOUT THE AUTHOR

Goloskokov Dmitry Petrovich —
Doctor of Engineering, professor.
Admiral Makarov State University
of Maritime and Inland Shipping
GoloskokovDP@gumrf.ru

АНАЛИЗ И КЛАССИФИКАЦИЯ ЗАДЕРЖЕК, ВОЗНИКАЮЩИХ ПРИ РАБОТЕ ПРОТОКОЛА ARP В ПРОГРАММНО-КОНФИГУРИРУЕМЫХ СЕТЯХ

Рассматривается функционирование протокола определения адресов ARP в программно-конфигурируемых сетях. Выделены актуальные проблемы инфокоммуникационной отрасли, послужившие причиной возникновения и развития концепции программно-конфигурируемых сетей. Показана актуальность исследований в области программно-конфигурируемых сетей для модернизации инфокоммуникационной инфраструктуры транспортной сферы Российской Федерации. Описан алгоритм обработки ARP-пакетов на сетевом контроллере. Проанализированы и классифицированы основные типы задержек, возникающих в программно-конфигурируемых сетях при функционировании протокола ARP. Рассмотрена возможность применения указанных типов задержек для описания поведения программно-конфигурируемых сетей при реализации механизма определения адреса ARP с помощью методов теории массового обслуживания. Получены формулы оценки задержек в программно-конфигурируемых сетях, позволяющие сетевому инженеру получить конкретные значения времени обработки пакетов на каждом из устройств сети.

Ключевые слова: протокол определения адреса, программно-конфигурируемые сети, коммутация пакетов, трафик, алгоритм, сетевой контроллер, теория массового обслуживания, задержка, анализ, классификация.

Введение

В настоящее время в Российской Федерации существует необходимость модернизации транспортной системы и повышения качества оказываемых населению транспортных услуг [1]. К процессу модернизации транспортной системы страны невозможно подойти без учета географической протяженности Российской Федерации. Следовательно, потребность в модернизации информационно-телекоммуникационной инфраструктуры, осуществляющей взаимосвязь информационных объектов предприятий транспортной отрасли, не вызывает сомнений. А значит, для решения назревших проблем транспортной отрасли необходимо учитывать тенденции в инфокоммуникационной сфере.

На данный момент можно выделить такие тенденции развития отрасли инфокоммуникационных технологий как лавинообразный рост объемов трафика, в том числе трафика мобильной передачи данных, увеличение числа подключаемых к сети Интернет устройств и реализация концепции Интернета вещей, рост популярности облачных вычислений, концентрация ресурсов в центрах обработки данных (ЦОДах), а также активное внедрение решений с использованием виртуализации, что в совокупности приводит к возрастанию роли организации управления сетью для обеспечения гибкости, масштабируемости, производительности и надежности сети.

С 2006 г. активно развивается новый подход к построению архитектуры компьютерных сетей и организации управления сетью, призванный решить большинство из актуальных проблем отрасли за счет логического разделения функций управления сетью и передачи данных. Данная концепция получила название программно-конфигурируемых сетей (от англ. — *Software Defined Networks, SDN*, далее — ПКС). Уже в настоящее время можно говорить о жизнеспособности ПКС и активной поддержке данной парадигмы как со стороны производителей сетевого оборудования, так и в научной среде. Необходимо заметить, что концепция программно-конфигурируемых сетей может существенно помочь отечественным компаниям в сложившихся экономических условиях успешно реализовать политику импортозамещения путем создания собственных ПКС-контроллеров и коммутаторов. Более того, согласно прогнозам экспертов *SDx Central* [2], к 2020 г. объем рынка ПКС-решений достигнет внушительной цифры в \$105 млрд.

В [3] — [5] рассматриваются различные пути модернизации сетевой инфраструктуры транспортных компаний, однако в указанных работах не рассматривается возможность применения концепции программно-конфигурируемых сетей. На данный момент существует относительно небольшое число работ российских авторов [6] — [7], посвященных математическому описанию функционирования программно-конфигурируемых сетей, однако в них не анализируется работа протокола ARP. Иностранцами авторами [8] описывается концепция ARP-прокси применительно к ПКС, но анализ данной концепции с применением методов теории массового обслуживания не производится. Работы в данном направлении могут позволить существенно сократить затраты при практическом развертывании ПКС благодаря предварительным расчетам параметров сети, и кроме того, позволят предсказывать поведение отдельных сетевых узлов и сети в целом.

Одним из ключевых параметров работы сети является производительность, непосредственное влияние на которую оказывают задержки, возникающие при обработке поступающих пакетов. Функционирование традиционных IP-сетей невозможно представить без протокола определения адреса ARP. Данный протокол успешно применяется и в программно-конфигурируемых сетях, однако процесс определения адреса в ПКС имеет довольно существенные отличия от традиционных IP-сетей за счет использования в ПКС такого компонента, как сетевой контроллер. В [9] была рассмотрена архитектура ПКС-контроллера OpenDaylight, являющегося на данный момент одним из наиболее перспективных и широко поддерживаемых индустрией, а также определены основные модули контроллера, участвующие в обработке ARP-пакетов. В данной статье подвергаются анализу и классификации основные типы задержек, возникающих в программно-конфигурируемых сетях при функционировании протокола ARP.

Алгоритм обработки ARP-пакетов на контроллере

В традиционных локальных вычислительных сетях в процессе передачи пакетов данных от одного узла к другому важную роль играет процесс определения адресов, осуществляемый в соответствии с протоколом определения адреса ARP. Исходный узел посылает ARP-запрос коммутатору для получения MAC-адреса узла получателя. Однако механизм для обработки ARP-запросов и ARP-ответов в программно-конфигурируемых сетях отличается от данного механизма в традиционных локальных сетях. В ПКС при отсутствии на коммутаторах записей о направлении ARP-пакетов механизм определения адресов должен быть выполнен, в первую очередь, на контроллере — программно-аппаратной платформе, реализующей интеллектуальные функции сети. Алгоритм обработки ПКС-контроллером ARP-пакетов показан на рис. 1 (см. с. 219).

Определение адреса с помощью ARP-пакетов может требовать больших временных затрат, а значит будет зависеть от текущей нагрузки и от производительности контроллера. Следовательно, возможна ситуация, когда количество передаваемых данных невелико, но время, необходимое для процесса преобразования адресов может быть существенным в сравнении с временем передачи данных. Способность ПКС-контроллера реализовывать механизм определения адреса различными способами может играть важную роль для характеристики этой задержки.

Задержки, возникающие в ПКС при обработке ARP-пакетов

В [10] определяются две величины, которые можно применить для характеристики задержки механизма определения адреса:

- 1) Address Resolution Delay, No Forwarding Flow Registrations (*ARDNFFR*) — задержка определения адреса без установки потока для передачи пакета на коммутаторе;
- 2) Address Resolution Delay, Forwarding Flow Registrations (*ARDFFR*) — задержка определения адреса с установкой потока для передачи пакета на коммутаторе.

Дадим определения этим величинам, основываясь на топологии сети, представленной на рис. 2, где C — контроллер; S_1 — коммутатор; H_0 и H_1 — узлы в сети.

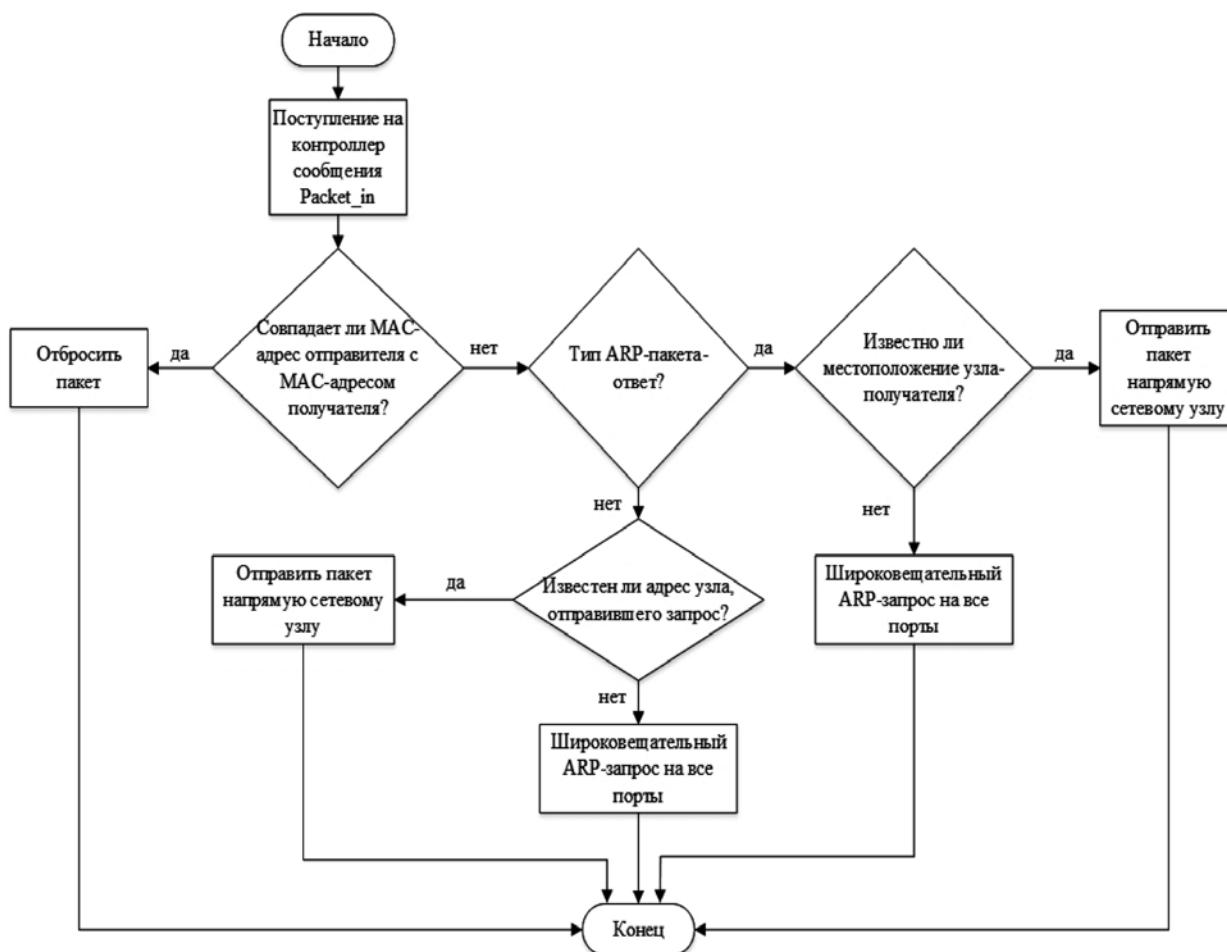


Рис. 1. Алгоритм обработки ARP-пакета ПКС-контроллером

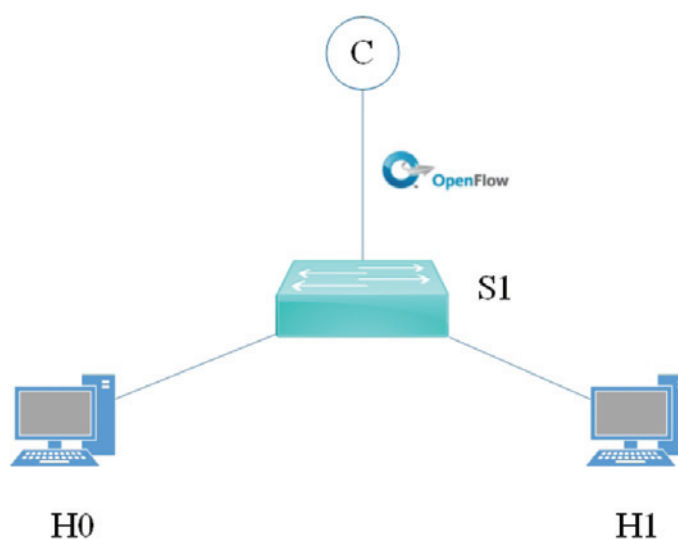


Рис. 2. Логическая схема сети

Рассмотрим задержку $ARDNFFR$. Пусть узел H_0 отправляет первый бит пакета ARP-запроса узлу H_1 в момент времени T , тогда H_0 принимает первый бит ARP-ответа от H_1 в момент времени $T + dT$ при отсутствии установленных потоков на коммутаторах для ARP-пакетов. Получаем, что задержка $ARDNFFR$ есть величина dT .

Суммарная задержка складывается из задержки передачи по каналам связи, задержки обработки пакета на контроллере и задержки обработки на коммутаторе

$$ARDNFFR = L_{ARDNFFR} + C_{ARDNFFR} + S_{ARDNFFR}, \quad (1)$$

где $L_{ARDNFFR}$ — задержка в каналах связи; $C_{ARDNFFR}$ — задержка обработки на контроллере; $S_{ARDNFFR}$ — задержка обработки на коммутаторе.

Поскольку при данном режиме работы сети контроллеру требуется обработать пакет, то задержка $C_{ARDNFFR}$ будет много больше задержек $L_{ARDNFFR}$ и $S_{ARDNFFR}$, т.е.

$$C_{ARDNFFR} \gg L_{ARDNFFR} + S_{ARDNFFR}.$$

А значит справедливо выражение

$$ARDNFFR \approx C_{ARDNFFR}. \quad (2)$$

Единицами измерения данного параметра являются миллисекунды [10]. За эталонное значение принимается время первого прохождения пакета по сети при отсутствии установленных потоков на коммутаторах для ARP-пакетов.

Рассмотрим задержку $ARDFFR$. Пусть узел H_0 отправляет первый бит пакета ARP-запроса узлу H_1 в момент времени T , тогда H_0 принимает первый бит ARP-ответа от H_1 в момент времени $T + dT$ при наличии установленных потоков на коммутаторах для ARP-пакетов. Получаем, что задержка $ARDFFR$ есть величина dT .

Суммарная задержка складывается из задержки передачи по каналам связи, задержки обработки пакета на контроллере и задержки обработки на коммутаторе

$$ARDFFR = L_{ARDFFR} + C_{ARDFFR} + S_{ARDFFR}, \quad (3)$$

где L_{ARDFFR} — задержка в каналах связи; C_{ARDFFR} — задержка обработки на контроллере; S_{ARDFFR} — задержка обработки на коммутаторе.

При данном режиме работы сети основную задержку контроллеру будет вносить коммутатор, т.е.

$$S_{ARDFFR} \gg L_{ARDFFR} + C_{ARDFFR},$$

а значит справедливо выражение

$$ARDFFR \approx S_{ARDFFR}. \quad (4)$$

Единицами измерения данного параметра являются миллисекунды [10]. За эталонное значение принимается время прохождения пакета по сети при наличии установленных потоков на коммутаторах для ARP-пакетов.

Применение $ARDFFR$ вместо $ARDNFFR$ обусловлено следующими факторами:

- определение адреса с установленными потоками на коммутаторах является основной формой механизма определения адреса в ПКС;
- когда время жизни ARP-таблиц на коммутаторе заканчивается, узел должен вновь инициировать механизм определения адреса, а значит и установку потока на коммутаторах.

Высокое значение параметров $ARDFFR$ и $ARDNFFR$ может свидетельствовать о проблемах на одном или более сегментах сети, а значит, данный параметр может быть использован для диагностики программно-конфигурируемой сети в целом.

Применение параметров задержек для описания поведения ПКС при реализации механизма определения адреса ARP

Рассмотрим возможность использования двух перечисленных параметров для оценки программно-конфигурируемых сетей.

Введем следующие обозначения:

H_0, H_1 — сетевые узлы;

C_0 — контроллер;

T_i — временной интервал, в течении которого на коммутаторах существуют записи о потоках, с;

T_0, T_f — временные границы рассматриваемого интервала, с;

λ — интенсивность потока, 1/с.

В [10] указано, что поток ARP-пакетов можно рассматривать в качестве Пуассоновского. Имея значения T_0, T_f и λ можно описать псевдослучайный Пуассоновский процесс на временном интервале $[T_0, T_f]$ с интенсивностью поступления пакетов λ . В каждый момент времени T_i значением задержки для первого процесса механизма определения адреса является параметр $ARDNFFR$, а для последующих процессов механизма определения адреса — значения параметра $ARDFFR$. Далее можно получить значение параметров $ARDNFFR$ и $ARDFFR$ на промежутке от T_0 до T_f с интервалом T_i .

Согласно [11], поток событий — последовательность событий, происходящих одно за другим в случайные моменты времени.

Пуассоновский поток — это поток, обладающий двумя свойствами — ординарностью и отсутствием последействия.

Поток называется ординарным, если для малого интервала Δt выполняется условие

$$P_1(t, \Delta t) \gg P_{>1}(t, \Delta t), \quad (5)$$

где $P_1(t, \Delta t)$ — вероятность того, что за Δt произойдёт одно событие, $P_{>1}(t, \Delta t)$ — вероятность того, что за Δt произойдёт более одного события.

Таким образом, поток можно считать ординарным, если за малый промежуток времени может произойти не более одного события (или ни одного события, вероятность чего обозначим $P_0(t, \Delta t)$). Для любого Δt справедливо

$$P_0(t, \Delta t) + P_1(t, \Delta t) + P_{>1}(t, \Delta t) = 1, \quad (6)$$

так как составляющие формулы (6) определяют полную группу несовместных событий.

Для ординарного потока

$$P_0(t, \Delta t) + P_1(t, \Delta t) \approx 1, \quad (7)$$

потому что $P_{>1}(t, \Delta t) = 0(\Delta t)$, где $0(\Delta t)$ — величина, порядок малости которой выше чем Δt [11], т. е.

$$\lim_{\Delta t \rightarrow 0} \frac{0(\Delta t)}{\Delta t} = 0. \quad (8)$$

Рассмотрим интервал $[T_0, T_f] = mT_i$, представленный на рис. 3.

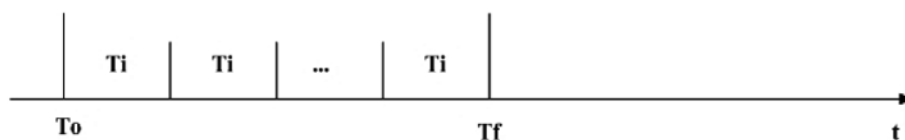


Рис. 3. Рассматриваемый интервал $[T_0, T_f]$

Отсутствие последействия — свойство, когда для двух неперекрывающихся интервалов времени число событий, попадающих в один интервал, не зависит от того, сколько событий попало в другой [11].

Воспользуемся формулой распределения Пуассона [11] для оценки вероятности возникновения k -запросов от коммутатору к контроллеру на установление правила на временном интервале $[T_0, T_f] = mT_i$. Получим

$$P_{ARDNFFR} = \frac{(\lambda m T_i)}{k!} e^{-\lambda m T_i}. \quad (9)$$

Тогда вероятность возникновения n -событий в режиме функционирования с установленными правилами на коммутаторе будет определяться формулой

$$P_{ARDFFR} = 1 - P_{ARDNFFR}. \quad (10)$$

Таким образом, согласно [10], общая задержка D , возникающая при функционировании механизма определения адреса может быть вычислена как

$$D = l \cdot ARDNFFR + n \cdot ARDFFR, \quad (11)$$

где l и n — число временных интервалов, к которым применимы параметры задержки $ARDNFFR$ и $ARDFFR$ соответственно.

Заключение

Из полученных результатов исследования можно сделать ряд выводов.

1. Если величина T_i стремится к бесконечности, то параметр $ARDFFR$ будет преобладать над $ARDNFFR$. В противном случае может практически не быть $ARDFFR$.

2. Если величина λ стремится к бесконечности, то параметр $ARDNFFR$ ничтожно мал на фоне $ARDFFR$, поскольку только одно из всего множества событий на интервале T_i будет соответствовать режиму функционирования сети без установленных потоков на коммутаторах. В противном случае, если λ слишком мала, вероятность возникновения ARP-запросов на интервале $[T_0, T_f] = mT_i$ может стремиться к нулю.

Полученные формулы оценки задержек в программно-конфигурируемых сетях имеют практическую ценность, поскольку позволяют сетевому инженеру получить конкретные значения времени обработки пакетов на каждом из устройств сети. В случае если величина задержки на контроллере весьма велика, системный администратор может сделать вывод о необходимости оптимизации работы ПКС-контроллера либо путем перенастройки установленных правил, либо путем модернизации аппаратной части.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Распоряжение Правительства Российской Федерации от 11 июня 2014 №1032-р «Об изменениях, которые вносятся в Транспортную стратегию Российской Федерации на период до 2030 года». — М., 2014. — 328 с.
2. Chua R. SDN and NFV Market Size Report and Forecast Predicts \$105B Impact by 2020 [Электронный ресурс]. — Режим доступа: <https://www.sdxcentral.com/articles/announcements/nfv-sdn-market-sizing-forecast-report-2015-download/2015/05/> (дата обращения: 30.05.2015).
3. Башмаков А. В. Выбор оптимального подхода к построению защищенных беспроводных локальных сетей / А. В. Башмаков // Вестник Государственного университета морского и речного флота имени адмирала С. О. Макарова. — 2015. — № 1 (29). — С. 222–228.
4. Белоусов А. С. Алгоритмическое обеспечение функционирования мультисервисных сетей транспортной отрасли / А. С. Белоусов // Вестник Государственного университета морского и речного флота имени адмирала С. О. Макарова. — 2014. — № 6 (28). — С. 185–190.
5. Соколов С. С. Построение защищенной информационной системы персональных данных мониторингового центра оказания телематических услуг безопасности на транспорте / С. С. Соколов, С. С. Малов, А. С. Карпина // Вестник Государственного университета морского и речного флота имени адмирала С. О. Макарова. — 2014. — № 5 (27). — С. 148–157.
6. Захаров В. А. Формальная модель и задачи верификации программно-конфигурируемых сетей / В. А. Захаров, Р. Л. Смелянский, Е. В. Чемерицкий // Моделирование и анализ информационных систем. — 2013. — Т. 20. — № 6. — С. 36–51.

7. Сапожников А. В. Математические модели нормального поведения сетевых приложений в ПКС сетях. [Электронный ресурс]. — Режим доступа: <http://arccn.ru/knowledge-base?pdf=516279440d990.pdf> (дата обращения: 30.05.2015).
8. Cho H. Centralized ARP proxy server over SDN controller to cut down ARP broadcast in large-scale data center networks / H. Cho, S. Kang, Y. Lee // Information Networking (ICOIN), 2015 International Conference on. — IEEE, 2015. — Pp. 301–306. DOI:10.1109/ICOIN.2015.7057900
9. Галич С. В. Обзор архитектуры SDN-контроллера OpenDaylight / С. В. Галич, И. К. Сердюкова, О. Е. Сафонова // Проблемы передачи информации в инфокоммуникационных системах: сб. докл. и тез. VI Всерос. научн.-практ. конф., г. Волгоград, 18 мая 2015 г. — Волгоград: Изд-во ВолГУ, 2015. — 148 с.
10. Pan X. Internet-Draft Address Resolution Delay in SDN / X. Pan, W. Sun [Электронный ресурс]. — Режим доступа: <https://tools.ietf.org/html/draft-pan-ippm-sdn-addr-resolv-perf-00> (дата обращения: 30.05.2015).
11. Карташевский В. Г. Основы теории массового обслуживания: учебник для вузов / В. Г. Карташевский. — М.: Горячая линия-Телеком, 2013. — 130 с.

ANALYSIS AND CLASSIFICATION OF DELAYS OF ARP PROTOCOL IN SOFTWARE-DEFINED NETWORKS

The paper considers implementation of address resolution protocol in the software-defined networks. Actual trends of the info-communications industry is identified. These trends led to origin and evolution of software-defined network architecture. Rationale of research in the field of software-defined networks to renovation of transport industry of Russian Federation was shown in this paper. The ARP-packets processing algorithm is described. The main types of the delay of ARP protocol in software-defined networks has been analyzed and classified. Workability of these types of delay has been considered for describing of operation of software-defined networks in case of using ARP protocol with applying queuing theory methods. The formulas of delay in software-defined networks has been developed. Network engineer can calculate the time of packet handling with applying these formulas.

Keywords: address resolution protocol, software-defined networks, packet switching, traffic, algorithm, network controller, queuing theory, delay, analysis, classification.

REFERENCES

1. Russian Federation. Government Decree №1032-р. 11 June 2014. “Transportnaja strategija Rossijskoj Federacii do 2030 goda”. M., 2014.
2. Chua, R. SDN and NFV Market Size Report and Forecast Predicts \$105B Impact by 2020. Web. 30 May 2015 <<https://www.sdxcentral.com/articles/announcements/nfv-sdn-market-sizing-forecast-report-2015-download/2015/05/>>.
3. Bashmakov, A. V. “The choice of the optimal approach to building secure wireless local area networks.” *Vestnik gosudarstvennogo universiteta morskogo i rechnogo flota imeni admirala S.O. Makarova* 1(29) (2015): 222-228.
4. Belousov, A. S. “Algorithmic support the operation of multi-service networks of the transport industry.” *Vestnik gosudarstvennogo universiteta morskogo i rechnogo flota imeni admirala S.O. Makarova* 6(28) (2014): 185-190.
5. Sokolov, S. S., S. S. Malov, and A. S. Karpina. “Creation of the personal information protected information system of the rendering telematic services of safety on transport monitoring center.” *Vestnik gosudarstvennogo universiteta morskogo i rechnogo flota imeni admirala S.O. Makarova* 5(27) (2014): C. 148-157.
6. Zaharov, V. A., R. L. Smeljanskij, and E. V. Chemerickij. “A Formal Model and Verification Problems for Software Defined Network.” *Modeling and Analysis of Information Systems* 20.6 (2013): 36-51.
7. Sapozhnikov, A. V. Matematicheskie modeli normalnogo povedenija setevyh prilozhenij v PKS setjah. Web. 30 May 2015 <<http://arccn.ru/knowledge-base?pdf=516279440d990.pdf>>.
8. Cho, H., S. Kang, and Y. Lee. “Centralized ARP proxy server over SDN controller to cut down ARP broadcast in large-scale data center networks.” *Information Networking (ICOIN), 2015 International Conference on*. IEEE, 2015: 301-306. DOI:10.1109/ICOIN.2015.7057900
9. Galich, S. V., I. K. Serdjukova, and O. E. Safonova. “Obzor arhitektury SDN-kontrollera OpenDaylight.” *Problemy peredachi informacii v infokommunikacionnyh sistemah: sb. dokl. i tez. VI Vseros. nauchn.-prakt. konf., g. Volgograd, 18 maja 2015 g.* Volgograd : Izd-vo VolGU, 2015: 148.

10. Pan, X., and W. Sun. Internet-Draft Address Resolution Delay in SDN. Web. 30 May 2015 <<https://tools.ietf.org/html/draft-pan-ippm-sdn-addr-resolv-perf-00>>.

11. Kartashevskij, V. G. *Osnovy teorii massovogo obsluzhivaniya. Uchebnik dlja vuzov*. M.: Gorjachaja linija-Telekom, 2013.

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

Семенов Евгений Сергеевич –
кандидат технических наук, доцент.
Волгоградский государственный университет
esemenov@mail.ru
Галич Сергей Владимирович –
аспирант.
Волгоградский государственный университет
Научный руководитель:
Семенов Евгений Сергеевич
sergeygali4@gmail.com
Тюхтяев Дмитрий Александрович –
аспирант.
Волгоградский государственный университет
Научный руководитель:
Семенов Евгений Сергеевич
tyukhtyaevml@mail.ru

INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Semenov Evgeny Sergeyevich –
Candidate of Engineering, associate professor.
Volgograd State University
esemenov@mail.ru
Galich Sergey Vladimirovich –
postgraduate student.
Volgograd State University
Supervisor:
Semenov Evgeny Sergeyevich
sergeygali4@gmail.com
Tyukhtyaev Dmitry Aleksandrovich –
postgraduate student.
Volgograd State University
Supervisor:
Semenov Evgeny Sergeyevich
tyukhtyaevml@mail.ru

МЕЖДУНАРОДНАЯ ВЫСТАВКА И КОНФЕРЕНЦИЯ ПО ГРАЖДАНСКОМУ СУДОСТРОЕНИЮ, СУДОХОДСТВУ, ДЕЯТЕЛЬНОСТИ ПОРТОВ И ОСВОЕНИЮ ОКЕАНА И ШЕЛЬФА «НЕВА-2015»

**ХII МЕЖДУНАРОДНАЯ ВЫСТАВКА И КОНФЕРЕНЦИЯ
ПО ГРАЖДАНСКОМУ СУДОСТРОЕНИЮ, СУДОХОДСТВУ,
ДЕЯТЕЛЬНОСТИ ПОРТОВ И ОСВОЕНИЮ ОКЕАНА И ШЕЛЬФА «НЕВА-2015»
СОСТОЯЛАСЬ В САНКТ-ПЕТЕРБУРГЕ НА МКВЦ «ЭКСПОФОРУМ»
С 22 ПО 25 СЕНТЯБРЯ 2015 Г.**

ВЫСТАВКА и конференция «НЕВА» организована в 1991 г. и проходит в Санкт-Петербурге. В ней принимают участие более 500 фирм и предприятий из 32 стран, включая Россию, Украину, Австрию, Бельгию, Китай, Хорватию, Кипр, Чешскую Республику, Данию, Финляндию, Францию, Германию, Грецию, Иран, Италию, Южную Корею, Латвию, Эстонию, Литву, Голландию, Норвегию, Великобританию, Польшу, Швецию, Швейцарию, Испанию, Турцию, Великобританию, США, Японию. В 2015 г. впервые в выставке принимают участие фирмы из Казахстана, Белоруссии, Филиппин, Объединённых Арабских Эмиратов.

В Организационный Комитет выставки, впервые сформированный во исполнение Распоряжения Правительства РФ, по «НЕВА-2015» входят: Минтранс России, Минпромторг России, МИД России, Морская Коллегия при Правительстве РФ, «Росморречфлот», «Росрыболовство», «Росгидромет», Российский морской регистр судоходства, Российская Палата Судоходства, Администрация Северного Морского Пути, Правительство и Морской Совет при Правительстве Санкт-Петербурга, Объединённая Судостроительная Корпорация, НК «Роснефть», ПАО «Совкомфлот», «Группа Транзас», предприятия-лидеры морского бизнеса, Ассоциация морских торговых портов, Союз Производителей Нефтегазового Оборудования, Ассоциация судостроителей Санкт-Петербурга и Ленинградской Области, Альянс Сварщиков Санкт-Петербурга и Северо-Западного региона, Транспортный Союз Северо-Запада, ГУМРФ имени адмирала С. О. Макарова, Крыловский ГНЦ.





Кроме того, выставка «НЕВА-2015» проходит под патронажем Торгово-Промышленной Палаты Российской Федерации при поддержке Российского Союза Промышленников и Предпринимателей, Ассоциации разработчиков, производителей и потребителей оборудования и приложений на основе глобальных навигационных спутниковых систем «ГЛОНАСС / ГНСС – Форум», Международного экспертного совета по сотрудничеству в Арктике.

Большой интерес участников и гостей вызвала экспозиция «Государственного университета морского и речного флота имени адмирала С. О. Макарова». Красочно оформленные стенды с информацией об университете и Морском учебно-тренажерном центре, курсанты в парадной форме и разнообразные сувениры — привлекли внимание многочисленных посетителей.

Экспозицию посетили высокие гости: заместитель Министра транспорта Российской Федерации Виктор Александрович Олерский, исполняющий обязанности руководителя Федерального агентства морского и речного транспорта Сергей Павлович Горелик, президент Национальной палаты судоходства Алексей Юрьевич Клявин, исполнительный директор ФГУП «Росморпорт» Андрей Васильевич Лаврищев, заместитель генерального директора ФГУП «Крыловский государственный научный центр» Владимир Валерьевич Дюков, заместитель директора по экономике и финансам Северо-Западного бассейнового филиала ФГУП «Росморпорт» Надежда Евгеньевна Калашник. Капитан морского порта «Большой порт Санкт-Петербург» Александр Борисович Волков.

ГУМРФ имени адмирала С. О. Макарова и Крыловский государственный научный центр» 22 сентября 2015 г. провели круглый стол «Использование научно-исследовательского тренажерного комплекса для обеспечения эффективной и безопасной работы арктических шельфовых проектов». Состоялась демонстрация тренажерного комплекса, обсуждение вопросов научных исследований и практической подготовки специалистов по работе в полярных водах в соответствии с новыми требованиями Конвенции ПДНВ.

ПАМЯТИ ГОРБАЧЕВА ЮРИЯ НИКОЛАЕВИЧА



17 августа 2015 года ушел из жизни Юрий Николаевич Горбачев — член редакционного совета научного журнала «Вестник Государственного университета морского и речного флота имени адмирала С. О. Макарова» доктор технических наук, более тридцати лет проработавший в ОАО «Инженерный центр судостроения» (ЦТКБ Минречфлота РСФСР) в качестве генерального директора и в последние годы — генерального конструктора.

Юрий Николаевич родился 4 октября 1945 г. в г. Уральске. По окончании школы поступил в Ленинградский кораблестроительный институт. В 1969 г. занялся научной работой в ЦНИИ имени академика А.Н. Крылова. Высокая техническая грамотность, активная жизненная позиция и преданность Родине, позволили в 1977 году стать инструктором Отдела оборонной промышленности Ленинградского Обкома КПСС. В 1982 г. он возглавил ЦТКБ Минречфлота РСФСР.

Будучи высококвалифицированным специалистом, Юрий Николаевич обладал всесторонними знаниями и всеми необходимыми навыками для их реализации, что позволило добиться всероссийского признания среди специалистов водного транспорта. Он принимал участие во всех крупных мероприятиях, направленных на развитие водной транспортной инфраструктуры, к его мнению всегда прислушивались. Более семидесяти его работ сохранились в трудах и патентах, а специалисты еще долго будут использовать его научно-производственный вклад. Большую часть своей жизни Юрий Николаевич посветил созданию и развитию речного флота России. Под его руководством были разработаны такие инновационные проекты, как грузовые суда с воздушной каверной на днище, линейные буксиры и буксиры-толкачи катамаранного типа, унифицированные научно-исследовательские суда для внутренних бассейнов России и многие другие суда для внутреннего и смешанного «река-море» плавания.

Редакция журнала
«Вестник Государственного университета
морского и речного флота имени адмирала С. О. Макарова»

Научное периодическое издание

Вестник Государственного университета морского и речного флота имени адмирала С. О. Макарова

Выпуск 5 (33)

2015 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 19.10.15. Формат 60х90/8
Гарнитура Times New Roman. Усл. печ. л. 28,5. Тираж 500 экз. Заказ № 554/15

Государственный университет морского и речного флота имени адмирала С. О. Макарова
198035, Санкт-Петербург, ул. Двинская, 5/7